

Deflektometrie zur Qualifizierung der Formgenauigkeit von solaren Konzentratoren

Steffen Ulmer*, Tobias März, Stefan Wilbert, Marc Röger

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

Zusammenfassung

Der optische Wirkungsgrad von solaren Konzentratoren wird maßgeblich durch die genaue Einhaltung der Sollform der Spiegeloberfläche bestimmt. Zur hochgenauen Vermessung der Formabweichungen solcher Konzentratoren wurde ein optisches Messverfahren entwickelt, das auf der Beobachtung von im Spiegel reflektierten und deformierten Streifenmustern basiert. Die Messmethode kann flexibel für beliebige Geometrien eingesetzt werden und wurde als feststehender Prüfstand im DLR-Qualifizierungszentrum für solarthermische Kraftwerkstechnik aufgebaut. Dieser Prüfstand erlaubt eine herstellerunabhängige Bewertung der Form-Qualität von Konzentratorspiegeln. Das Messverfahren wurde darüber hinaus für die dynamische Vermessung der Deformationen von schwingenden Spiegeln weiterentwickelt und erprobt.

1 Einführung und Ziele

Die exakte Formgebung der Spiegeloberfläche spielt eine zentrale Rolle für den Ertrag von konzentrierenden Solarkollektoren. Schon geringe Abweichungen von der Sollgeometrie können zu optischen Verlusten von mehreren Prozent führen. Trotzdem ist die Bewertung der Spiegelformgebung in der Vergangenheit nicht konsequent komponentenspezifisch möglich gewesen, da es keine geeigneten standardisierten Messprozeduren und Prüfstände gab. Für die hochgenaue Vermessung der Formtreue von Spiegel-Elementen ist nach den neuesten Erkenntnissen des DLR die Deflektometrie oder von ihr abgeleitete Messmethoden am besten geeignet. Dieses Verfahren wurde im DLR in den letzten Jahren im BMU-Projekt SAPHIR für die automatische Vermessung von Heliostaten entwickelt^[1]. Damit konnten die Messgenauigkeit, die Auflösung und die Geschwindigkeit der Messung der Spiegelform gegenüber existierenden Messmethoden wesentlich verbessert werden.

Ziel der Weiterentwicklungen im BMU-Projekt QUARZ ist es, das Messverfahren flexibler zu gestalten und für beliebige Konzentratoren und Spiegel-Elemente einsetzbar zu machen. Auf diesem Messverfahren basierend wird ein stationärer Prüfstand für die standardisierte Vermessung von Konzentratorspiegeln im DLR-Qualifizierungszentrum für solarthermische Kraftwerkstechnik aufgebaut. Damit wird eine Möglichkeit zur herstellerunabhängigen Vermessung und Zertifizierung von solaren Konzentratorspiegeln geschaffen.

Zusätzlich zu statischen Formabweichungen treten im realen Kraftwerksbetrieb auch dynamische Formabweichungen durch Windkräfte auf, die ebenfalls Einfluss auf den Wirkungsgrad des Solarfelds haben. Derzeit herrscht aufgrund fehlender Messmöglichkeiten noch Unklarheit über die genauen Auswirkungen dieser Windlasten, insbesondere der Schwingungen der Glasspiegel. Die deflektometrische Messmethode wird deshalb für dynamische Messungen bei hohen Bildraten weiterentwickelt und an Beispielen erprobt.

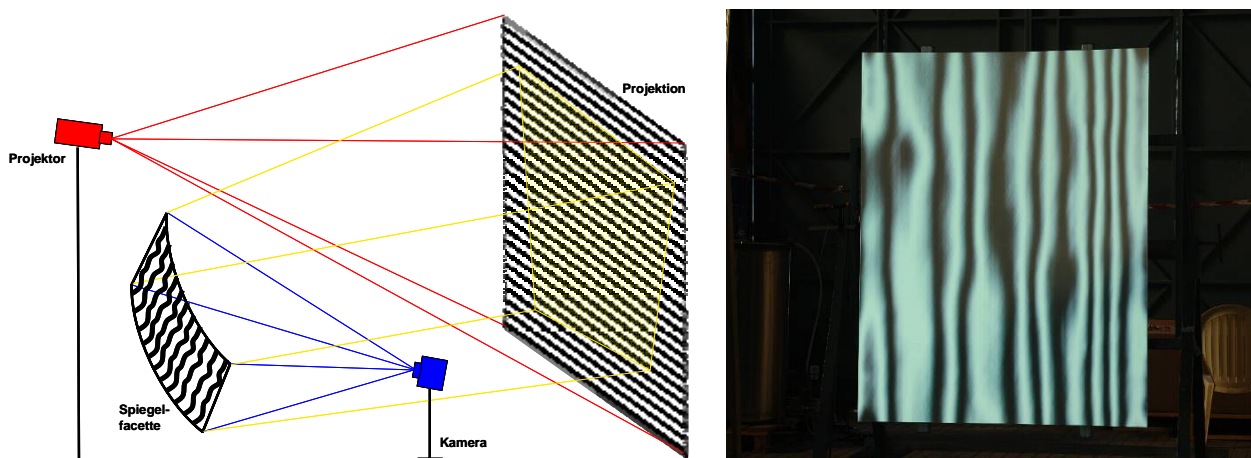


Bild 1: Aufbau des Deflektometrie-Messsystems zur Vermessung der Spiegelfehler von Einzelspiegeln im Labor (links), Spiegel mit reflektiertem Streifenmuster (rechts).

2 Resultate

Die deflektometrische Messmethode zur Qualifizierung von Heliostatenfeldern nutzt die Projektion von regelmäßigen Streifenmustern auf eine Projektionswand und die Beobachtung der im Spiegel reflektierten und deformierten Streifenmuster zur Messung der lokalen Spiegelnormalen. Sie wurde erweitert, um damit auch die geometrischen Spiegelfehler von Einzelspiegeln im Labor messen zu können und wurde als stationärer Prüfstand im Quarz-Labor aufgebaut. Die wesentlichen Komponenten für die Messungen sind Digitalkameras, Projektor und Projektionswand mit Streifenmustern (Bild 1). Eine zusätzliche horizontale Projektionswand erlaubt die Spiegel auch in der für den Betrieb relevanten horizontalen Lage zu vermessen.

Das Messsystem erlaubt eine flexible Messung beliebiger Spiegelgeometrien, Spiegelgrößen und auch unbespiegelter Gläser. Die Messzeit beträgt etwa 30 Sekunden, die Auswertzeit etwa 1 Minute, die maximale Auflösung beträgt etwa 2 Millionen Messpunkte pro Messung. Die lokale Messunsicherheit von Einzelpunkten ist $<0,5$ mrad.

Messungen wurden bereits an verschiedensten Spiegeln, Gläsern, Dishes, Fresnel-Konzentratoren und Heliostaten durchgeführt und erfolgreich ausgewertet. Zur Validierung wurden vergleichende Photogrammetrie-Messungen als Referenz durchgeführt. Der Vergleich der gemessenen Spiegelform zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 2). Es wird auch deutlich, dass die Deflektometrie ein wesentlich hochaufgelösteres und weniger verrauschtes Messergebnis, auch im Randbereich, liefert.

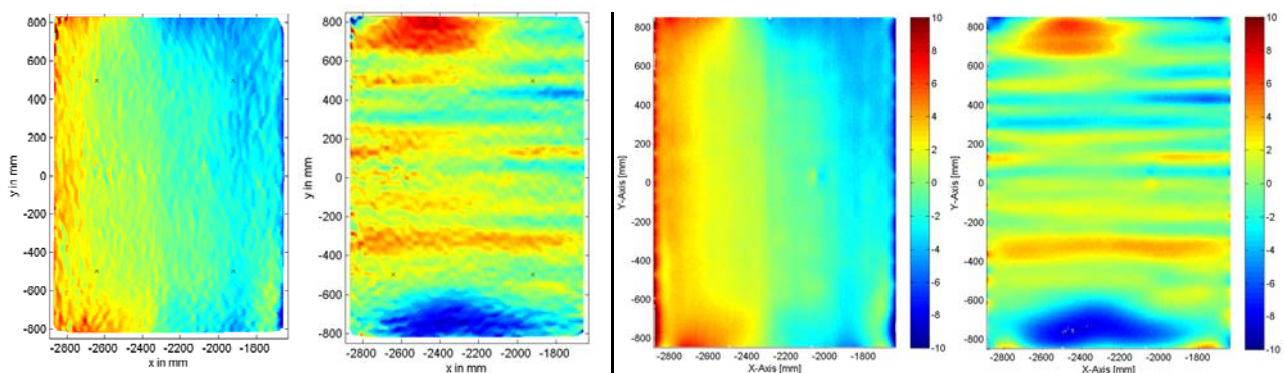


Bild 2: Vergleich der gemessenen Spiegelform aus Photogrammetrie (links) und Deflektometrie (rechts) zur Validierung der Methode, jeweils in transversaler und longitudinaler Richtung, in mrad.

Das Messverfahren konnte durch Verwendung von farbig codierten Streifenmustern und verbesserten Kalibrations- und Auswerte-Algorithmen auch für dynamische Messungen von schwingenden Spiegeloberflächen erweitert werden. Ein speziell konstruierter Schwingungsmessstand erlaubt das kontrollierte Aufbringen von Schwingungen auf Einzelspiegel im Labor und deren dynamische Vermessung. Die erreichten Abtastfrequenzen liegen bei 10 Hz für Messungen der Steigungsfehler in beide Richtungen und bei 60 Hz für Messungen in nur einer Richtung (für eindimensional gekrümmte Spiegel). Das System steht nun für Feldmessungen zur Verfügung.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Der entwickelte Prüfstand zur genauen Vermessung beliebiger Konzentratorspiegel hat Messdaten und Interpretationen von großer Bedeutung für Hersteller und Käufer der Spiegel hervorgebracht. Die entwickelten Prüfstände ermöglichen eine herstellerunabhängige Bewertung der optischen Qualität und zeigen außerdem Verbesserungspotentiale der Spiegelform auf. Das Messsystem kann durch die hohen Messgeschwindigkeiten und ohne zusätzliche Probenvorbereitungen auch zur Qualitätssicherung in der Fertigung eingesetzt werden.

Mit dem weiterentwickelten dynamischen Messverfahren ist die Messung der Deformationen von schwingenden Spiegeln möglich geworden. Auf dieser Basis sind Messungen zum Einfluss von Wind auf die Betriebseigenschaften vorgesehen.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Projekts QUARZ-CSP (Förderkennzeichen 03UM0095) finanziell unterstützt.

Literatur

¹ S. Ulmer, M. Röger: Automatisierte hochaufgelöste Vermessung der Spiegelfehler von Heliostaten. 10. Kölner Sonnenkolloquium „F&E mit hochkonzentrierter Strahlung“, 21. Juni 2007, DLR, Köln-Porz.