

Messung der Formgenauigkeit von Konzentratorspiegeln mit Deflektometrie - Anwendungen in Forschung, Entwicklung und Produktion

Steffen Ulmer*, Tobias März, Siw Meiser¹, Christian Weber²

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

Kurzzusammenfassung

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 feststehende Prüfstände zur herstellerunabhängigen Bewertung im DLR-Qualifizierungszentrum für solarthermische Kraftwerkstechnik aufgebaut. Neben standardisierten Messungen der Formgenauigkeit der Spiegel können in diesen Testständen auch detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie der Spiegelhalterungen, der Verformung durch Gravitation bei unterschiedlicher Positionierung der Spiegel sowie dynamische Messungen zur Untersuchung des Schwingverhaltens bei Windbelastung durchgeführt werden. Das stationäre Messverfahren wurde von der DLR-Spinoff-Firma CSP Services GmbH zu einem kommerziellen und automatischen Messsystem weiterentwickelt und wird derzeit bei mehreren Spiegelherstellern zur Qualitätssicherung eingesetzt.

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. Für die hochgenaue Vermessung der Formtreue von Spiegel-Elementen ist nach den Erkenntnissen des DLR die Deflektometrie oder von ihr abgeleitete Messmethoden am besten geeignet. Dieses Verfahren wurde im DLR in den letzten Jahren in den BMU-Projekten SAPHIR⁽¹⁾ und QUARZ⁽²⁾ zu einem flexibel einsetzbaren Messsystem für beliebige Konzentratoren und Spiegel-Elemente weiterentwickelt und als stationäre Prüfstände für die standardisierte Vermessung von Konzentratorspiegeln im DLR-Qualifizierungszentrum für solarthermische Kraftwerkstechnik aufgebaut.

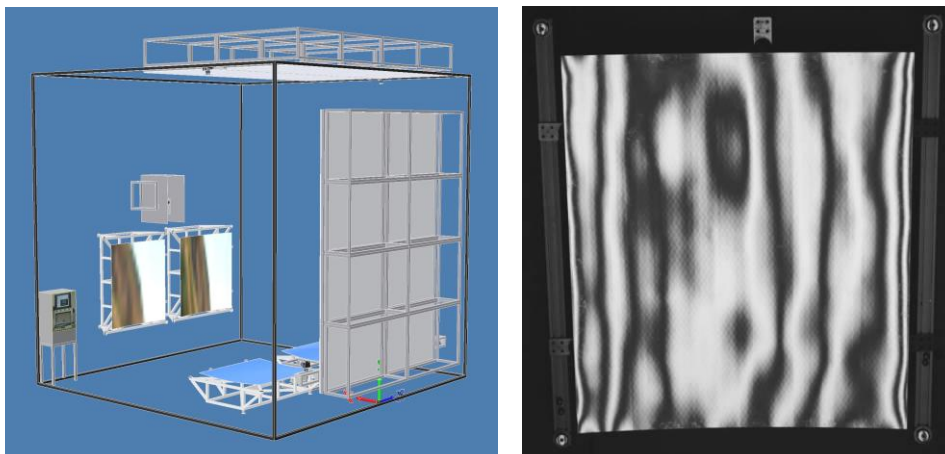


Bild 1: Aufbau des Deflektometrie-Messsystems zur Vermessung der Spiegelfehler von Einzelspiegeln (links), Spiegel mit reflektiertem Streifenmuster (rechts)

In diesen Testständen können neben den Standard-Messungen auch detaillierte Untersuchungen verschiedener Einflüsse auf die Konzentratorform durchgeführt werden, zum Beispiel die Verformung durch Gravitation in verschiedenen Winkelstellungen oder durch die Genauigkeit der Spiegelhalterungen. Zusätzlich zu statischen Formabweichungen können im realen Kraftwerksbetrieb auch dynamische Formabweichungen durch Windkräfte auftreten, die ebenfalls Einfluss auf den Wirkungsgrad des Solarfelds haben. Das Messverfahren wurde deshalb auch für dynamische Messungen bei hohen Bildraten weiterentwickelt und an Beispielen erprobt.

* Korrespondenzautor: Tel.: +34 950 265320, Fax: +34 950 260315, E-mail: steffen.ulmer@dlr.de

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V., Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln

² CSP Services GmbH, Paseo de Almería 73/2, 04001 Almería, Spanien

Das stationäre Messverfahren wurde in den letzten beiden Jahren von der DLR-Ausgründung CSP Services GmbH zu einem vollautomatischen Messsystem für den industriellen Einsatz weiterentwickelt und erfolgreich in mehreren Produktionsbetrieben eingeführt (Bild 1). Damit wird eine den hohen Anforderungen entsprechende Qualitätssicherung und eine fortlaufende Qualitätsverbesserung in der industriellen Produktion ermöglicht.

2 Resultate

Das Messsystem erlaubt eine flexible Messung beliebiger Spiegelgeometrien, Spiegelgrößen und auch unbespiegelter Gläser. Die Messzeit beträgt etwa 30 Sekunden, die Auswertzeit je nach Konfiguration 1-2 Minuten, die maximale Auflösung beträgt bis zu 2 Millionen Messpunkte pro Messobjekt. Ergebnisse einer Messung sind neben den direkt gemessenen Winkelabweichungen, die integrierten Formabweichungen sowie anhand eines Raytracings bestimmten Fokalabweichungen und Interceptwerte des Messobjekts. Die lokale Messunsicherheit von Einzelpunkten ist $<0,5$ mrad. Dies wurde durch Validierungsmessungen mit einer Wasseroberfläche als Referenz und durch Vergleiche zu Photogrammetriemessungen bestätigt.

Bild 2 zeigt beispielhaft ein Messergebnis zur Untersuchung der Verformung eines Spiegels unter Eigengewicht (links) und ein Messergebnis zur Untersuchung der Fehlstellung einer Halteklammer (rechts).

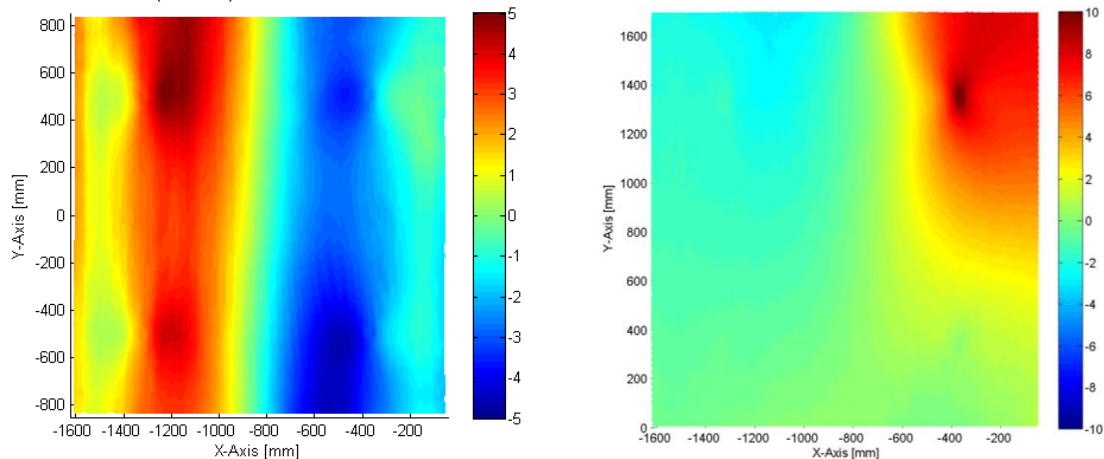


Bild 2: Messergebnis zur Untersuchung der Verformung eines Spiegels unter Eigengewicht (links) und zur Untersuchung der Fehlstellung einer Halteklammer (rechts).

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).

3 Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Messsystem 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. Mit dem weiterentwickelten dynamischen Messverfahren ist die Messung der Deformationen von schwingenden Spiegeln möglich geworden. Das kommerzielle Messsystem kann durch die hohen Messgeschwindigkeiten und den hohen Automatisierungsgrad ohne zusätzliche Probenvorbereitungen zur Qualitätssicherung in der Fertigung eingesetzt werden und ist derzeit bei mehreren namhaften Spiegelherstellern im Einsatz.

Teile dieser Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen der Projekte SAPHIR (Förderkennzeichen 16UM0068) und QUARZ-CSP (03UM0095) finanziell unterstützt.

Literatur

¹ S. Ulmer, T. März, C. Prah, W. Reinalter, B. Belhomme: Automated High Resolution Measurement of Heliostat Slope Errors. Proceedings of the SolarPACES conference, 15-18 September 2009, Berlin, Germany.

² S. Ulmer, T. März, S. Wilbert, M. Röger: Deflektometrie zur Qualifizierung der Formgenauigkeit von solaren Konzentratoren. 12. Sonnenkolloquium: Qualifizierung von Komponenten Solarthermischer Kraftwerke, DLR, Köln-Porz, 9. Juni 2009