

Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung solarthermischer Kraftwerkskomponenten

Dr. Eckhard Lüpfer
DLR

eckhard.luepfert@dlr.de

Dr. Klaus Pottler
DLR

klaus.pottler@dlr.de

Dr. Steffen Ulmer
DLR

steffen.ulmer@psa.es

Wolfgang Schiel
SBP

w.schiel@sbp.de

Anna Heimsath

Fraunhofer ISE
anna.heimsath@ise.fraunhofer.de

Dr. Werner Platzer

Fraunhofer ISE
platzer@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Robert
Pitz-Paal

DLR
robert.pitz-paal@dlr.de

Einleitung

Für solarthermische Kraftwerke werden typischerweise Solarfelder von mehreren 100.000 Quadratmetern Spiegel-Fläche benötigt. Auf dem vorbereiteten Untergrund werden Fundamente erstellt und darauf große Konzentratorstrukturen errichtet (*Abbildung 1*). Die nötige Strahlungsfokussierung zum Erreichen hoher Temperaturen macht es erforderlich, die Spiegel innerhalb einer Toleranz von etwa $0,1^\circ$ auszurichten. Auch die Spiegel selbst müssen eine vorgegebene Krümmungsform einhalten, um die Anforderungen zu erfüllen.

Der Krümmungsradius der Spiegel hängt von der Technologie-Variante ab. Die kürzesten Brennweiten haben Parabolrinnen-Kollektoren sowie die Sekundärkonzentratoren von Linear-Fresnel-Kollektoren. Hier kommen bei Einsatz von Glas thermische Umform-Verfahren zum Einsatz. Längere Brennweiten sind bei Dish-Stirling-Systemen zu finden. Primärspiegel von Linear-Fresnel-Kollektoren und Heliostate von Solarturm-Anlagen haben so lange Brennweiten, dass Flachglas ohne Erwärmung durch Montagevorrichtungen in den richtigen geringen Krümmungen in die Tragstrukturen montiert werden kann. Wird Dünnglas oder Aluminium als Reflektor verwendet, vereinfacht sich der

Formgebungsprozess, jedoch werden zusätzliche Trag-Elemente zur Fixierung der Reflektorform benötigt, die dann wiederum die geeigneten Form-Spezifikationen erfüllen müssen. Die großformatigen Tragstrukturen halten die Spiegel in ihrer Position und den Absorber im Fokus und sind verantwortlich für die Nachführung zum Sonnenstand. Bei der Größe der Flächen dürfen Eigengewicht und Windlasten keinen zu starken Einfluss auf die Form ausüben.

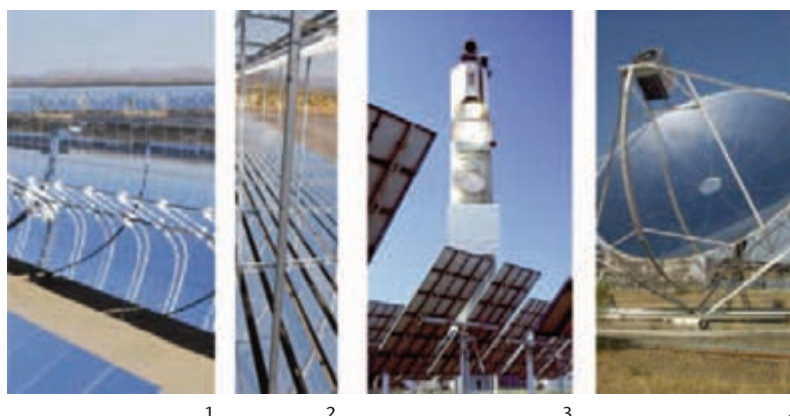
Neben konstruktiven Maßnahmen zur Erfüllung dieser Anforderungen sind vor allem die Spezifikation der Komponenten und die Ausführung der Montage von entscheidendem Einfluss auf die Kollektor-Leistung.

Um die Ergebnisse im Rahmen einer Qualitätssicherung zu prüfen, wurden geeignete Messverfahren entwickelt, um die relevanten Eigenschaften der Kollektoren zu ermitteln.

Dreidimensionale Punktmessung

Mittels photogrammetrischer Methoden lassen sich quantitative Größen für die Qualifizierung der Genauigkeit eines Parabolrinnen-Kollektors schnell und zuverlässig messen. Für eine Serienfertigung der Parabolrinnen wurde im DLR eine

Abbildung 1
Solarthermische Stromerzeugung:
1. Parabolrinnen-Kraftwerk
2. Linear-Fresnel-Kollektoren
3. Solarturmkraftwerk
4. Dish-Stirling-System



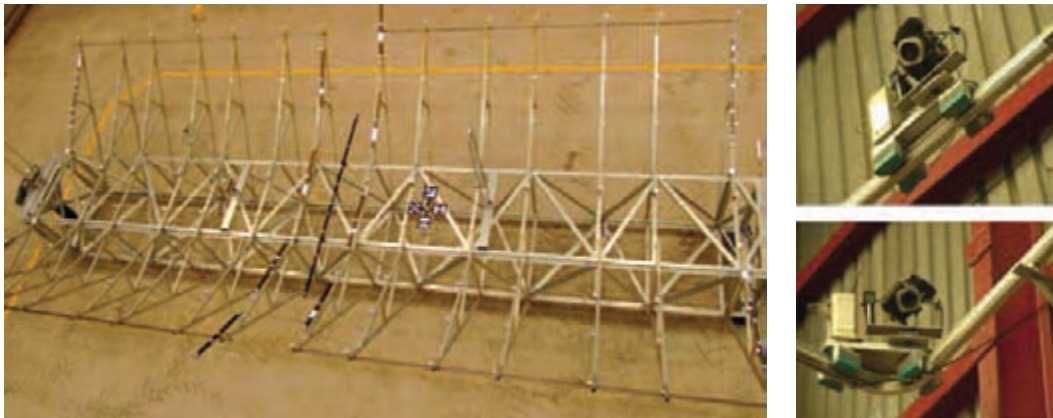


Abbildung 2
Kollektorstruktur mit
Zielmarken bei der
3D-Messung (links).

Kamera-Shuttle auf
dem Schienensystem
(rechts)

automatisierte Messeinrichtung entwickelt. Sie wird in die Kollektorproduktionslinie integriert und ermöglicht es, Montagefehler im Produktionsprozess sofort zu erkennen, um rechtzeitig deren Ursachen zu beseitigen. Der Einsatz eines solchen Systems stellt daher eine sinnvolle Maßnahme zur Dokumentation der Fertigung sowie zur Sicherung des energetischen Ertrags des Solarfeldes und damit des ökonomischen Erfolges eines Kraftwerkprojekts dar. *Abbildung 2* zeigt eine zu überprüfende Kollektorstruktur mit den für die photogrammetrische Vermessung notwendigen reflektierenden Zielmarken sowie das Kamera-Shuttle in zwei Positionen auf der Schiene über dem Messstand.

Eine hochauflösende Digitalkamera umfährt das zu prüfende Kollektor-Modul auf einer Kurvenbahn. An mehreren Positionen werden Fotos von der Kollektorstruktur aufgenommen und über eine Funkverbindung auf den Messrechner übertragen. Eine photogrammetrische Auswertung ermittelt daraus die 3D-Koordinaten der Messpunkte, woraus die relevanten Abweichungen von den Sollwerten bestimmt werden. Die Ergebnisse werden innerhalb von wenigen Minuten gewonnen und protokolliert. Das Prüfergebnat (innerhalb/außerhalb Toleranz) wird dem Bedienungspersonal über eine Signalisierung angezeigt, so dass sofort Entscheidungen für die Weiterbehandlung des Moduls zur Verfügung stehen. Treten Abweichungen zwischen Ist- und Sollwerten auf, so können diese lokalisiert und die Ursache im Produktionsprozess zeitnah behoben werden. Das Messsystem wurde nach VDI/VDE-Richtlinie 2634 überprüft. Die größte Unsicherheit eines einzelnen Messpunktes war kleiner als $\pm 0,4$ mm, die Standardabweichung betrug 0,1 mm.

Reflexionsmessung an Heliostaten

Optische Messsysteme für solare Turmkraftwerke können bei der Heliostat-Entwicklung, bei der Facetten- und Heliostat-Montage und für einen sicheren, effektiven Betrieb des Solarfeldes eingesetzt werden. Neuartige Messmethoden des DLR und die weitgehende Automatisierung ermöglichen eine wirtschaftliche, hochauflösende Vermessung der Spiegelfehler von Heliostaten und dienen damit als Grundlage für kostengünstige Optimierungen, zur exakteren Modellierung zur Ertragsvorhersage und zur Endabnahme von Heliostatfeldern. Dies kann zu einer signifikanten Ertragssteigerung des Kraftwerks mit geringerem Ertragsrisiko und zu reduzierten Kosten für die Fertigungskontrolle beitragen.

Mit Hilfe der Raster-Reflexionsmethode (RRM) können Spiegelfehler von Heliostaten in hoher Auflösung gemessen werden. Die RRM wird in

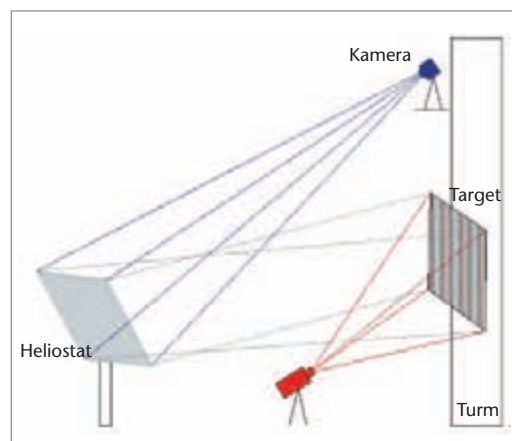
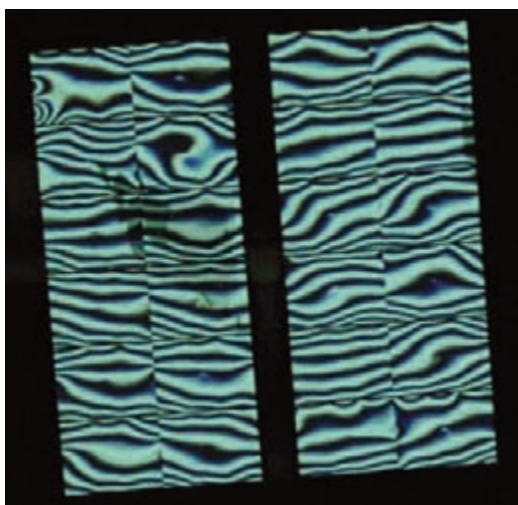


Abbildung 3
Skizze des Messaufbaus
zur Spiegelvermessung
mit der Raster-
Reflexionsmethode

Abbildung 4
Beispiel eines im
Heliostat gespiegelten
horizontalen Streifen-
musters



projiziert, und einer Kamera auf dem Turm, die Bilder von den gespiegelten Streifenmustern (Abbildung 4) aufnimmt.

Diese Methode hat den Vorteil, dass direkt die Spiegelung zur Messung verwendet wird und dadurch hohe Genauigkeiten für die Spiegelsteigung bei gleichzeitig hoher örtlicher Auflösung möglich sind. Derzeit wird eine Auflösung von etwa 1 Million Messpunkten pro Heliostat mit einem Messfehler $< 0,1$ mrad erreicht. Gegenüber bisherigen Verfahren (Laser-Scanner, Photogrammetrie) bietet dieses Verfahren deutliche Vorteile in Geschwindigkeit und Handhabung.

Abbildung 5
Messergebnis, darge-
stellt als Spiegelfehler
in Elevationsrichtung
in mrad

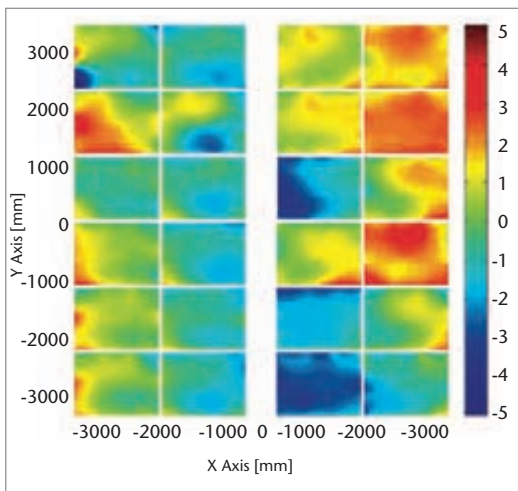
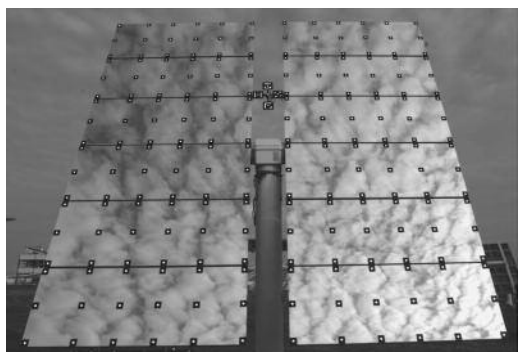


Abbildung 5 zeigt beispielhaft ein Messergebnis der Spiegelfehler eines Heliostaten in Elevationsrichtung. Neben dieser hochauflösenden Information der lokalen Steigungsfehler werden die individuellen Abweichungen der Facettenbrennweiten, der Facettenausrichtungen (Canting) und der Gesamtbrennweite im Programmablauf automatisch ermittelt und können dem Hersteller für entsprechende Korrekturmaßnahmen zur Verbesserung der optischen Qualität bereitgestellt werden. Für hohe Betriebssicherheit und Effizienz aufgebauter Heliostatenfelder wird eine ergänzende Messmethode entwickelt, die mit derselben Hardware größere Abweichungen in der Heliostat-Nachführung während des Betriebs automatisch überprüft.

Abbildung 6
Photogrammetrie-
Zielmarken auf
CESA-1-Heliostat



Zukunft in der Lage sein, innerhalb einer Nacht vollautomatisch mehrere hundert Heliostate zu vermessen. Die Methode basiert auf der Bilderkennung von im Heliostat reflektierten definierten Linienmustern und deren Verzerrungen. Den benutzten Messaufbau zeigt [Abbildung 3](#). Das System besteht aus einem Projektor im Feld, der bei Nacht eine Serie von kodierten Streifenmustern auf eine Fläche am Turm

Mit der beschriebenen Raster-Reflexions-Methode kann die Konzentratorform nur in einer bestimmten Position vermessen werden. Für den Betrieb und eine realitätsnahe Modellierung ist die Verformung unter Gravitation jedoch eine weitere wichtige Größe. Da diese Untersuchungen mit geringerer Auflösung und generell nur exemplarisch für einen Heliostattyp durchgeführt werden müssen, eignen sich dafür photogrammetrische Methoden [1]. Als Beispiel wurde ein Heliostat des CESA-1-Heliostatenfeldes auf der Plataforma Solar ausgewählt, mit reflektierenden Zielmarken beklebt ([Abbildung 6](#)) und mit einer Präzision von 0,3 mm vermessen. [Abbildung 7](#) zeigt die gemessene Verformung in Heliostaten-Normalenrichtung bei einer Bewegung des Heliostats von 90° (Zenit, Referenz) auf 10° .

Die genannten Methoden können analog auch für die Messung der Spiegelform von Parabolrinnen und Dish/Stirling-Systemen sowie für einzelne Spiegel unterschiedlicher Formate und Brennweiten eingesetzt werden und ergänzen damit die bisherigen Produkt-Kontrollen in der Fertigung.

Das Fraunhofer ISE konzentriert sich auf Material- und Komponentenentwicklung hauptsächlich zu linearen Fresnelkollektoren und hat in diesem Zusammenhang eine Reihe von Charakterisierungsverfahren aufgebaut.

Alterungstests

Bei den speziellen Cermet¹-Dünnschichtsystemen für Solarabsorber ist neben der spektralen Vermessung der Grenzwellenlänge, des thermischen Emissions- und des solaren Absorptionsgrades die Eignung für die hohen Einsatztemperaturen und die Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen (Witterung) entscheidend. Temperaturstabile Spiegelschichten werden für Sekundärkonzentratoren bei Fresnelkollektoren oder am Turm benötigt:

- Absorberschichten für Vakuumreceiver
- Luftstabile Hochtemperaturabsorber
- Vorderseitenspiegel für Sekundärkonzentratoren

Die Langzeitbeständigkeit bei verschiedensten Umwelteinflüssen ist ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit. In Klimaschränken und Außenbewitterungsaufbauten werden neue Entwicklungsprodukte überprüft und qualifiziert. Damit können ungeeignete Optionen ausgeschieden werden und relative Vergleiche zwischen verschiedenen Entwicklungslinien angestellt werden. Problematisch ist allerdings stets die Übertragung von Ergebnissen beschleunigter Alterung (mit erhöhten Belastungsfaktoren als in der Realität) auf das Langzeitverhalten unter realen Betriebsbedingungen. Hierzu sind meist Erfahrungen und Validierungsdaten aus Langzeitversuchen unter realen Bedingungen notwendig, die aber bei neuen Produkten naturgemäß nicht vorliegen können.

¹ Cermet sind schwarze Metall-/Metalloxidschichten

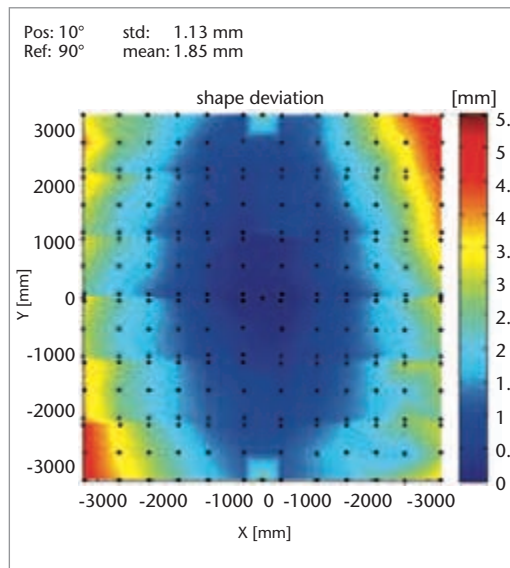


Abbildung 7
Verformung in Heliostaten-Normalenrichtung bei Änderung der Elevation von 90° auf 10°

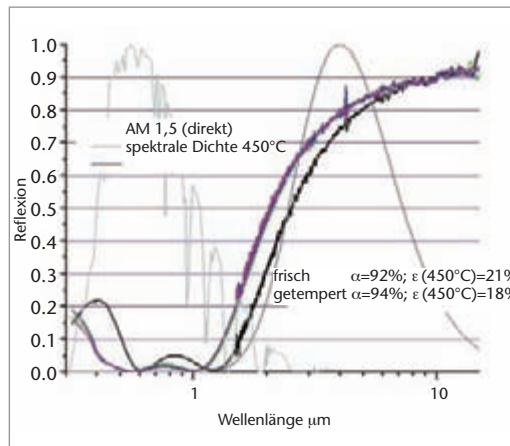


Abbildung 8
Verschiebung der spektralen Reflexion bei temperaturbehandelten Absorbieren für höhere Absorption und niedrigere Emission



Abbildung 9
Streifenreflektometrische Apparatur (ZEBRA)

Optische Charakterisierung von Spiegeln
Zur Charakterisierung von schmalen Spiegелеlementen von Fresnel-Kollektoren wurde am Fraunhofer ISE eine kompakte Messapparatur entwickelt, die mit der hochgenauen und flexiblen Methode der phasenmessenden Streifenreflexion die Formtreue eines kompletten

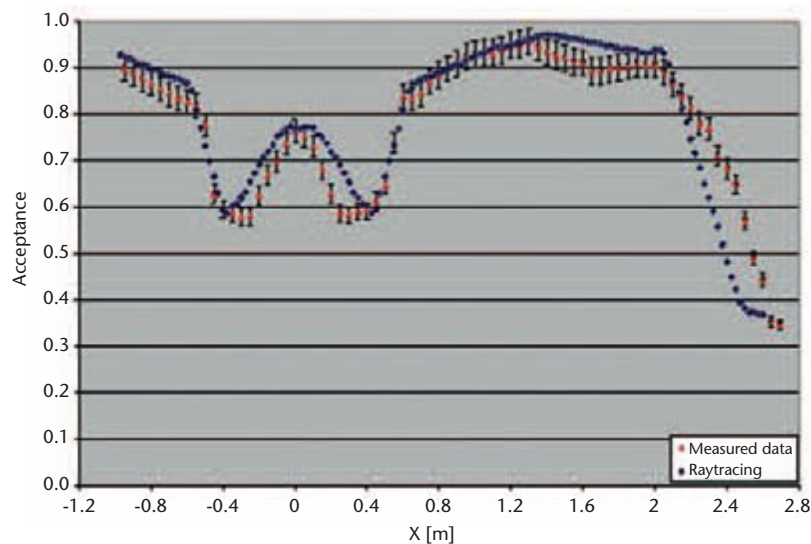
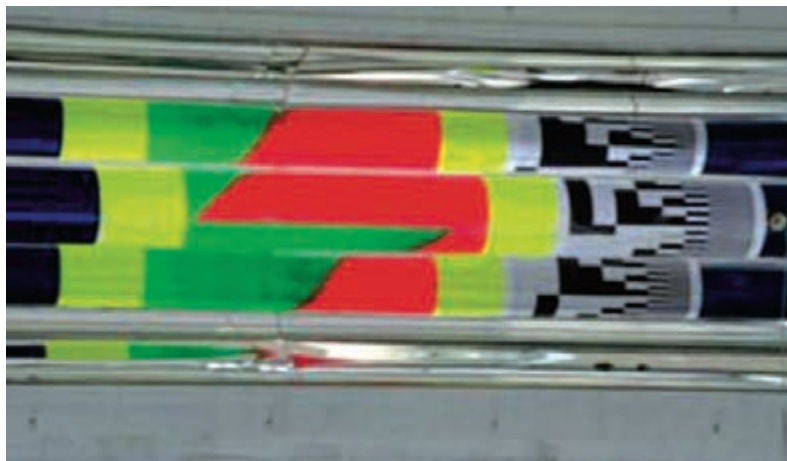
Primärspiegelmoduls parallel zur Produktion ermittelt (*Abbildung 9*). Zur Messung der optischen Qualität des Sekundärkonzentrators werden Bilder eines farblich kodierten Targets numerisch ausgewertet und daraus die Trefferquote der konzentrierten Sonnenstrahlung ermittelt (*Abbildung 10*).

Die vorgestellten Methoden zur Charakterisierung von Komponenten ermöglichen die Qualitätssicherung der am Fraunhofer ISE entwickelten Materialien und Komponenten sowohl im Labor als auch beim Aufbau solarer Kraftwerke.

Zusammenfassung

Die Effizienz konzentrierender solarthermischer Kraftwerke hängt stark von der geometrischen Präzision der Kollektoren, Komponenten und der Präzision der Nachführung ab. Enge Toleranzen stehen jedoch in Konkurrenz zu kostengünstigen Fertigungsverfahren. Im Metallbau können die millimetergenauen Anforderungen der dreidimensionalen Formtreue mit automatisierter optischer Messtechnik während der Montage geprüft werden. Für die Herstellung von Absorbern und Spiegeln wurden spektrale Charakterisierungsverfahren aus dem Labor auf die Produktionsanlagen angepasst. Die Langzeitbeständigkeit der Komponenten bei hohen Temperaturen wird aus Messungen ermittelt (*Abbildung 8*).

Abbildung 10
Identifikation
problematischer
Einfallswinkel aus der
Auswertung von Farb-
Targets



Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat die Arbeiten finanziell gefördert.

Literatur

- [1] Pottler, K.; Lüpfer, E.; Johnston, G.; Shortis, M.; Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components, *Journal of Solar Energy Engineering* 127 (2005), 94-101.

- [2] Pottler, K.; Röger, M.; Lüpfer, E.; Schiel, W.; Automatic Non-Contact Quality Inspection System for Industrial Parabolic Trough Assembly, 13th SolarPACES Int. Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technology, June 20-23, Sevilla, Spain, 2006.

- [3] S. Ulmer, M. Röger: Automatisierte hochaufgelöste Vermessung der Spiegelfehler von Heliostaten. 10. Kölner Sonnenkolloquium, 21. Juni 2007, DLR, Köln-Porz.