



Doctoral Thesis

Optical and thermal analyses of an air-based solar trough concentrating system

Author(s):

Bader, Roman

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006707450> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 19772

**OPTICAL AND THERMAL ANALYSES OF
AN AIR-BASED SOLAR TROUGH
CONCENTRATING SYSTEM**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
ROMAN BADER
MSc ETH ME
born June 28, 1983
citizen of Basel (BS)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Aldo Steinfeld, examiner
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal, co-examiner

2011

Abstract

An innovative concept for fabricating solar trough concentrators based on pneumatic polymer mirrors supported on precast concrete frames is presented. The 2-stage version of the concentrator uses circular-cylindrical primary mirrors in tandem with secondary mirrors to correct for optical aberration. An integral method is formulated and solved to derive the optimal secondary mirror shape for maximum solar flux concentration. The 1-stage version of the concentrator avoids the secondary mirrors by using a multilayer polymer mirror membrane to generate a multi-circular primary concentrator profile that approaches the trough parabolic shape. The integral design method is further applied to derive the profiles of trough concentrators that generate a pill-box radiative flux distribution on the target area, suitable for concentrated photovoltaics.

Analytical models of the statics of the membrane mirror construction, including the concrete support structure, are formulated for both 1-stage and 2-stage concentrators, and coupled to a Monte Carlo ray-tracing simulation. The models are experimentally validated with measurements on 45m-long prototype concentrator sections. The validated models are applied for design and optimization purposes, and to elucidate the concentrator's sensitivity to typical manufacturing and operational imperfections, such as reflective surface errors, deformations of the support structure due to gravity forces and tensile forces exerted by the membranes, errors of the mirror membrane widths, and membrane inflation pressure deviations.

The highest measured peak solar flux concentration at the focus of the 2-stage concentrator prototype is 55 (measured at 8.6° solar incidence angle), corresponding to 36% of the predicted value for the ideal concentrator of 151. Performance reducing factors were: 1) flat instead of ideally curved secondary mirrors, 2) average mirror reflectivity of 0.92, 3) attenuation of incoming solar radiation by the transparent envelope by 9 to 19% for solar incidence angles in the range of 0° to 60° , and 4) additional 10% attenuation due to dust on the transparent envelope. Highest measured peak solar flux

concentration at the focus of the 1-stage concentrator prototype is 18.9 (measured at 62.6° solar incidence angle), corresponding to 39% of the predicted value for the ideal concentrator of 47.9. The performance of the 1-stage prototype concentrator is reduced by: 1) transmission and reflection losses (same as in the case of the 2-stage concentrator), 2) errors of the widths of the intalled mirror membranes, and 3) inaccurate inflation pressures applied to the membranes.

A cylindrical cavity-receiver that uses air as the heat transfer fluid (HTF) is proposed for the concentrator. A numerical heat transfer model is developed to determine the receiver's absorption efficiency and pumping power requirement. The 2D energy equation, coupling radiative, convective, and conductive heat transfer is formulated, and solved with finite-volume techniques. The Monte Carlo ray-tracing and radiosity methods are applied to establish the solar radiation distribution and radiative exchange within the receiver. Experimental model validation is accomplished via comparison of measured and simulated receiver and air temperatures. Measurements are taken on a 42m-long full-scale prototype receiver section, installed on the prototype trough concentrator.

The performance of the prototype receiver is predicted with the validated heat transfer model. At summer solstice, solar noon, with HTF inlet temperature of 120°C, and HTF outlet temperature in the range of 250÷450°C, the predicted receiver absorption efficiency ranges from 45% to 29%. One third of the solar radiation incident on the prototype receiver is lost by spillage at the aperture and reflection inside the cavity. Main heat losses from the prototype receiver are by natural convection (9.9÷9.7% of solar power input) and reradiation (6.1÷17.6%) through the open cavity aperture, and by natural convection from the cavity insulation (5.6÷9.1%). The pressure drop in the HTF flow through the receiver is in the range of 4÷206 mbar, resulting in isentropic pumping power requirements of 27W÷16.3kW, corresponding to 0.01%÷5.8% of the solar power input.

Zusammenfassung

Ein innovatives Konzept zur Herstellung von Rinnen-Solarkonzentratoren wird vorgestellt, basierend auf pneumatischen Polymer-Spiegeln, die von Beton-Fertigbauteilgerüsten getragen werden. Die 2-stufige Variante des Konzentrators verwendet kreiszylindrische Primärspiegel in Kombination mit Sekundärspiegeln zur Korrektur der optischen Aberration. Eine Integrationsmethode wird formuliert und gelöst, zur Herleitung der optimalen Sekundärspiegelform für maximale Konzentration des solaren Strahlungsflusses. In der 1-stufigen Variante des Konzentrators werden die Sekundärspiegel vermieden, indem eine mehrschichtige Polymer-Spiegelmembran verwendet wird, welche ein mehrfach kreisförmig gekrümmtes Primärspiegelprofil erzeugt, das der Parabolrinnenform nahe kommt. Die integrale Designmethode wird zudem angewandt, um die Profile von Rinnen-Konzentratoren herzuleiten, welche auf der bestrahlten Oberfläche eine rechteckige Strahlungsflussverteilung erzeugen, geeignet für konzentrierende Photovoltaik.

Analytische Modelle der Statik der Membranspiegelkonstruktion, inklusive Beton-Tragwerk, werden sowohl für den 1-stufigen, wie auch für den 2-stufigen Konzentrator formuliert und mit einer Monte Carlo Strahlverfolgungssimulation verknüpft. Die Modelle werden anhand von Messungen an 45m langen Prototyp-Konzentratorabschnitten experimentell validiert. Die validierten Modelle werden zu Entwicklungs- und Optimierungszwecken verwendet, sowie zur Untersuchung der Empfindlichkeit des Konzentrators auf typische Herstellungs- und Betriebsfehler, wie Spiegeloberflächenfehler, Deformationen des Tragwerks aufgrund von Gravitationskräften und Zugkräften durch die gespannten Membranen, Fehler der Spiegelmembranbreiten und Abweichungen der Membran-Spanndrucke.

Die höchste gemessene Spitzenkonzentration des solaren Strahlungsflusses im Fokus des 2-stufigen Konzentrator-Prototyps beträgt 55, was 36% des berechneten Wertes für den idealen Konzentrator von 151

entspricht. Folgende Faktoren haben negativen Einfluss auf die Messergebnisse: 1) planare anstelle von ideal gekrümmten Sekundärspiegeln, 2) mittlere Spiegelreflektivität von 0,92, 3) Abschwächung der einfallenden Solarstrahlung durch die transparente Hülle um 9 bis 19% für solare Einfallswinkel im Bereich von 0 bis 60°; and 4) zusätzliche 10% Abschwächung der Solarstrahlung durch Staub auf der transparenten Hülle. Die höchste gemessene Spitzenkonzentration des solaren Strahlungsflusses des 1-stufigen Konzentrador-Prototyps beträgt 18,9 (gemessen bei einem solaren Einfallswinkel von 62,6°), was 39% des berechneten Wertes für den idealen Konzentrador von 47,9 entspricht. Die Messergebnisse für den 1-stufigen Konzentrador- Prototypen werden vermindert durch: 1) Transmissions- und Reflektionsverluste (wie im Fall des 2-stufigen Konzentradors), 2) fehlerhafte Breiten der installierten Spiegelmembranen und 3) Anwendung von fehlerhaften Membran-Spanndrücken.

Ein zylindrischer Hohlraum-Strahlungsempfänger (im Folgenden nur „Empfänger“ genannt), welcher Luft als Wärmeübertragungsfluid (HTF) verwendet, wird für den Konzentrador vorgeschlagen. Ein numerisches Wärmeübergangsmodell wird erstellt, um die Absorptionseffizienz und die benötigte Pumpleistung des Empfängers zu bestimmen. Die 2D-Energiegleichung, welche Wärmeübertragung durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung verknüpft, wird formuliert und mit Finite-Volumen-Methoden gelöst. Die Monte Carlo Strahlverfolgungsmethode und die Radiosity-Methode werden angewandt, um die Verteilung der Solarstrahlung und den Strahlungsaustausch im Empfänger zu ermitteln. Experimentelle Modellvalidierung erfolgt durch Vergleich gemessener und simulierter Empfänger- und Lufttemperaturen. Messungen werden an einem 42m-langen original-massstäblichen Prototyp-Empfänger vorgenommen, welcher auf dem Rinnen-Konzentrador-Prototypen installiert ist.

Die Effizienz des Prototyp-Empfängers wird mittels validierten Wärmeübergangsmodells berechnet. Zur Sommersonnenwende, mit der Sonne im Zenith, mit 120°C HTF-Eingangstemperatur und mit HTF-Ausgangstemperatur im Bereich 250÷450°C, liegt die berechnete Absorptionseffizienz des Empfängers zwischen 45% und 29%. Ein Drittel

der auf den Empfänger einfallenden Solarstrahlung verfehlt die Empfänger-Öffnung, oder geht durch Reflexionen im Empfänger verloren. Die grössten Wärmeverluste des Empfängers entstehen durch natürliche Konvektion ($9.9 \div 9.7\%$ der einfallenden Solarenergie) und Rückstrahlung ($6.1 \div 17.6\%$) durch die Hohlraum-Öffnung, sowie durch natürliche Konvektion an der Hohlraum-Isolation ($5.6 \div 9.1\%$). Der Druckverlust in der HTF-Strömung durch den Empfänger liegt im Bereich $4 \div 206$ mbar und erfordert eine isentrope Pumpleistung von $27 \text{ W} \div 16.3 \text{ kW}$, was $0.01\% \div 5.8\%$ der einfallenden Solarenergie entspricht.