

Horizontale Fresnel-Kollektoren für den Einsatz in Solarthermischen Kraftwerken

*Dipl.-Ing. Max Mertins¹, Dipl.-Phys. Hansjörg Lerchenmüller¹,
Dr. Christof Wittwer¹, Dr. Andreas Häberle²*

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr.2, 79110 Freiburg

² PSE GmbH, Christaweg 40, 79114 Freiburg

max.mertins@ise.fhg.de; Internet: <http://www.ise.fhg.de>

Abstract

The self-sustaining coverage of the huge and steadily increasing world energy-demand is one of the main tasks in the near future. A large contribution could be afforded by solar thermal power plants in sun-belt countries. This renewable energy technology can reach electricity costs below 15 €/kWh depending on scale and location. A new line focussing collector based on the fresnel-principle was developed by the Belgian company Solarmundo, which is very promising to lead to lower LEC.

Einführung

Um den großen und zudem wachsenden Weltenergiebedarf in größerem Umfang durch erneuerbare Energien decken zu können, sind neben dezentralen Systemen auch großtechnische Anlagen zur Stromerzeugung unverzichtbar. Hierbei können solarthermische Kraftwerke einen wichtigen Beitrag leisten.

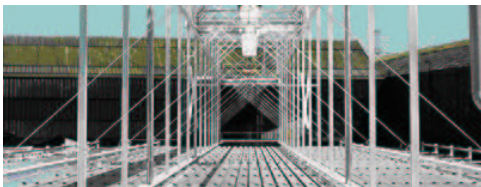


Abbildung 1: Prototyp des Solarmundo Kollektors in Liege (Belgien)

Um eine schnelle Markteinführung zu ermöglichen, sind neben politischen Rahmenbedingungen auch technologische Weiterentwicklungen notwendig, um die Stromgestehungskosten in die Zone der Wirtschaftlichkeit absenken zu können, so dass diese mit konventionellen Kraftwerken konkurrieren können. Während die Photovoltaik jetzt schon ihre Stärke bei kleineren dezentralen Einheiten entfalten kann, werden solarthermische Kraftwerke im Megawatt-Bereich attraktiv. Bei diesen Solarenergie-Systemen handelt es sich im Grunde um konventionelle Kraftwerkstechnik, bei denen allerdings der Brennstoff zur Befuerung des Dampfkreislaufes durch die Solarstrahlung substituiert wird. Zur Konzentration und damit Erreichung hoher Prozesstemperaturen werden

Um eine schnelle Markteinführung zu ermöglichen, sind neben politischen Rahmenbedingungen auch technologische Weiterentwicklungen notwendig, um die Stromgestehungskosten in die Zone der Wirtschaftlichkeit absenken zu können, so dass diese mit konventionellen Kraftwerken konkurrieren können. Während die Photovoltaik jetzt schon ihre

verschiedene Technologien verfolgt. Neben punktfokussierenden Turmkraftwerken sind Fresnel-Kollektoren als Variante der linienfokussierenden Parabolrinnen eine vielversprechende Alternative. In Kalifornien beweisen Parabolrinnenfelder mit einer installierten Kraftwerksleistung von 354MW schon seit mehr als einem Jahrzehnt die Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit solarthermischer Kraftwerke. Im Rahmen der BMU Förderung "Hochtemperatur Solarthermische Stromerzeugung" wird von Fraunhofer ISE, dem DLR und der E.ON Energie AG ein Fresnel-Konzept, welches in jüngster Zeit von der Firma Solarmundo vorgeschlagen wurde, auf sein Kostensenkungspotential und seine Machbarkeit untersucht.

Prinzip

Beim Fresnel-Kollektor handelt es sich um ein linienfokussierendes System, bei dem mehrere Spiegelstreifen je nach Sonnenposition ihre Neigung ändern und die Solarstrahlung auf ein feststehendes Absorberrohr lenken (Abbildung 2). Die Aufteilung in schmale Spiegelsegmente ermöglicht den Verzicht auf gekrümmtes Glas und eine Verringerung von Windlasten, wodurch auch die Nachführeinheiten vereinfacht werden können, und pro Absorberrohr eine wesentlich größere Aperturfläche installiert werden kann.

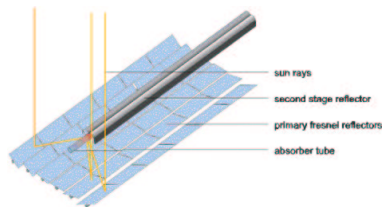


Abbildung 2: Prinzip des Solarmundo Kollektors

Durch die damit einhergehende hohe Modularität können weitere Kosten gesenkt werden. Das durch einen Sekundär-Reflektor, der auch als Wärmeisolierung dient, abgedeckte Absorberrohr kommt ohne Vakuumisolierung aus und vermeidet dadurch aufwendige Stahl-Glas-Verbindungen, welche bruchanfällig sind und einen höheren Wärmeverlust aufweisen. Das bis zu einer Länge von 1000m durchgehende Absorberrohr benötigt nur eine sich am Ende befindende Ausdehnungsvorrichtung. Der

Frischdampf für die Turbine wird ohne einen zwischengeschalteten Thermoöl-Kreislauf direkt im Absorber erzeugt und ermöglicht die Einsparung von Systemkomponenten und die Erreichung höherer Temperaturen. Ein Großteil der Energie wird bei konstanter Verdampfungstemperatur eingekoppelt, wodurch die mittlere Temperatur niedriger ist und Wärmeverluste geringer ausfallen.

Optische Eigenschaften

Während bei der vergleichbaren Parabolrinne das gesamte System einachsigt dem Sonnenstand nachgeführt wird, kommt es durch das Fresnelprinzip über den Tag zu variierender Neigung der einzelnen Spiegelstreifen zueinander, was im Wesentlichen zu folgenden Verlustmechanismen führt (Abbildung 3).

- Durch die unterschiedlichen Einfallswinkel auf die Spiegel kommt es zu Cosinus-Verlusten an den einzelnen Spiegeln.
- Ab einem bestimmten Sonnenstand kommt es zur partiellen Eigenverschattung von Nachbarspiegeln (shading).
- Bei starker Neigung kann es für außenliegende Spiegel zu einer partiellen Verdeckung der Nachbarspiegel kommen (blocking).

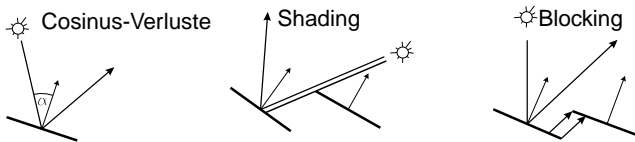


Abbildung 3: Verlustmechanismen

In Abbildung 4 sind die Auswirkungen der Verluste für einen variierenden Höhenwinkel θ_t dargestellt. θ_t ist die Projektion des Sonnenhöhenwinkels θ_z in die Transversal-Ebene, welche senkrecht zum Absorberrohr definiert ist.

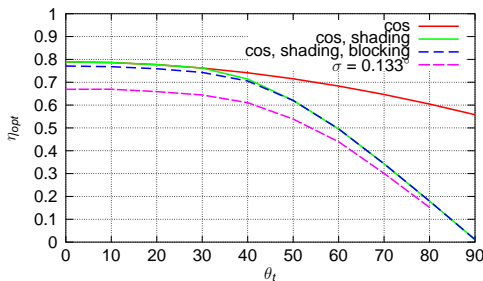


Abbildung 4: Optischer Wirkungsgrad

Ab einem Winkel von etwa 30° kommt es verstärkt zur Eigenverschattung, während das gegenseitige Verdecken nur leicht bei steileren Winkeln festzustellen ist. Diese Effekte hängen stark von der geometrischen Konfiguration des Systems ab. Durch eine Erhöhung des Absorberrohres und das Auseinanderziehen der Einzelspiegel können diese Verluste vermindert werden. Allerdings verringert bei wachsendem Abstand von Spiegel und Absorber die Divergenz der

Sonnenstrahlung und die einzukalkulierenden Ausrichtungs- und Abbildungsfehler der Spiegel und der Nachführeinheit den Anteil der Strahlung, der tatsächlich am Absorberrohr in thermische Energie umgesetzt wird. In Abbildung 4 ist dieser Effekt für einen Fehler von $\sigma = 0.133^\circ$ dargestellt. Dabei wurde die Strahldichteverteilung der Sonne sowie die Eigenverschattung durch den Secondstage-Reflektor berücksichtigt. Die Optimierung der geometrischen Konfiguration ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

¹99% der Abweichungen von der Idealform und Idealausrichtung liegen innerhalb von $\pm 0.4^\circ$

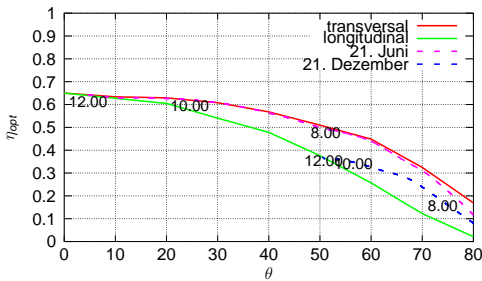


Abbildung 5: Transversal und Longitudinal mit Tagesgang Hurghada (geogr. Breite 27.14° geogr. Länge -33.51°)

In Abbildung 5 ist der bei den Ertragsberechnungen verwendete Verlauf des optischen Wirkungsgrades für die transversal und longitudinal Ebene gezeigt. Für den Standort Hurghada (Ägypten) ist der Tagesverlauf eines in Nord-Süd-Ausrichtung stehenden Kollektor für zwei Tage eingezeichnet. Deutlich zu sehen ist die schlechtere durch flachere Einstrahlwinkel verursachte optische Leistung im Dezember, während im Juni durch die hohen Sonnenstände erwartungsgemäß

die Solarstrahlung am effektivsten genutzt werden kann. Da sich die eigentliche Apertur des Kollektors während des Tages ändert, wird als Bezugsgröße die Spiegelfläche definiert.

Thermische Eigenschaften

Ein wesentlicher Vorteil von konzentrierenden Systemen ist die verringerte Absorptionsfläche, so dass selbst bei hohen Temperaturen noch gute thermische Wirkungsgrade erzielt werden können.

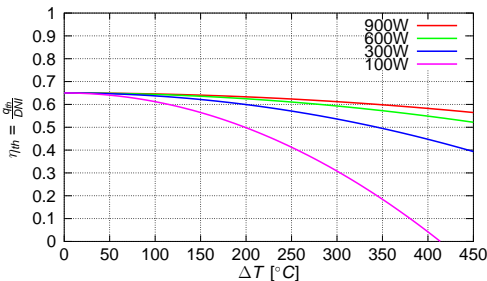


Abbildung 6: Thermischer Wirkungsgrad zeigen eine gute Übereinstimmung mit Wärmeverlustmessungen der Firma Solarmundo. Die relativ einfache Wärmesolierung durch den gedämmten Secondstage-Reflektor und die Glasscheibe an der Unterseite erreicht gute Ergebnisse.

In Abbildung 6 ist der thermische Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz und der Einstrahlung gezeigt. Die Werte wurden durch CFD-Simulationen, welche den Konvektions- und Strahlungswärmeverlust berücksichtigen, für unterschiedliche Betriebstemperaturen ermittelt. Für die selektive Schicht des Absorberrohres wurde von einer Emission von 0.08 bei einer Absorption von 0.95 ausgegangen. Die Rechnungen

Prozesswärmeerzeugung

Der Fresnelkollektor bietet sich zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme an und eignet sich damit auch zur Stromerzeugung in einem konventionellen Clausius-Rankine-Kreislauf. Hier kann er direkt die Rolle des Verdampfers einnehmen. Ist wie für die Stromerzeugung eine Verdampfung erforderlich, erfolgt diese in drei Abschnitten. Eine Vorwärmstrecke bringt das Wasser aus dem Speisewasserbehälter auf Siedetemperatur. In dem Verdampfungsabschnitt erfolgt die Verdampfung bis zu einem Dampfmassengehalt von etwa 0.95. Das abgeschiedene Wasser wird rezirkuliert, während der Dampf in dem Überhitzerabschnitt auf den gewünschten Frischdampfzustand gebracht wird.

Tabelle 1: Wärmekosten

		Faro	Hurghada
DNI	kWh/m ²	2247	2784
Absorbierte Strahlung	kWh/m ²	948.9	1290
Kollektorfläche	m ²	40000	40000
Spez. Kollektorkosten	€/m ²	225	180
Laufzeit	25a		
Zinsfuß	8%		
Versicherung	1%		
Unterhalt	2%		
Jährliche Kosten	T€	1113.0	890.4
100°C → 400°C 60bar			
thermischer Ertrag	kWh/m ²	788.0	1128.5
Wärmekosten	€/ct/kWh	3.5	2.0
30°C → 200°C 16bar			
thermischer Ertrag	kWh/m ²	929.0	1271.2
Wärmekosten	€/ct/kWh	3.0	1.8

Mit der am Fraunhofer ISE entwickelten Simulationsumgebung *ColSim* wurden für die Standorte Faro (Portugal) und Hurghada (Ägypten) Wärmenertragsberechnungen für zwei Temperaturniveaus durchgeführt. Auf Grundlage von Kostenangaben der Firma Solarmundo wurden die Gesteungskosten ermittelt (Tabelle 1). Nach Angaben der Firma Solarmundo sollen die Kollektorkosten für große Kraftwerkssolarfelder um 400.000 m² mittelfristig bei

150 €/m² in Europa bzw. 120 €/m² in Entwicklungsländern liegen. Für kleinere Solarfelder um 40.000 m², die für Prozesswärmeanwendungen interessant sein könnten, muss von höheren Kosten ausgegangen werden, die sicherlich einen Faktor 1,5 über den oben genannten Werten liegen.

Das Fresnel-Konzept bietet also eine kostengünstige Möglichkeit in großem Maßstab Wärme für Industrielle Prozesse bereitzustellen. Verglichen mit einer konventionellen Feuerungsanlage liegen bei einem Ölpreis von 30€/Barrel alleine die Brennstoffpreise bei 2€/ct/kWh. Damit wäre die solare Wärmeerzeugung schon bei dieser relativ kleinen Solarfeldgröße in sonnenreichen Ländern gegenüber Öl Konkurrenzfähig.

Literatur:

SPC02: Häberle A., Zahler C., Lerchenmüller H., Mertins M., Wittwer C., Trieb F. Dersch J.: SolarPACES 2002; The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical Performance and cost calculations

WIT: C. Wittwer. ColSim - Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen. Dissertation Universität Karlsruhe (TH) 1999. <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de>, <http://www.colsim.de>