

Betriebsoptimierung von Turmkraftwerken: Optimierung der Heliostatzielpunkte unter Berücksichtigung des thermischen Receiververhaltens

Daniel Maldonado Quinto*, Nils Ahlbrink, Boris Belhomme

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln

Kurzzusammenfassung

Im Bereich der Solarforschung des DLR in Köln werden zur Analyse und Optimierung von solarthermischen Turmkraftwerken Softwarewerkzeuge entwickelt. Eine wichtige Optimierungsfrage ist die Wahl der Heliostatzielpunkte auf dem Receiver. Anhand von realistischen Simulationsszenarien wird der Einfluss der Zielpunktkonfiguration auf das Leistungsverhalten eines offenen volumetrischen Receivers untersucht.

1 Einführung und Ziele

Solarturmkraftwerke gelten als vielversprechende Kraftwerkstechnologie für eine zukünftige regenerative Energieversorgung. Der Receiver kann dabei als offener volumetrischer Luftreceiver ausgeführt sein^{[1] [2] [3]}. Bei diesem Konzept trifft die vom Heliostatfeld konzentrierte Solarstrahlung auf sogenannte volumetrische Strukturen und wird dort absorbiert. Als Wärmeträgerfluid dient Umgebungsluft. Zur Etablierung und Weiterentwicklung der Turmkraftwerkstechnologie wurden bisher hauptsächlich konstruktive Fragestellungen untersucht, z.B. der Einfluss verschiedener Heliostattypen oder auch unterschiedliche Receiverkonzepte auf den Jahresenergieertrag. Mit dem Aufbau erster kommerzieller Kraftwerke stellt sich die Frage nach einer optimalen Betriebsweise. Eine wichtige Optimierungsfrage ist die Wahl der Zielpunkte auf der Receiveroberfläche. Jedem Heliostat kann ein der Sonnenposition und dem aktuellen Zustand des Receivers angepasster Zielpunkt zugeordnet werden, der einen wichtigen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Receivers hat.

Mit den am DLR entwickelten Softwarewerkzeugen wird das Optimierungspotential bezüglich der Zielpunktkonfiguration für einen offenen volumetrischen Receiver untersucht. Für den Turmkraftwerksbetrieb werden eine bestimmte Anzahl fester Zielpunkte auf der Absorberfläche festgelegt. Eine Zielpunktkonfiguration ist die Ausrichtung der einzelnen Heliostate auf einen dieser Punkte. Sie hat damit einen direkten Einfluss auf die Flussdichteverteilung auf der Receiveroberfläche und die Qualitätsgröße. Ziel der Optimierung ist die Ermittlung einer Zielpunktkonfiguration die das Maximum einer Qualitätsgröße liefert. Als Qualitätsgröße wird im ersten Schritt die Interceptleistung und anschließend die thermische Ausgangsleistung in Form des Receivermassenstroms herangezogen.

Die optimale Zielpunktkonfiguration wird mit Hilfe des Ameisenalgorithmus^[4] gefunden. Dieser kombinatorische Optimierungsalgorithmus ist in die Strahlverfolgungs-Software STRAL^[5] integriert und simuliert das als Schwarmintelligenz bezeichnete Verhalten von Ameisen bei der Futtersuche. Ein an STRAL angebundenes Receivermodell eines offenen volumetrischen Receivers^[6] liefert für den Optimierungsprozess die Qualitätsgröße.

2 Resultate

Das Optimierungspotential wird mit Hilfe eines realistischen Simulationsszenarios untersucht^[7]. Das Heliostatenfeld besteht dabei aus 2411 Heliostaten. Jeder Heliostat besitzt vier flache Facetten und eine Spiegelfläche von 10,4m². Der zylinderförmige Receiver hat einen Öffnungswinkel von 54° und eine Abwicklungsfläche von 36,4m². Auf dem Receiver sind 54 mögliche Zielpunkte positioniert.

Um die Ergebnisse der Optimierung bewerten zu können, ist ein Referenzfall nötig. Dieser ist eine auf Expertenwissen basierende manuell gewählte Zielpunktkonfiguration die in *Abbildung 1* gezeigt ist. Im ersten Schritt wird eine Interceptoptimierung durchgeführt, wobei eine Restriktion für die Flussdichte von 1000W/m² eingehalten wird. Eine aus Sicherheitsgründen einzuhaltende Maximaltemperatur kann während der Optimierung in dieser Variante nicht überwacht werden. Nur die letzte, aus der Optimierung gewonnene, Zielpunktkonfiguration wird dazu verwendet die thermische Leistung und die auftretenden Temperaturen im Receiver zu berechnen. In diesem Berechnungsschritt wird der Kühlluftmassenstrom so gewählt, dass die Temperaturgrenzen an den Receiverkomponenten eingehalten werden.

* Korrespondenzautor: Tel.: +492203-601 3004, Fax: +492203-601 4141, E-mail: Daniel.MaldonadoQuinto@dlr.de

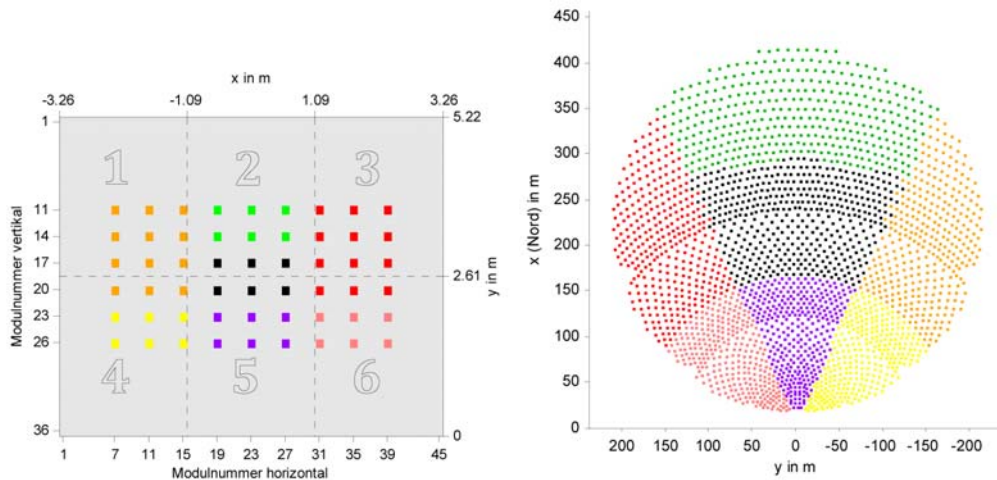


Abbildung 1: Zielpunkte auf der Receiveroberfläche und Heliostatfeld mit manueller Zielpunktconfiguration. Der Receiver besteht aus sechs Subreceivern, die mit unterschiedlichen Luftmassenströmen betrieben werden können

In der zweiten Optimierungsvariante wird die thermische Austrittsleistung des Receivers als Qualitätsgröße gewählt. In jedem Optimierungsschritt wird das thermische Verhalten berechnet, was mit einem erhöhten Rechenaufwand verbunden ist. Der Receiver besteht aus mehreren Subreceivern die mit unterschiedlichen Luftmassenströmen betrieben werden können. Für jede feste Zielpunktconfiguration kann die Receiverleistung durch Veränderung der Luftmassenstromaufteilung variiert werden. Während der Optimierung wird mit Hilfe der Dynamischen Programmierung^[8] die Luftmassenstromaufteilung so gewählt, dass für die aktuelle Zielpunktconfiguration die maximale Austrittsleistung erreicht wird. Anstelle der Flussdichtebegrenzung wird jetzt die Maximaltemperatur überwacht.

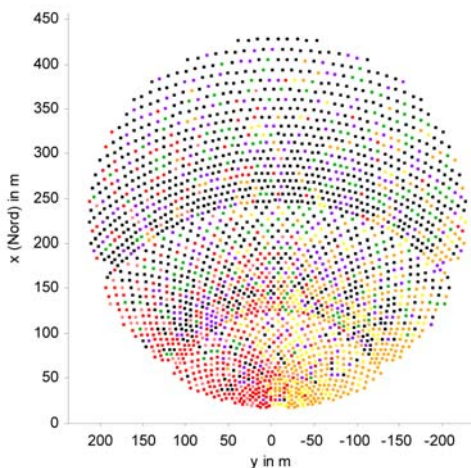


Abbildung 2: Interceptoptimierte Zielpunktconfiguration

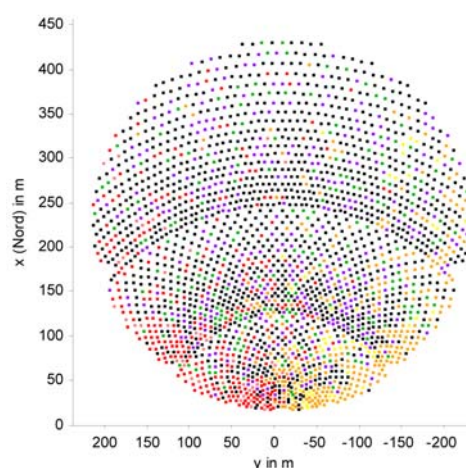


Abbildung 3: Zielpunktconfiguration unter Berücksichtigung des thermischen Receiververhaltens

Die Zielpunktconfigurationen wurden für den 21. März zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststands optimiert. Im Vergleich zum Referenzfall, lässt sich durch eine Interceptoptimierung die Receiverleistung um 11.3% und unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens des Receivers um 13.6% steigern.

3 Diskussion

Die Zielpunktconfigurationen zeigen, dass der Optimierungsalgorithmus eine grobe Unterteilung in radialer und aus Sicht des Receivers in azimuthaler Richtung vornimmt. Die Unterteilung ist nicht so stark abgegrenzt wie die manuelle Configuration. Receivernahe Heliostaten werden im interceptoptimierten Fall ausschließlich auf die äußeren Zielpunkte gerichtet. Selbst die Heliostaten auf der Nord-Achse, für die die mittleren Zielpunkte einen besseren Intercept liefern würden, werden auf die äußeren Zielpunkte gerichtet. Folglich können mehr Heliostaten aus dem receiverfernen Feld die mittleren Zielpunkte verwenden, ohne die Flussdichtegrenze in diesem

Bereich zu überschreiten. Die zweite Optimierungsvariante richtet zusätzlich die receivernahen Heliostaten, die in der Nähe der Nord-Achse aufgestellt sind, auf die Mitte aus.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Optimierungsergebnisse zeigen, dass die Receiverleistung durch die ermittelten Zielpunktkonfigurationen erheblich gesteigert werden kann. Mit Hilfe der Strahlverfolgungs-Software STRAL, dem integrierten Optimierungsalgorithmus (Ameisenalgorithmus) und dem angebundenem Receivermodell kann durch eine Intercept-optimierung, die geringen Rechenaufwand bedarf, der Wirkungsgrad des Solarteils gesteigert werden. Das Verbesserungspotential kann erst vollständig durch die Berücksichtigung des thermischen Verhaltens ausgenutzt werden.

Mit der Untersuchung eines ganzen Betriebsjahres mit Hilfe von stündlich aufgelösten Wetterdaten können Ertragssteigerungen und der Einfluss einer Zielpunktoptimierung auf die Stromgestehungskosten ermittelt werden. Die gewonnenen Daten können in einem weiteren Schritt zur Ausarbeitung von Zielpunktstrategien und als Richtwerte für Kraftwerksbetreiber dienen. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist eine Online-Optimierung, die eine Berechnung der optimalen Heliostatausrichtung während des Kraftwerksbetriebs beinhaltet.

Literatur

[1] Hoffschmidt, B.; Schwarzbözl, P.; Fernández V.; Koll, G., Design of the PS 10 Solar Tower Plant, in: Proceedings of ISES Solar World Congress, 2003, Solar Energy for Sustainable Future, Göteborg, Sweden.

[2] Hoffschmidt, B.; Dibowski, G.; Beuter, M.; Fernandez, V.; Téllez, F.; Stobbe P., Test Results of a 3 MW Solar Open Volumetric Receiver, in: Proceedings of ISES Solar World Congress, 2003, Solar Energy for Sustainable Future, Göteborg, Sweden.

[3] Hennecke, K.; Schwarzbözl, P.; Alexopoulos, S.; Hoffschmidt, B.; Göttsche, J.; Koll, G.; Beuter, M.; Hartz, T., Solar Power Tower Jülich – The First Test and Demonstration Plant for Open Volumetric Receiver Technology in Germany, in: Proceedings of the 14th Biennial CSP SolarPACES Symposium, 2008, Las Vegas, USA.

[4] Belhomme, B., Bewertung und Optimierung von Zielpunktstrategien für solare Turmkraftwerke, 2010, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

[5] Belhomme, B.; Pitz-Paal, R.; Schwarzbözl, P.; Ulmer, S.; A New Fast Raytracing Tool for High-Precision Simulation of Heliostat Fields, in: Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 131, 2009.

[6] Ahlbrink, N.; Belhomme, B.; Pitz-Paal, R., Modelling and Simulation of a Solar Tower Power Plant with Open Volumetric Air Receiver, in: Proceedings of 7th Modelica Conference.

[7] Maldonado Quinto, D., Zielpunktoptimierung unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens eines offenen volumetrischen Receivers, 2010, Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

[8] Ahlbrink, N.; Andersson, J.; Diehl, M.; Maldonado Quinto, D.; Pitz-Paal, R., Optimized Operation of an Volumetric Air Receiver, in: Proceedings of the 16th SolarPACES Symposium, 2010, Perpignan, France.