

Bevor es zu heiß wird

Es gibt Solarwärmekraftwerke, die andere Mechanismen als die Photovoltaik verwenden, um die Sonnenenergie in elektrische Energie umzuwandeln. Mitte 2011 hat die DLR eine solche Anlage von den Stadtwerken Jülich übernommen und betreibt dort nun intensive Forschung für die Entwicklung neuer Komponenten und Verfahren. Neben realen Tests in einem anwendungsnahen Maßstab nutzen die Forscher in ihrer Arbeit auch numerische Simulationen.

Von Olena Smirnova, Thomas Fend, Peter Schwarzbözl, Daniel Schöllgen

Das Solarturmkraftwerk in Jülich verfügt über mehr als 2.000 zweiachsig der Sonne nachgeführte Spiegel, die das Sonnenlicht auf einen Solar-Receiver am oberen Ende des Turms reflektieren. Dieser volumetrische Solar-Receiver stellt das zentrale Element der so genannten Solarturmtechnologie dar, die gebündelte Sonnenstrahlung in Wärme umwandelt. Der Receiver besteht aus porösen keramischen Elementen, die von Umgebungsluft durchströmt werden. Mit der heißen Luft wird Wasserdampf erzeugt, der dann über eine Turbine und einen Generator in Strom umgewandelt wird. Die porösen keramischen Materialien im Receiver sind sehr hohen Temperaturen ausgesetzt. Daher ist es für den sicheren Betrieb einer solchen Anlage wichtig, Überhitzungen und damit verbundene Beschädigungen der Komponenten zu vermeiden.

Aufgrund der wachsenden Bedeutung der Solarturmtechnologie wurden in den letzten Jahren intensiv theoretische und experimentelle Forschungen zu den Eigenschaften des offenen volumetrischen Solar-Receiver betrieben. Die numerische Berechnung dieses Prozesses erfährt

zunehmend Beachtung, da praktische Probleme wie die Überhitzung des Receivers eingeschätzt und mögliche Lösungen gefunden werden können, ohne dabei das Produkt selbst oder Prototypen testen zu müssen.

Simulation mit experimentellen Daten

In einem Projekt der DLR Köln, Institut für technische Thermodynamik, wurden die Strömungen und der Wärmetransport in einer porösen Siliziumcarbit-Wabenstruktur am Beispiel eines Solar-Druckbehälters simuliert. In dieser Anwendung werden die porösen Materialien einer gebündelten Solarstrahlung ausgesetzt, bei der Wärmestromdichten von bis zu 1.000 Megawatt pro Quadratmeter erreicht werden. Gleichzeitig strömt Luft durch das Material und wird dabei auf Temperaturen von etwa 800 Grad Celsius erhitzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen beschreiben das resultierende Temperaturfeld im Receiver. Für die Simulation werden Parameter wie Durchlässigkeit (Permeabilität), Wärmeleitfähigkeit und volumetrische konvektive Wärmeübertragung benötigt, die experimentell bestimmt wurden. Für die Simulationen kam die Entwicklungsumgebung COMSOL

Multiphysics zum Einsatz. Die Software, deren besondere Stärke es ist, die Eigenschaft gekoppelter Phänomene zu berechnen, ist ein Werkzeug für die Modellierung und Simulation physikalisch basierter Systeme. Das Programm gründet auf der Finite-Elemente-Methode und wird sowohl in industrieller und akademischer Forschung und Entwicklung als auch in der Lehre eingesetzt.

Modellaufbau

Die numerische Berechnung der Strömung sowie der Wärmeleitung im volumetrischen Solar-Receiver wurde mit zwei unabhängigen Simulationsmodellen durchgeführt:

1. Einzelkanalmodell: Dies ermöglicht die Auswahl einer optimalen Receiver-Geometrie, indem die Effizienz des Receivers bei unterschiedlichen Verhältnissen zwischen Kanalgröße und Wanddicke verglichen wird.
1. Homogenes Modell: Dieses Modell betrachtet den Receiver als ein poröses Festkörper-Kontinuum mit effektiver Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmetransporteigenschaften.

Für beide Berechnungsaufgaben wurden die Prozesse der Strömung und des Wärmetransports stationär betrachtet. Folgende Interfaces von COMSOL kamen zum Einsatz:

1. Schwach kompressible Strömung (Navier-Stokes)
2. Konvektion und Wärmeleitung in der Luft
3. Wärmeleitung im Festkörper

Der Einsatz von zwei Wärmetransport-Interfaces ermöglichte es, die Temperaturverteilungen sowohl im Festkörper als auch in der Luft unabhängig voneinander zu ermitteln.

Sowohl die Geometrie des einkanaligen als auch die des homogenen Modells ist vollständig symmetrisch. Deshalb wurde der Einfachheit halber nur ein Viertel des zu betrachtenden Volumens definiert. Die 3D-Geometrie des einkanaligen Modells wurde in COMSOL erstellt. Für die Zeichnung der 3D-Geometrie des homogenen Modells wurde Autodesk Inventor verwendet.

Der volumetrische Receiver wurde als poröses Kontinuum mit festgelegten Makroeigenschaften wie Porosität und Permeabilität betrachtet. Das Modell umfasst die

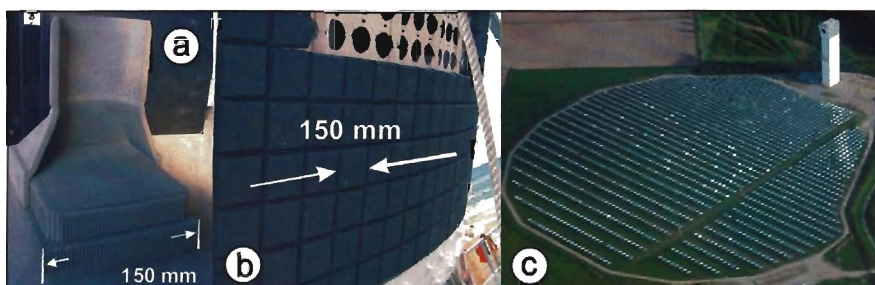


Bild 1: a) Einzelnes Absorbermodul, (b) installierte Absorbermodule, (c) Versuchskraftwerk in Jülich, der so genannte „Solarturm Jülich“.

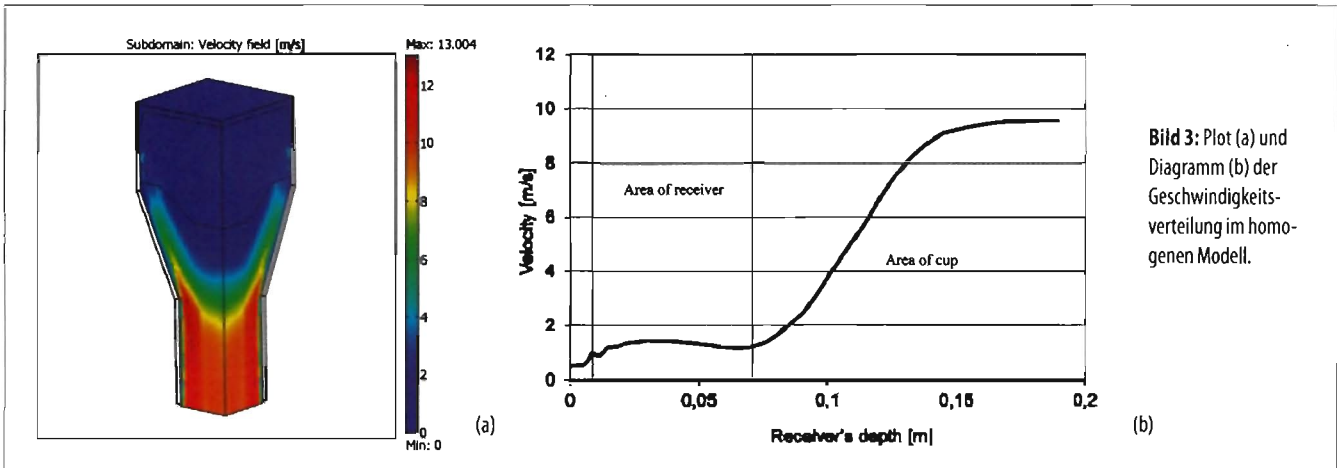


Bild 3: Plot (a) und Diagramm (b) der Geschwindigkeitsverteilung im homogenen Modell.

Wärmeübertragung von der erhitzten Oberfläche des Festkörpers auf die Luft unter Berücksichtigung des volumetrischen Wärmeübertragungskoeffizienten – eine Größe, die experimentell ermittelt werden muss. Die absorbierte gebündelte Solarstrahlung wurde in diesem Modell als volumetrische Wärmequelle angenommen. Für das Modell wurde eine adaptive Vernetzung mit verschiedenen Vernetzungsschritten für jeden Bereich verwendet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der COMSOL-Simulation zeigen die detaillierte Temperaturverteilung und die Geschwindigkeitsfelder innerhalb beider numerischer Ansätze.

Beim einkanaligen Modell erwies sich bei der Entwicklung der Lufttemperatur in der Mitte des Kanals, dass bei einer Tiefe von ungefähr 25 Millimetern vom Kanaleingang die Temperatur des Festkörpers und der Luft gleiche Werte erreichen. Die Temperaturverteilung der Luft innerhalb des einzelnen Kanals ist in Bild 2 dargestellt.

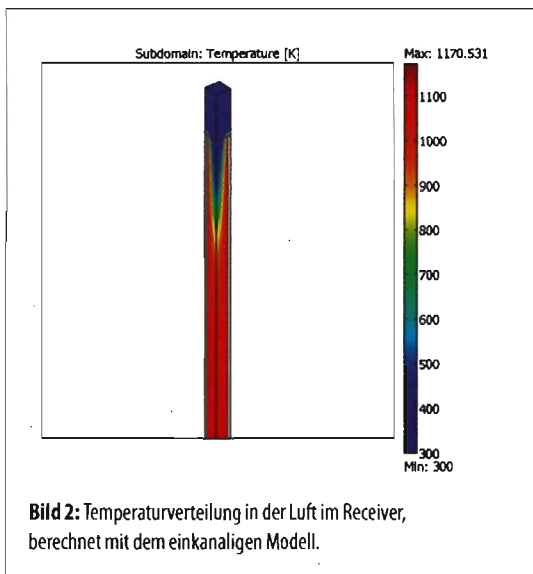


Bild 2: Temperaturverteilung in der Luft im Receiver, berechnet mit dem einkanaligen Modell.

Beim homogenen Modell des gesamten Receivers zeigte das Geschwindigkeitsfeld eine annähernd parabolische Verteilung in der Kalotte mit Bereichen höherer Geschwindigkeit entlang den Kalotten-Wänden im Auslassbereich. Dieser Effekt tritt aufgrund der Reduzierung des Einlassquerschnitts der Kalotte ein (Bild 3). Dies verursacht einen Anstieg des konvektiven Wärmeflusses und der thermischen Spannungen in diesem Abschnitt. Das Diagramm in Bild 3 zeigt die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Zentrum der Kalotte. Dabei sind drei Zonen zu erkennen. Besonders interessant ist der Receiver-Bereich, da in dieser Zone die Geschwindigkeit zunächst vom Einlasswert ($\approx 1,0$ [m/s]) auf einen Maximalwert ($\approx 1,45$ [m/s]) ansteigt. Anschließend sinkt er auf $1,2$ [m/s]. Danach steigt er wegen der abnehmenden Querschnittsfläche der Kalotte auf $9,5$ [m/s].

Von besonderem Interesse ist die Betrachtung der Temperaturverteilung im Festkörper auf der Einlassfläche des Receivers (Bild 4). Es zeigte sich eine symmetrische Verteilung mit Temperaturabfall von $1,260$ [K] in der Mitte des Receivers auf $1,130$ [K] am Rand. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in den Versuchen erreicht. Beide Temperaturen gleichen sich ab einer Tiefe von ≈ 45 Millimetern. Der Vergleich beider Simulationsansätze macht deutlich, dass die Auslasstemperaturen annähernd gleich sind. Allerdings gibt es Unterschiede im Blick auf den Zeitpunkt, ab dem sich die Temperaturen von Festkörper und Flüssigkeit angleichen. Das mag an einer unpräzisen experimentellen Bestimmung des volumetrischen Wärmeübergangs liegen.

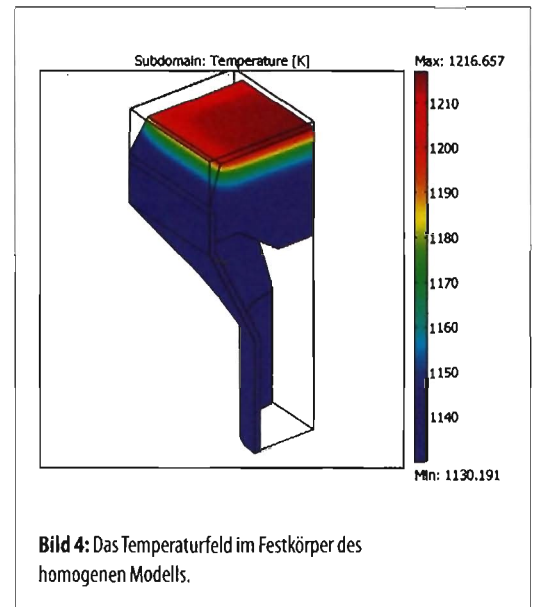


Bild 4: Das Temperaturfeld im Festkörper des homogenen Modells.

Schlussfolgerungen

Beide Simulationsansätze bringen stabile Ergebnisse mit einer guten Übereinstimmung der Auslasstemperaturen. Die Ergebnisse des homogenen Modells zeigen mögliche Überhitzungsstellen im Zentrum der Einlassfläche des Receivers und an der zylindrischen Fläche der Kalotte im Auslassbereich. Diese Resultate stimmen mit den Versuchsergebnissen überein. Mit einer Weiterentwicklung des homogenen Modells eröffnet sich die Möglichkeit für einen detaillierten Vergleich der numerischen Resultate und der Versuchsergebnisse. Daraus lassen sich konstruktive Änderungen und Materialeigenschaften ableiten, um die Effizienz der Komponenten und des Gesamtsystems weiter zu verbessern. (anm) ■

Autoren: Olena Smirnova, Thomas Fend, Peter Schwarzbözl, Daniel Schöllgen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, DLR, Köln