DISS. ETH No. 22572

Gas-Particle Suspensions as High-Temperature Heat Transfer Media for Concentrated Solar Power Applications

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

JAN MARTI
MSc ETH ME
born on 10.01.1987
citizen of Etziken (SO)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Aldo Steinfeld, examiner
Dr. Andreas Z'Graggen, co-examiner
Dr. Andreas Haselbacher, co-examiner

2015

Abstract

A major improvement of the solar-to-electricity efficiency of conventional concentrated solar power (CSP) plants requires an increase of the operating temperature to enable the use of a more efficient thermodynamic cycle. In addition, cost-effective thermal-energy storage systems are required to reduce the cost of dispatchable electricity generation by CSP plants. Finally, this enables the replacement of fossil-fired power plants. These requirements can be achieved by using a slowly upward-moving, dense gas-particle suspension as heat transfer medium (HTM) to absorb and store the solar energy. The gas-particle suspension is heated up by moving through directly irradiated riser tubes located in the solar receiver of a solar power tower. This dense gas-particle suspension behaves thereby like an upward-moving bubbling fluidized bed. By using a HTM based on heat-resistant particles with a high heat capacity like silicon carbide (SiC) particles, the operating temperature of the CSP plant can be increased to about 1000 °C. Additionally, the hot particles can directly be used as thermal-energy storage media.

To advance the development of this new HTM for CSP plants, this thesis investigates the detailed hydrodynamics and heat-transfer mechanisms in dense gas-particle suspensions. Therefore, a two-phase Euler-Euler model for dense gas-particle systems is built on the open-source code OpenFOAM. The model is capable of predicting the complex hydrodynamic behavior of bubble formation, coalescence, and breakup together with conduction, convection, and radiation heat transfer.

To accurately model the radiation heat transfer, an experimental-numerical approach is developed to determine the volume-averaged radiation properties: extinction coefficient, scattering albedo, and approximated scattering phase function of SiC particle suspensions with different solid fractions. A spectroscopic goniometry system is used to measure the angular intensity distribution around irradiated SiC particle suspensions. In a second step, this experimental intensity distribution is compared to the numerical intensity distribution of a Monte Carlo ray-tracing model matching the experimental setup and representing the particle suspension by a participating medium. The radiation properties of the participating medium are adjusted in a fitting routine until the resulting numerical intensity distribution is in good agreement with the experimental distribution. This procedure is done for different suspension thicknesses with different solid fractions. In this way, the resulting set of radiation properties can directly be applied to solve the radiation transfer equation in gas-particle systems with changing solid fractions using existing popular methods like the spherical harmonics, discrete ordinate, or statistical Monte Carlo methods.

At each time step, the two-phase model calculates the effective radiation properties as a function of the local solid fraction based on the determined radiation properties of the SiC particle suspensions. Therefore, the model captures radiation penetrating through gas bubbles neat the riser wall and radiation being absorbed within a few millimeters by the dense gas-particle suspension.

In addition to separate verification and validation studies of hydrodynamics and heat transfer, comparisons with on-sun experimental results indicate that the model accurately predicts coupled hydrodynamics and heat transfer in dense gas-particle systems.

In a parameter study, the model is used to investigate the influence of the riser-wall temperature and riser diameter on the heat-transfer coefficient, solid temperature, solid mass flow rate, and solid fraction. Increasing the riser-wall temperature leads for a constant mass flow rate to a decrease of the heat-transfer coefficient as the logarithmic mean temperature difference

over the irradiated riser section strongly increases. An increase of the riser diameter from 36 mm to 72 mm leads for a constant gas inlet velocity and riser-wall temperature to a solid temperature reduction of about 30 %.

A detailed investigation of the involved heat-transfer mechanisms shows that the majority of the heat transfer takes place within a distance of a few particle diameters from the heated riser wall. In this region, the particles are heated by solid conduction and heat is then transferred by solid convection to the colder flow in the center of the riser. Even at a riser-wall temperature of 1281 K, radiation heat transfer is found to be a minor contribution to the overall heat transfer in the solid phase. This results from a reduced temperature difference between the wall and the adjacent solid phase together with a high extinction coefficient that prevents radiation heat transfer between solid regions farther apart. It is shown that with a moderate riser wall temperature of 581 K and a particle diameter of 64 µm, solid conduction accounts for about 97 % of the wall-to-suspension heat flux. Increasing the wall temperature to 981 K together with a particle diameter of 400 µm leads to an increase of the radiation heat-flux contribution up to about 10 % of the total wall-to-suspension heat flux.

A comparison of sequential snapshots of the solid-fraction, solid-temperature, and solid-velocity field show the complex interplay between the wall heat flux and the examined solid and gas-phase property fields. The path of the rising bubbles has thereby an essential influence on the local wall heat flux by inducing a replacement of heated solid regions at the wall with colder ones from the center of the riser.

Zusammenfassung

Um eine deutliche Effizienzsteigerung der Stromproduktion von Sonnenwärmekraftwerke zu erreichen, muss die Betriebstemperatur erhöht werden. Diese Temperaturerhöhung ermöglicht die Verwendung eines effizienteren thermodynamischen Kreisprozesses zur Umwandlung von Wärme in Arbeit und letztendlich in Elektrizität. Zusätzlich werden kosteneffiziente Systeme zur Wärmespeicherung benötigt, damit die Kosten der kontinuierlichen Stromerzeugung durch Sonnenwärmekraftwerke reduziert werden können. Die dadurch gewonnene Kostenreduktion ermöglicht die mit fossilen Energieträgern betriebenen Elektrizitätswerke durch Sonnenwärmekraftwerke zu ersetzen. Die dafür notwendigen Anforderungen können mittels Verwendung eines neuartigen Wärmeübertragungsmediums erreicht werden, das aus einer dichten Suspension von Gas und Partikeln besteht, welche die Sonnenenergie absorbieren und speichern. Die Gas-Partikel-Suspension verhält sich wie eine aufwärts bewegende, blasenbildende Wirbelschicht, die beim Durchströmen von direkt bestrahlten Steigrohren aufgeheizt wird. Die Steigrohre befinden sich im zentralen Absorber zuoberst auf einem Solarturm. Durch die Verwendung eines Wärmeübertragungsmediums, basierend auf hitzebeständigen Partikeln, wie Siliziumkarbid-Partikeln, kann die Betriebstemperatur bis auf etwa 1000 °C erhöht werden. Zusätzlich können die heissen Partikel dank der hohen Wärmekapazität von Siliziumkarbid direkt als Wärmespeichermedium verwendet werden.

Um die Entwicklung dieses neuartigen Wärmeübertragungsmediums für Sonnenwärmekraftwerke voranzutreiben untersucht diese Doktorarbeit die

detaillierten Mechanismen der Hydrodynamik und der Wärmeübertragung in dichten Gas-Partikel-Suspensionen. Dafür wurde mit Hilfe des Softwarepaketes OpenFOAM ein Zweiphasen-Euler-Euler-Modell für dichte Gas-Partikel-Systeme erstellt. Das Modell ist in der Lage, die komplexen hydrodynamischen Verhaltensweisen von Blasenbildung, Blasenkoaleszenz und Blasenzerfall zusammen mit dem Wärmetransport durch Konduktion, Konvektion und Strahlung zu berechnen.

Die genaue Modellierung des Wärmetransportes durch Strahlung erfordert die Bestimmung der volumengemittelten Strahlungseigenschaften 'Extinktionskoeffizient', 'Albedo' und approximierte 'Streufunktion'. Diese Strahlungseigenschaften werden durch eine experimentell-numerische Methode als Funktion des Feststoffanteils der Siliziumkarbid-Partikel bestimmt. In einem ersten Schritt wird ein goniometrischer Messaufbau verwendet, mit dem die winkelabhängige Strahlungsintensität von bestrahlten Siliziumkarbid-Partikel-Suspensionen gemessen wird. In einem zweiten Schritt wird die gemessene mit der numerischen Intensitätsverteilung eines Monte Carlo Modells zur Strahlenverfolgung verglichen. Das Monte Carlo Modell stimmt mit dem Messaufbau überein. Die Partikel-Suspension wird durch ein sogenanntes teilnehmendes Medium repräsentiert. Die Strahlungseigenschaften des teilnehmenden Mediums werden angepasst, bis die numerische mit der experimentellen Intensitätsverteilung in adäquater Übereinstimmung ist. Diese Vorgehensweise wird für verschiedene Schichtdicken und Feststoffanteile der Suspension durchgeführt. Die daraus resultierenden Strahlungseigenschaften können direkt für die Lösung der Strahlungstransportgleichung in Gas-Partikel-Systemen genutzt werden.

Das entwickelte Zweiphasenmodell berechnet für jeden Zeitschritt, in Abhängigkeit vom lokalen Feststoffanteil, die effektiven Strahlungseigenschaften, basierend auf den zuvor bestimmten Strahlungseigenschaften der Siliziumkarbid-Partikel-Suspensionen. Somit erfasst das Modell entweder den Strahlungsdurchgang durch die Gasblasen, die sich an der Wand des Steigrohres befinden oder es erfasst die Strahlungsabsorption durch die dichte Gas-Partikel-Suspension.

Zusätzlich zu Verifizierungs- und Validierungsstudien zeigen Vergleiche mit experimentellen Resultaten, dass das Modell die Hydrodynamik und den Wärmetransport in dichten Gas-Partikel-Systemen genau berechnen kann. In einer Parameterstudie wird dieses Modell verwendet, um den Einfluss der Wandtemperatur und den Durchmesser des Steigrohres auf den Wärmeübergangskoeffizienten, die Temperatur der Festphase, den Massendurchfluss der Festphase und den Feststoffanteil zu untersuchen. Dabei führt die Erhöhung der Wandtemperatur bei konstantem Massendurchfluss zu einem Rückgang des Wärmeübergangskoeffizienten, da die mittlere Temperaturdifferenz über den erhitzten Abschnitt des Steigrohres sich stark erhöht. Die Vergrösserung des Steigrohrdurchmessers von 36 mm auf 72 mm führt bei einer gleichbleibenden Wandtemperatur und konstanten Strömungsgeschwindigkeiten zu einer Temperaturreduktion der Festphase um etwa 30 %.

Eine detaillierte Untersuchung der involvierten Wärmetransportmechanismen zeigt, dass der wesentliche Wärmetransport in einem Bereich von ein paar Partikeldurchmessern von der heissen Steigrohrwand stattfindet. Dort werden die Partikel hauptsächlich durch Konduktion aufgeheizt. Die Wärme wird durch Konvektion der Festphase zur kühleren Strömung in der Mitte des Steigrohres transportiert. Der Wärmetransport durch Strahlung ist, auch bei einer Wandtemperatur von 1281 K, von geringer Bedeutung. Die reduzierte Temperaturdifferenz zwischen der Steigrohrwand und der angrenzenden Festphase, in Kombination mit einem hohen Extinktionskoeffizienten, verhindert einen Strahlungsaustausch zwischen entfernteren Regionen. Bei moderaten Wandtemperaturen von 581 K und Partikeldurchmessern von 64 µm macht die Wärmeleitung durch die Festphase rund 97 % des totalen Wärmestroms der Steigrohrwand zur Suspension aus. Eine Erhöhung der Wandtemperatur auf 981 K in Kombination mit Partikeldurchmessern von 400 µm, führt zu einer Erhöhung des Wärmestroms durch Strahlung bis zu 10 % des totalen Wärmestroms.

Ein Vergleich zwischen aufeinander folgenden Momentaufnahmen der Verteilung des Feststoffanteils, der Feststofftemperatur und der Feststoffgeschwindigkeit im Steigrohr legt die komplexen Wechselwirkungen zwischen

den untersuchten Feststoffeigenschaften und dem Wandwärmestrom offen. Der Weg der aufsteigenden Gasblasen hat einen wesentlichen Einfluss auf den lokalen Wandwärmestrom. Die aufsteigenden Gasblasen erzeugen einen Austausch von heissen Feststoffregionen in Wandnähe mit kühleren Feststoffregionen aus der Mitte des Steigrohres.