

Modellierung der Zweiphasenströmung in senkrechten Rohren für die Anwendung von PCM-Speichern in solarthermischen Kraftwerken mit Direktverdampfung

Masterarbeit
von

Marc Keller

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

an der
Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

März 2014

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg
KIT – Institut für Kern- und Energietechnik (IKET)

Betreuer: Dipl.-Ing. Julian Vogel
DLR – Institut für Technische Thermodynamik

Masterarbeit

für Herrn cand. mach. Marc Keller

Modellierung der Zweiphasenströmung in senkrechten Rohren für die Anwendung von PCM-Speichern in solarthermischen Kraftwerken mit Direktverdampfung

Thermische Energiespeicher sind eine Schlüsseltechnologie für die effiziente und zuverlässige Nutzung solarthermischer Kraftwerke zur Stromerzeugung. Durch diese kann die schwankende Verfügbarkeit von Sonnenenergie gepuffert und somit an den Bedarf des Verbrauchers angeglichen werden. Bei Systemen mit Direktverdampfung lässt sich ein besonders hoher Wirkungsgrad erzielen. Dabei wird Wasser unter Druck als Wärmeträger eingesetzt. Dieses verdampft und überhitzt beim Wärmeeintrag und kann direkt in einer Dampfturbine in Strom umgewandelt werden. Zur Zwischenspeicherung thermischer Energie bieten sich in diesem Fall vor allem PCM-Speicher an. Diese weisen, durch die Ausnutzung der Latentwärme, eine große Energiedichte in einem schmalen Temperaturbereich auf. Außerdem stellt sich während des Be- und Entladevorgangs eine konstante Temperaturdifferenz zwischen dem aufschmelzenden bzw. erstarrenden Speichermaterial und dem kondensierenden bzw. verdampfenden Wärmeträger ein. Dadurch lässt sich die Temperaturdifferenz minimieren und somit der Wirkungsgrad steigern.

Die Verdampfung bzw. Kondensation des Wärmeträgers im Speicher findet in senkrechten Rohren statt. Die dabei auftretende Zweiphasenströmung von Wasser und Wasserdampf beeinflusst die Wärmeübertragung zwischen Speicher und Wärmeträger. Für ein genaueres Verständnis dieser Wechselwirkung wird eine detaillierte Untersuchung der Zweiphasenströmung angestrebt. Dabei sollen insbesondere die auftretenden Strömungsgebiete, der Druckverlust und der Wärmeübergang analysiert und modelliert werden. Das Ziel ist ein einfaches, aber hinreichend genaues Simulationsmodell zur Bestimmung des thermodynamischen Zustands im Wärmeträger.

Im Rahmen der Arbeit sollen folgende Teilaufgaben bearbeitet werden:

- Literaturrecherche zur eindimensionalen Modellierung von Zweiphasenströmungen einschließlich möglicher Gleichungssysteme und dafür benötigter Schließungsterme (z.B. Modelle zum Reibungsdruckverlust und zum Wärmeübergangskoeffizienten)
- Auswahl und Bewertung von Modellen hinsichtlich Eignung und Genauigkeit
- Aufbau eines Simulationsprogramms in MATLAB zur stationären Simulation von Zweiphasenströmungen und Umsetzung ausgewählter Modelle
- Validierung der Simulationsmethodik an Hand von geeigneten Vergleichsdaten

Die vorgenommenen Arbeiten und Ergebnisse sind in geeigneter Form zu dokumentieren.

Betreuer: Dipl.-Ing. Julian Vogel

Zeitraum: 01.10.2013 - 31.03.2014

Abstract

For solar thermal power plants with direct steam generation the integration of a thermal storage with phase change material for intermediate thermal energy storage is a promising technology to increase efficiency. The heat exchange between the heat transfer fluid water/steam and the storage material is of current research interest and is analyzed by numerical methods. In this work, a simulation program for the two-phase flow of the heat transfer fluid in vertical pipes is developed. The model, in particular, takes into account the heat transfer regions occurring during charging and discharging as well as pressure drops. After a summary and comparison of widely used one-dimensional two-phase flow models, the required constitutive relations for the applied stationary heterogeneous model are described. By means of a finite difference method the model equations are discretized and the implementation of the numerical solution algorithm is realized in MATLAB. The validation of the program code is carried out on the basis of comparative results, which are generated with the commercial software Apros. For this purpose, reference cases with constant wall heat flux are analyzed and compared.

Kurzfassung

Für solarthermische Kraftwerke mit Direktverdampfung stellt die Integration eines Phasenwechselfspeichers für die Zwischenspeicherung von thermischer Energie eine vielversprechende Technologie zur Verbesserung der Effizienz dar. Der Wärmeaustausch zwischen dem Wärmeträgerfluid Wasser/Dampf und dem Speichermaterial ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt und wird mit numerischen Methoden untersucht. In dieser Arbeit wird ein Simulationsprogramm für die Zweiphasenströmung des Wärmeträgerfluids in vertikalen Rohren entwickelt. Das Modell berücksichtigt insbesondere die beim Be- und Entladen auftretenden Wärmeübergangsbereiche sowie Druckverluste. Nach einer Zusammenfassung und einem Vergleich der gängigsten Modelle zur eindimensionalen Modellierung von Zweiphasenströmungen werden die notwendigen konstitutiven Gleichungen für das eingesetzte stationäre heterogene Modell beschrieben. Mittels einer Finite-Differenzen-Methode werden die Modellgleichungen diskretisiert und die Implementierung des numerischen Lösungsalgorithmus wird in MATLAB umgesetzt. Die Validierung des Programmcodes erfolgt anhand Vergleichsergebnissen, die mit der kommerziellen Software Apros erzeugt werden. Dazu werden Referenzfälle mit konstanter Wandwärmestromdichte analysiert und verglichen.