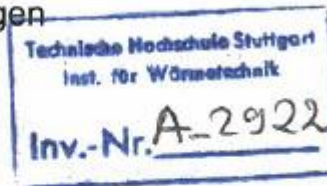


Rechnerunterstützte Entwicklung von Warmwasser-
Wärmespeichern für Solaranlagen



Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Matthias Hampel

geboren in Bremen

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Laurien

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Mai 2008

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
der Universität Stuttgart

2008

Kurzfassung

Hampel, Matthias

Rechnerunterstützte Entwicklung von Warmwasser-Wärmespeichern für Solaranlagen

Vor dem Hintergrund der Diskussion um eine nachhaltige Energieversorgung kommt der Solarthermie eine wichtige Rolle zu, da sie insbesondere im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden sehr stark die fossilen Energieträger ersetzen kann. Sie birgt ein hohes Entwicklungspotential, für dessen Erschließung neue Werkzeuge benötigt werden. Eines davon sind numerische Strömungsrechnungen (CFD), die es ermöglichen, das Verhalten neuer oder bestehender Komponenten in solarthermischen Anlagen komplett an Rechnern zu simulieren. Diese Art der Entwicklung ist im Bereich der Solarthermie aufgrund der beträchtlichen Einarbeitungszeit und dem mangelnden Vertrauen in die Richtigkeit der Simulationsergebnisse momentan noch sehr wenig verbreitet. Ziel dieser Arbeit ist es, die Ergebnisse numerischer Strömungssimulationen für die Beladung von solaren Warmwasserspeichern genauer zu betrachten.

Dazu wurde eine Anlage zur Untersuchung von Einströmvorgängen in einen Warmwasserspeicher gebaut. Die Untersuchungen fanden mit Hilfe von Temperaturfühlern und den laser-optischen Systemen PIV und LIF statt. Mit dem Softwarepaket Fluent wurden Modelle erstellt und gerechnet, die diese Messungen simulieren sollen.

Für die untersuchten Fälle konnten die CFD-Berechnungen die Messergebnisse und Beobachtungen in einer zufriedenstellenden Art wiedergeben, womit validierte Modelle zur Verfügung standen. Aufgrund dieser Simulationen wurden Faktoren und Parameter benannt, die das Rechenergebnis in Bezug auf Qualität und Zeit beeinflussen, auch unter Berücksichtigung auftriebsdominierter Strömungen, wie sie in der Solarthermie oft vorkommen. Besonderes Gewicht wird auf die Berücksichtigung der auftretenden Turbulenz gelegt. Dies geschieht in einem Fall mit Hilfe eines problemangepassten, hochauflösenden Gitters und in den anderen Fällen durch die Verwendung von Zwei-Gleichungsturbulenzmodellen zur Lösung der zeitabhängigen Navier-Stokes-Gleichungen.

Mit Änderungen an den validierten Modellen werden Modifikationen an den kommerziellen Schichtbeladeeinrichtungen untersucht, um so zu demonstrieren, welche Möglichkeiten zur Zeit- und Kosteneinsparung die Simulation als Entwicklungswerkzeug bietet.

Abstract

Hampel, Matthias

Computer supported development of hot water stores for solar thermal systems

Against the background of the discussion about a sustainable energy supply, solar thermal energy will play an important role, since - especially for heat supply for buildings - it is capable to substitute fossil energy. Moreover solar thermal technology has a high potential for development, which will require new design tools. One of these is computational fluid dynamics (CFD), which allows simulation of the behaviour of complete new or already existing components of solar thermal systems. This procedure is still quite uncommon in R&D for solar thermal systems due to the relatively long training time and the missing confidence in the obtained CFD-results. It is hence one aim of this work to have a closer look at the results of CFD-simulations for the charging process of solar hot water stores.

For this reason a test facility to study the inflow of warm water into a solar store was designed and constructed. The examinations were done with temperature sensors and the laser-optical systems PIV and LIF. Computer models to simulate these measurements were compiled with the help of the software package FLUENT.

For all examined cases the CFD-calculations were able to reproduce the measurements and observations, so validated models were gained. Based on these simulations, factors and parameters were described which influence the numerical result with respect to quality and computation time, especially taking into consideration buoyancy dominated flows, which are quite common in solar thermal systems. Consideration of turbulence in the flow is another important point. This is done either with the help of a problem-adapted, high-resolution grid in one case, or in the other cases by using two-equation turbulence models to solve the time dependent Navier-Stokes-Equations.

Finally, to demonstrate which potentials to save time and costs are offered by using CFD-simulations as a R&D tool, modifications to the original stratifying systems are examined.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Kurzfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
Nomenklatur	7
1 Einleitung	10
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	10
1.2 Aufbau der Arbeit	12
1.3 Einordnung in bisherige Arbeiten	12
2 Theoretische Grundlagen	16
2.1 Theoretische Grundlagen zur Strömungsmechanik	16
2.1.1 Grundgleichungen	16
2.1.2 Berücksichtigung von Turbulenz.....	17
2.1.3 Turbulenzmodelle	20
2.1.3.1 Wirbelviskositätsprinzip.....	21
2.1.3.2 Null-, Ein- und Zwei-Gleichungsturbulenzmodelle	22
2.1.4 Problematik bei der Auswahl eines geeigneten Turbulenzmodells.....	23
2.1.5 Wandbehandlung	25
2.1.6 Wandbehandlung in dieser Arbeit.....	27
2.1.7 Vereinfachte Modellierung dreidimensionaler Strömungen	28
2.2 Überblick über die Diskretisierungsverfahren.....	28
3. Anlagen- und Experimentbeschreibung	31
3.1. Aufbau des Testspeichers.....	31
3.2. Heiz- und Kühlmodule	32
3.3. Messwerterfassung	32
4. Verwendete Messverfahren	34
4.1 Invasive Messverfahren	34
4.2 Nicht-invasive Messverfahren	34
4.2.1 PIV-Prinzip	35
4.2.2 LIF-Prinzip	39
5 Numerische und experimentelle Untersuchungen	42
5.1 Direktes horizontales Einströmen in einen Behälter	42
5.1.1 Aufbau und Versuchsbeschreibung	42
5.1.2 Untersuchungsziele	44
5.1.3 Numerisches Gitter.....	44
5.1.4 Ergebnisse	46
5.1.4.1 Vergleich des Referenzfalls mit Fotos.....	46
5.1.4.2 Vergleich des Referenzfalls mit PIV-Daten	47
5.1.4.3 Zeitschrittweite und Lösergenauigkeit.....	50
5.1.4.4 Einfluss der Gitterfeinheit und Volumenreduzierung	53
5.1.4.5 Gittervergrößerung.....	53
5.1.4.6 Behälter mit Symmetrieebene	53

5.1.4.7 Behälter mit reduziertem Volumen	54
5.1.4.8 Modell mit unstrukturiertem Gitter	56
5.1.4.9 Relaxationsfaktoren	58
5.2 Vertikaler Freistrahl	59
5.2.1 Einströmung in einen homogenen Speicher	60
5.2.1.1 Ergebnis der Untersuchungen	62
5.2.1.2 Fazit für die Beladung homogener Speicher	65
5.2.2 Einströmung in einen geschichteten Speicher	65
5.2.2.1 Ergebnis der Messung	66
5.2.2.2 Ergebnis der CFD-Berechnungen	66
5.2.2.3 Fazit Beladung geschichteter Speicher	70
5.3 Schichtbeladeeinheit 1 (SBE 1)	71
5.3.1 Einführung	71
5.3.1.1 Aufbau der SBE 1	71
5.3.1.2 Funktionsweise	72
5.3.1.3 Numerisches Gitter	73
5.3.2 Beladung eines homogenen Speichers mit SBE1	74
5.3.3 Beladung eines geschichteten Speichers mit SBE1	77
5.3.4 Fallströmungen	80
5.3.5 Weitere Einblicke	82
5.3.6 Fazit SBE1	83
5.4 Schichtbeladeeinheit 2 (SBE 2)	84
5.4.1 Funktionsweise	85
5.4.2 Anordnung der Messgeräte	86
5.4.3 Numerisches Gitter	86
5.4.4 Beladung eines Speichers mit SBE 2	88
5.4.5 Fazit SBE2	90
6 Schlussfolgerungen aus den Validierungen	91
6.1 Folgen bei Verwendung eines ungeeigneten Turbulenzmodells	93
7 Rechnerunterstützte Bauteilauslegung mit CFD	95
7.1 Überlegungen für SBE1	95
7.2 Überlegungen für SBE 2	99
7.2.1 Ergebnis des Experiments	100
7.2.2 Ergebnis der CFD-Berechnung	101
8 Verweis auf Bauteilbibliothek	104
9 Zusammenfassung	105
10 Literaturverzeichnis	108
Anhang A - Bauteilbibliothek	113
Einleitung	113
Vorbemerkung	113
Einströmvorgänge in ein Wasserbecken	114
Freistrahlin in den Speicher	117
Schichtbeladeeinheit 1 mit Wärmeübertrager	119
Schichtbeladeeinheit 1 ohne Wärmeübertrager	121
Schichtbeladeeinheit 2	123