

Entwicklung und Validation eines numerischen Verfahrens zur Beurteilung von Trinkwasserspeichern

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

vorgelegt von

Hans Messerschmid

aus Reutlingen

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Heinz Bach

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der Einreichung:

19. April 2002

Tag der mündlichen Prüfung:

22. Juli 2002



Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die numerischen Simulationswerkzeuge beschrieben, mit denen die thermodynamischen und strömungstechnischen Vorgänge in einem indirekt beheizten Trinkwassererwärmer simuliert werden. Gerechnet wird mit dem kommerziellen CFD-Programm FLUENT. Die numerischen Modelle werden anhand von Experimenten an einem maßstabsgetreuen, realen Speicher kalibriert und bewertet. Für den Vergleich zwischen Experiment und numerischer Simulation wird zunächst ein Zustand mit stationärer Dauerzapfung bei gleichzeitiger Beladung des Speichers betrachtet. In einem weiteren Schritt wird für unterschiedliche Rohrabstände des Wärmetauschers¹⁾ ein Beladevorgang aus dem kalten Zustand dynamisch simuliert und mit den Experimenten verglichen.

Der Schwerpunkt im experimentellen Teil der Arbeit liegt in der Erfassung von Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern an ausgewählten, repräsentativen Zonen im Speicher. Es wird eine spezielle Methode zur Messung von Oberflächentemperaturen am Wärmetauscher vorgestellt und diskutiert. Das Geschwindigkeitsfeld im Bereich des Wärmetauschers wird mittels Laser-Doppler-Anemometrie vermessen. Hierfür wird ein Verfahren aufgezeigt, das es erlaubt, mit einem Einkomponenten-LDA ein zweidimensionales Geschwindigkeitsfeld zu bestimmen. Die speziell bei der Verwendung optischer Messverfahren in verschiedenen temperierten, schnell fluktuierenden Wasserschichten auftretenden Probleme werden beobachtet, diskutiert und bewertet.

Die Ergebnisse der Berechnungen des stationären Zustandes ergeben unabhängig vom Rohrabstand am jeweils untersten Rohr den höchsten Wärmeübergang. Mit kleiner werdenden Rohrabständen fällt im unteren Bereich des Wärmetauschers der Wärmeübergang stark ab. Bei der dynamischen Simulation des Beladevorganges des Warmwasserspeichers zeigt sich, dass der exergetische Nutzungsgrad nach einer einheitlich festgelegten Beladezeit bei sehr kleinen Rohrabständen anfänglich stark steigt und ab einem bestimmten Rohrabstand nur noch geringfügig zunimmt.

¹⁾ Die thermodynamisch exakte Bezeichnung nach VDI-Wärmeatlas lautet Wärmeübertrager, im weiteren Verlauf der Arbeit wird jedoch der gängige Begriff Wärmetauscher verwendet.

Abstract

The presentation of the research work begins with the description of numerical simulation tools used to characterize the thermodynamic and fluid-dynamic properties of indirectly heated drinking water storage tanks. The computations are carried out with the commercially available Computational Fluid Dynamics (CFD) code FLUENT. The numerical models are calibrated and evaluated by experiments conducted on a real, true to scale storage tank. For comparison between experiment and numerical simulation, consideration was given to a stationary continuous tap during which the storage tank is charged simultaneously. In a next step, the charging of the heat exchanger from the cold state is dynamically simulated for different tube distances of the heat exchanger, and the results are compared with the experiments.

The main focus of the experimental part of the research lies in the determination of temperature and velocity fields for selected, representative zones in the storage tank. A special method to measure the surface temperatures on the heat exchanger is introduced and discussed. By Laser Doppler Anemometry (LDA), velocity fields in the vicinity of the heat exchanger are determined. It is demonstrated that with a one-component LDA a two-dimensional velocity field can be measured. By using this optical measurement technique particularly for different, rapidly fluctuating water layers, occurring characteristic problems can be observed, discussed and evaluated.

The results of computations of the stationary state yield in each case for the lowest tube the highest heat transfer, independent of the tube distances. Small tube distances result in a significant decrease of the heat transfer in the lower part of the heat exchanger. In the dynamic simulation of the charging process of the heat exchanger, and following a standardized charging time, the exergetic figure of merit increases strongly for small tube spacing, and it increases only slightly onwards a certain tube distance.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Abkürzungen und Formelzeichen	9
1 Einleitung.....	9
1.1 Problemstellung.....	11
1.2 Bisherige Arbeiten.....	13
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	19
2 Grundlagen.....	20
2.1 Bewertung der Vorgänge in einem indirekt beheizten Trinkwassererwärmer	20
2.1.1 Das Prinzip der Exergie.....	22
2.1.2 Quantifizierung der Exergie	23
2.1.3 Betriebsverhalten eines indirekt beheizten Trinkwasserspeichers	25
2.1.4 Exergetische Bewertung.....	27
2.1.5 Der exergetische Nutzungsgrad für die Beladung.....	29
3 Experimente.....	36
3.1 Versuchsaufbau	36
3.1.1 Modellspeicher	36
3.1.2 Hydraulische Einbindung des Speichers in den Prüfstand.....	38
3.2 Messmethoden.....	40
3.2.1 Temperatur der Schichtung	40
3.2.2 Temperaturfelder im Bereich des Wärmetauschers	40
3.2.3 Oberflächentemperatur am Wärmetauscher.....	42
3.2.4 Messwertaufnahme.....	48
3.2.5 Betrachtung der Messabweichungen und Unsicherheiten.....	48
3.3 Geschwindigkeitsmessung mit dem Laser-Doppler-Anemometer (LDA).....	56
3.3.1 Messprinzip.....	56
3.3.2 Aufbau des Laser-Doppler Anemometers	58
3.3.3 Streuteilchen.....	59
3.3.4 Signalverarbeitung.....	63
3.3.5 Traversiereinrichtung	64
3.3.6 Messaufbau und Versuchsdurchführung	65
3.3.7 Messdatenauswertung und Messabweichungen.....	72
3.4 Ergebnisse der Experimente.....	78
3.4.1 Stationärer Fall	78
3.4.2 Aufheizvorgang.....	92

4	Numerische Simulation von Strömungsvorgängen mit Wärmeübertragung.....	96
4.1	Die Methode der Finiten Volumen.....	96
4.1.1	Allgemeines.....	96
4.1.2	Grundgleichungen	96
4.1.3	Turbulenzmodellierung	103
4.1.4	Lösungsverfahren	115
4.1.5	Diskretisierung	115
4.2	Dreidimensionales Speichermodell.....	122
4.2.1	Geometrie	122
4.3	Zweidimensionales Speichermodell.....	127
4.3.1	Geometrie	127
4.3.2	Randbedingungen.....	130
4.4	Ergebnisse der stationären Berechnungen.....	131
4.4.1	Ergebnisse der 3D-Simulation.....	131
4.4.2	Ergebnisse der 2D-Simulation.....	137
4.5	Vergleich der Messwerte mit den Berechnungsergebnissen	148
5	Berechnung dynamischer Vorgänge.....	158
5.1	Ergebnisse der transienten Berechnungen.....	158
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
7	Literaturverzeichnis.....	166