

Mathematische Modellierung und experimentelle Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen

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

von
Harald Drück
aus Künzelsau

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juni 2006

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
der Universität Stuttgart
2006

Kurzfassung

Warmwasserspeicher werden heute in nahezu jeder haustechnischen Anlage eingesetzt, die mit Wasser als Wärmeträgerfluid betrieben wird. Der Einsatz von Speichern in wärmetechnischen Anlagen ist erforderlich, um die zeitlichen Differenzen zwischen der angebotenen und benötigten Wärmeleistung auszugleichen. Der Speicher stellt somit das Zentrum für die Sammlung, Speicherung und Verteilung der Energie dar. Bei thermischen Solaranlagen ist der Einfluss des Speichers auf die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage deutlich stärker ausgeprägt als bei *konventionellen* Heizungsanlagen. Ursächlich hierfür ist primär, dass die von den Sonnenkollektoren gelieferte Wärmeleistung geringer ist und größere zeitliche Schwankungen aufweist als die Wärmeleistung eines konventionellen Öl- oder Gaskessels. In einer Solaranlage stellt der Speicher daher gemeinsam mit dem Sonnenkollektor die wichtigste Komponente dar.

Für die weitere Optimierung und die Prüfung von Solaranlagen ist es erforderlich, das thermische Verhalten von Warmwasserspeichern mathematisch beschreiben zu können. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der mathematischen Modellierung und der experimentellen Prüfung von Warmwasserspeichern für den Einsatz in Solaranlagen. Hierzu wird das Rechenmodell MULTIPORT für Warmwasserspeicher weiterentwickelt und ein neues Verfahren für ihre thermische Prüfung vorgestellt.

Die hierbei hergeleiteten Modellierungsansätze sowie das entwickelte Prüfverfahren sind prinzipiell auch für Warmwasserspeicher gültig, die in konventionellen Heizungs- bzw. Trinkwassererwärmungsanlagen eingesetzt werden.

Als Grundlage für die Modellerweiterung und das Prüfverfahren werden zunächst im **ersten Teil** der Arbeit die zur Charakterisierung der thermischen Eigenschaften von Warmwasserspeichern erforderlichen Kennwerte beschrieben und diskutiert. Die Grundlagen von eindimensionalen Rechenmodellen für die Beschreibung des thermischen Verhaltens von Warmwasserspeichern werden aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die im Speicher auftretenden Strömungs- und Wärmetransportvorgänge erläutert und Möglichkeiten für ihre vereinfachte, eindimensionale Beschreibung vorgestellt.

Die bei einem direkten Einströmen eines Fluidstrahls in den Speicher auftretenden Vermischungen und Verwirbelungen werden durch umfangreiche numerische Simulationsrechnungen mit dem Programm FLUENT untersucht und quantifiziert. Hierbei hat sich gezeigt, dass die unterhalb der Einströmöffnungen auftretenden Verwirbelungen fast ausschließlich von der Geschwindigkeit des einströmenden Fluids abhängen und dass die Temperaturdifferenz zwischen dem einströmenden Fluid und dem Wasser im Speicher nahezu keinen Einfluss hat.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird ein Ansatz für die eindimensionale Beschreibung der Einströmeffekte entwickelt und hierzu eine sogenannte „turbulente Wärmeleitfähigkeit“ eingeführt und in das Rechenmodell MULTIPORT implementiert.

Im **zweiten Teil** der Arbeit wird ein modellgestütztes Prüfverfahren für Warmwasserspeicher vorgestellt. Mit diesem Verfahren ist, in Kombination mit dem Rechenmodell MULTIPORT die detaillierte Beschreibung des thermischen Verhaltens von Warmwasserspeichern möglich. Das Verfahren wird exemplarisch auf einen Trinkwasser- und einen Kombispeicher angewandt. Hierbei wird durch wiederholte Prüfungen an dem selben Speicher gezeigt, dass das Prüfverfahren zu belastbaren Ergebnissen führt. Die wichtigsten Speicherkennwerte sowie die auf Basis der Prüfergebnisse vorgenommene Bewertung des Speichers durch sogenannte Jahressimulationen weisen eine hohe Reproduzierbarkeit auf.

Abschließend werden die Inhalte und Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und bewertet sowie die Möglichkeiten für eine Weiterentwicklung des Verfahrens im Hinblick auf eine Überarbeitung der europäischen Prüfrichtlinie ENV 12977-3 aufgezeigt.

Abstract

Today hot water stores are integrated in nearly every domestic heating facility that is operated with water as heat transfer fluid. The usage of stores in thermal systems is necessary in order to overcome the time differences between the available and required thermal power. Thus the store acts as the centre for collecting, storing and distributing energy. With regard to thermal solar systems the store influences the overall performance of the whole system much more than in conventional heating systems. This is primarily due to the fact that the thermal power delivered by solar collectors is small and more fluctuating than the thermal power of a conventional gas or oil boiler. In thermal solar systems the store therefore represents, together with the solar collector, the most important component.

For further optimisation and testing of thermal solar systems it is necessary, that the thermal behaviour of hot water stores can be described mathematically. Therefore this thesis deals with the mathematical modelling and the experimental testing of hot water stores for thermal solar systems. For this purpose the MULTIPORT computer model for hot water stores is further developed and a new method of thermal performance testing of stores is introduced.

The modelling approaches and the test method derived for this purpose can, in principle, also be applied to hot water stores that are used in conventional heating or domestic hot water systems.

As the basis for extension of the model and development of the test method, the parameters required for characterisation of the thermal behaviour of hot water stores are introduced and discussed **in the first part of this thesis**. The basic elements of the description of the thermal behaviour by one-dimensional store models are discussed. Based on this, the flow and heat transport phenomena occurring in stores are explained and approaches for their simplified description are presented.

The mixing and turbulence effects occurring due to a fluid jet directly entering the store are investigated and quantified by means of extensive numerical simulations with the software FLUENT. These investigation showed that the mixing effects occurring below the inlet are almost exclusively depending on the velocity of the incoming fluid and that there is nearly no influence of the temperature difference between the incoming fluid and the water inside the store.

Based on these findings an approach for the one-dimensional description of the inlet effects is developed. In this context, the so-called „turbulent thermal conductivity“ is introduced and implemented into the simulation model MULTIPORT.

In the **second part** of this thesis a model-based performance test method for hot water stores is presented. This method allows, in combination with the numerical model MULTIPORT, for a detailed description of the thermal behaviour of hot water stores.

The test method is exemplarily applied to one domestic hot water store and to one combi-store. For these stores, it is demonstrated by repeated tests on the same store that the test method delivers reliable results. The most important store parameters as well as the assessment of the stores based on annual system simulations show a high reproducibility.

Finally the content and the results of the thesis are summarised and discussed. Possibilities of a further development of the test method with regard to the revision of the European test standard ENV 12977-3 are pointed out.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Nomenklatur	XV
Lateinische Buchstaben	XV
Griechische Buchstaben.....	XVII
Indizes.....	XVIII
Abkürzungen	XIX
Mathematische Operatoren.....	XX
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Literaturübersicht.....	4
1.2.1 Numerische Modellierung von Warmwasserspeichern	4
1.2.2 Thermische Prüfung von Warmwasserspeichern	8
1.3 Ziele der Arbeit.....	9
2 Kennwerte zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Speichern	11
2.1 Wärmekapazität	12
2.2 Wärmeverlustrate	12
2.3 Kenngrößen der Wärmeübertrager	14
2.3.1 Innerer Wärmeübergangskoeffizient	15
2.3.2 Wärmeleitung	17
2.3.3 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient.....	17
2.3.4 Wärmeübertragungsvermögen.....	19
2.3.5 Anlaufverhalten	22
2.3.6 Verhalten bei thermisch geschichteter Be- und Entladung	24
2.3.7 Vertikale Position	26
2.4 Bereitschaftsvolumen oder nutzbares Warmwasservolumen	26
2.5 Radiale Anschlüsse für direkte Be- und Entladung	27
2.6 Temperaturschichtung bei der Entnahme	28
2.7 Temperaturschichtung im Stillstand	29
2.8 Positionen der Temperaturfühler	30
3 Rechenmodelle für Warmwasserspeicher	31
3.1 Annahmen	31
3.2 Kolbenströmungs-Modelle	32
3.3 Finite-Differenzen-Modelle.....	32
4 Modellierung der Kennwerte zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Speichern	37
4.1 Wärmekapazität	38
4.2 Wärmeverlustrate	38
4.3 Kenngrößen der Wärmeübertrager	39

4.3.1 Wärmeübertragungsvermögen.....	39
4.3.2 Anlaufverhalten	42
4.3.3 Thermisch geschichtete Be- und Entladung	43
4.3.4 Vertikale Position	46
4.4 Bereitschaftsvolumen oder nutzbares Warmwasservolumen	47
4.5 Radiale Anschlüsse für direkte Be- und Entladung	47
4.6 Temperaturschichtung bei der Entnahme	47
4.7 Temperaturschichtung im Stillstand	49
4.8 Positionen der Temperaturfühler	51
5 Numerische Untersuchungen direkter Be- und Entladevorgänge.....	53
5.1 Grundlagen der Thermofluiddynamik.....	53
5.1.1 Massenerhaltung	54
5.1.2 Navier-Stokes-Gleichung	55
5.1.3 Energieerhaltung	56
5.1.4 Boussinesq-Approximation	56
5.1.5 Turbulenzmodelle	57
5.1.6 Kennzahlen	59
5.1.6.1 Dimensionslose Speicherbeladezeit	59
5.1.6.2 Dimensionslose mittlere Temperatur im Speicher	60
5.1.6.3 Dimensionslose Speicheraustrittstemperatur.....	60
5.1.7 Einströminduzierte Wärmeproduktion	60
5.2 Experimentelle Validierung des CFD-Modells	63
5.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	63
5.2.2 Numerische Modellierung	64
5.2.3 Vergleich zwischen Numerik und Experiment	66
5.2.4 Ist ein aufwändiges 3D-Modell notwendig?	75
5.3 Direkte Beladung eines Speichers ohne Einbauten	77
5.3.1 Der Speicher und seine Diskretisierung	77
5.3.2 Simulationsergebnisse	80
5.3.2.1 Einfluss der Einströmgeschwindigkeit.....	81
5.3.2.2 Einfluss der Einströmtemperaturdifferenz	84
5.3.2.3 Strömungsvorgänge im Speicher	87
5.4 Direkte Beladung eines Speichers mit Einbauten.....	90
5.4.1 Der Speicher und seine Diskretisierung	90
5.4.2 Simulationsergebnisse	91
5.4.2.1 Einfluss der Einströmgeschwindigkeit.....	92
5.4.2.3 Strömungsvorgänge im Speicher	94
6 Entwicklung eines Ansatzes zur eindimensionalen Beschreibung des Einströmvorgangs	95
6.1 Zusammenhang zwischen Temperaturschichtung und Richardson-Zahl	95
6.2 Einführung einer „turbulenten Wärmeleitfähigkeit“	98
6.3 Vergleich FLUENT und 1D-Modell	99
6.4 Optimierungsmaßnahmen	101

7 Prüfverfahren für Warmwasserspeicher	103
7.1 Allgemeine Informationen zur Prüfung von Speichern	104
7.2 Durchführung der Prüfsequenzen	105
7.2.1 Speicherprüfstand	106
7.2.2 Prüfsequenzen für Trinkwasserspeicher	107
7.2.3 Prüfsequenzen für Kombispeicher	109
7.3 Durchführung der Verifizierungssequenzen	112
7.3.1 Verifizierungssequenzen für Trinkwasserspeicher	112
7.3.2 Verifizierungssequenzen für Kombispeicher	113
7.4 Auswertung	114
7.4.1 Parameteridentifikation	115
7.5 Verifizierung der Kennwerte	117
7.5.1 Akzeptanzkriterien	119
7.5.2 Unsicherheiten bei den ermittelten Kennwerten	121
7.5.2.1 Messfehler	121
7.5.2.2 Modellfehler	121
7.5.2.3 Fehler bei der Kennwertbestimmung	121
8 Anwendung des Prüfverfahrens	123
8.1 Trinkwasserspeicher	123
8.1.1 Diskussion der Ergebnisse	126
8.1.2 Verifizierung der Kennwerte	127
8.2 Kombispeicher	130
8.2.1 Diskussion der Ergebnisse	135
8.2.2 Verifizierung der Kennwerte	136
9 Zusammenfassung	139
9.1 Diskussion der Ergebnisse	140
9.2 Schlussfolgerungen und Ausblick	141
10 Literaturverzeichnis	143
11 Anhang	149
Anhang A: Ermittlung des nutzbaren Warmwasservolumens	149
Anhang B: Ähnlichkeitskennzahlen	151
B.1 Reynolds-Zahl	151
B.2 Prandtl-Zahl	151
B.3 Peclet-Zahl	151
B.4 Grashof-Zahl	152
B.5 Rayleigh-Zahl	152
B.6 Eckert-Zahl	152
B.7 Richardson -Zahl	152
B.8 Froude-Zahl	153
B.9 Biot-Zahl	153
B.10 Nußelt-Zahl	153