

**Numerische Untersuchung
des Strömungs- und Wärmeübertragungsverhaltens
in zylindrischen Warmwasserspeichern**

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

vorgelegt von

Yang CHEN

aus Harbin, VR China

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Göde

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.1999

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

1999

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden ausführliche numerische Untersuchungen über die Einflüsse verschiedener Parameter, wie z. B. des eintretenden Fluidstroms oder des geometrischen Verhältnisses eines Speichers (H/D_S), auf die Strömung und Wärmeübertragung in zylindrischen Warmwasserspeichern bei den Be- und Entladevorgängen durchgeführt, um die Grundkenntnisse über den Auf- und Abbau der Temperaturschichtung zu erhalten und daraus Maßnahmen zur Verbesserung der Temperaturschichtung ergreifen zu können. Dazu wurde ein Programm zur Berechnung zweidimensionaler, instationärer, inkompressibler und laminarer Strömungs- und Temperaturfelder in zylindrischen Warmwasserspeichern entwickelt. Ein Vergleich der mit diesem Programm berechneten Austrittstemperaturen mit Messungen an einem realen Speicher erbrachte eine gute Übereinstimmung. Zur Bewertung der Temperaturschichtung wurde der exergetische Be- und Entladegrad verwendet.

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, daß bei Beladung mit Warmwasser (konstanter Temperatur) oder bei Entladung die Strömungs- und Temperaturfelder im Speicher hauptsächlich von der modifizierten Richardson-Zahl $Ri_H = Gr_H \cdot Re_H^{-2}$ und der Peclet-Zahl Pe_H abhängen. Bei $Ri_H < 0,1$ kann ein starker Einfluß festgestellt werden. Die Temperaturschichtung im Speicher ist in diesem Fall sehr gering. Bei $Ri_H \geq 0,25$ wurde eine gute Temperaturschichtung aufgebaut. Diese Ergebnisse verifizieren die experimentellen Ergebnisse von Sliwinski (1978). Bei $Ri_H < 0,1$ führt die Vergrößerung der Peclet-Zahl zu einer Verbesserung der Temperaturschichtung. Bei $Ri_H \geq 0,25$ hat die Peclet-Zahl jedoch kaum Einfluß auf die Temperaturschichtung. Das Geometrieverhältnis H/D_S eines Warmwasserspeichers hat bei beiden Betriebsvorgängen Einfluß auf die Temperaturschichtung. Bei $H/D_S > 4$ kann dieser Einfluß vernachlässigt werden. Die Wärmeleitung in der Speicherwand hat nur geringen Einfluß auf die Temperaturschichtung bei Be- und Entladung. Die Wärmeübertragung in die Speicherwand kann jedoch zum Abbau der Temperaturschichtung im Speicher führen.

Zu einer wesentlichen Störung im Aufbau der Temperaturschichtung führt die direkte Beladung mit variabler Eintrittstemperatur. Dieser Einfluß kann durch den Einsatz einer Beladevorrichtung, z. B. einem senkrechten Rohr das zahlreiche Bohrungen enthält (Beladekamin), verringert werden. Die optimalen Widerstandskennzahlen im Beladekamin und die Durchströmungskennzahlen zur Auslegung einer solchen Beladevorrichtung unter verschiedenen Betriebsbedingungen wurden durch diese Untersuchung ermittelt. Mit dieser Maßnahme kann der exergetische Beladegrad bei Beladung mit variabler Eintrittstemperatur um 15,25% erhöht werden, im Vergleich zu dem bei direkter Beladung ohne eine zusätzliche Beladevorrichtung.

Abstract

In the present work the flow- and heat transfer-characteristics in cylindrical hot water stores under various boundary conditions were studied numerically. Emphasis was put on the effects of different parameters on the thermal stratification in hot water stores.

A program for calculating the two dimensional, incompressible, unsteady and laminar flow- and temperature-fields in cylindrical hot water stores was developed. The numerical results show a good agreement with the experimental results.

The exergy analysis was made in order to evaluate the effects of different parameters on the thermal stratification quantitatively.

The numerical results have shown that the modified Richardson number $Ri_H = Gr_H / Re_H^2$ has a great effect on the thermal stratification during a charging process with constant inlet temperature (higher than the initial water temperature in the store) and during a discharging process. If Ri_H is greater than 0,25, a good thermal stratification can be achieved. Under this condition the exergetic charging and discharging efficiency is higher than 0,95.

For $Ri_H < 0,1$ the thermal stratification can be improved by increasing the modified Peclet number Pe_H . If Ri_H is greater than 0,25, the effect of the Pe_H will be very small.

The heat conduction along the store wall has a weak effect on the thermal stratification during a charging and discharging process. However, the heat transfer into the wall can result in a destratification in hot water stores.

During a charging process with variable inlet temperature the thermal stratification is destroyed by the plume entrainment of the inlet jet. With the use of an inlet manifold the thermal stratification can be improved significantly. In this work the optimal fraction parameter in the manifold and the permeability parameter were given for the design of a type of manifold. With this manifold the exergetic charging efficiency can be increased by 15,25% in comparison with that by direct charging.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen	VIII
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	4
3 Allgemeine mathematische Beschreibung	9
4 Das numerische Verfahren	12
4.1 Energie- und Wirbeltransportgleichung	12
4.2 Die Poissongleichung	16
4.3 Stabilitätskriterien.....	19
4.4 Berechnungsverfahren	20
4.5 Programmerprobung.....	21
5 Strömung und Wärmeübertragung im Speicher bei direkter Beladung mit konstanter Eintrittstemperatur	25
5.1 Anfangs- und Randbedingungen.....	26
5.2 Berechnung der Strömungs- und Temperaturfelder im Speicher	26
5.2.1 Einfluß der Richardson-Zahl	26
5.2.2 Einfluß der Peclet-Zahl	30
5.2.3 Zeitliche Veränderung der Strömungs- und Temperaturfelder im Speicher	30
5.3 Temperaturschichtung im Speicher	34
5.4 Exergetische Bewertung der Temperaturschichtung in Warmwasserspeichern	36
5.4.1 Einfluß der Richardson- und der Peclet-Zahl	37
5.4.2 Einfluß der Fourier-Zahl	40
5.4.3 Einfluß des Geometrieverhältnisses H/D_S	40

5.4.4	Korrelation zur Ermittlung der exergetischen und energetischen Beladegrade	42
6	Strömung und Wärmeübertragung im Speicher bei direkter Beladung mit variabler Eintrittstemperatur	44
6.1	Allgemeines	44
6.2	Anfangs- und Randbedingungen	44
6.3	Untersuchungsergebnisse	45
6.3.1	Zeitliche Veränderung der Strömungs- und Temperaturfelder	45
6.3.2	Zeitliche Veränderung der Temperaturschichtung im Speicher	49
6.3.3	Zeitliche Veränderung der Energie und Exergie im Speicher	50
7	Strömung und Wärmeübertragung im Speicher bei Beladung durch den Einsatz einer Beladevorrichtung	53
7.1	Allgemeines	53
7.2	Mathematisches Modell	54
7.3	Randbedingungen	57
7.4	Numerische Verfahren	57
7.5	Druck-, Massenstrom- und Temperaturverteilung im Beladekamin in einem Speicher mit unendlicher Speicherkapazität bei konstanter Eintrittstemperatur	58
7.5.1	Einfluß der Widerstandskennzahl C_f	58
7.5.2	Veränderung des Massenstroms im Kamin in Abhängigkeit von der Durchströmungskennzahl C_o	61
7.6	Strömung und Wärmeübertragung in einem zylindrischen Warmwasserspeicher bei Beladung mit variabler Eintrittstemperatur	62
7.6.1	Druck-, Massenstrom- und Temperaturverteilung im Beladekamin	64
7.6.2	Berechnung der Strömungs- und Temperaturfelder im Speicher	67
7.7	Temperaturschichtung im Speicher	71
7.8	Ermittlung der Widerstandskennzahl des Beladekamins C_f	72
7.8.1	Ähnlichkeitskriterien	73
7.8.2	Exergetischer Beladegrad in Abhängigkeit von der Widerstandskennzahl C_f	73
7.8.3	Korrelation zur Ermittlung der Widerstandskennzahl C_f	78
7.9	Verminderung der Exergieverluste durch den Einsatz der Beladevorrichtung	79

8	Strömung und Wärmeübertragung im Speicher bei Entladung	81
8.1	Anfangs- und Randbedingungen.....	82
8.2	Berechnung der Strömungs- und Temperaturfelder im Speicher.....	82
8.2.1	Einfluß der Richardson-Zahl.....	82
8.2.2	Einfluß der Peclet-Zahl.....	85
8.3	Temperaturschichtung im Speicher.....	88
8.4	Exergetische Bewertung der Temperaturschichtung in Warmwasserspeichern.....	90
8.4.1	Einfluß der Richardson- und der Peclet-Zahl.....	91
8.4.2	Einfluß der Fourier-Zahl.....	92
8.4.3	Einfluß des Geometrieverhältnisses H/D_S	94
8.4.4	Korrelation zur Ermittlung der exergetischen und energetischen Entladesgrade.....	95
9	Einfluß der Wärmeleitung in der Speicherwand auf die Strömung und Wärmeübertragung im Speicher	97
9.1	Allgemeines.....	97
9.2	Anfangs- und Randbedingungen.....	98
9.3	Berechnungsverfahren und Gittersystem.....	100
9.4	Berechnungsergebnisse.....	100
9.4.1	Berechnung der Strömungs- und Temperaturfelder im Speicher.....	100
9.4.2	Temperaturschichtung im Speicher.....	105
9.4.3	Exergetische und energetische Bewertung des Einflusses der Wärmeleitung in der Speicherwand auf die Temperaturschichtung.....	106
10	Zusammenfassung	109
11	Literaturverzeichnis	112
12	Anhang	117
Anhang A	Diskretisierung der Wirbeltransport- und Energiegleichungen.....	118
Anhang B	Ermittlung der Wirbelfunktionen an den Rändern.....	126
Anhang C	Stoffwerte.....	129
Anhang D	Zur Berechnung verwendete Parameter und Berechnungsergebnisse.....	130