

**Experimentelle Untersuchung und Modellierung  
eines kleinen Eisspeichers  
für die solare Kühlung von Gebäuden**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Torsten Koller**

aus Waiblingen

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. Hans Müller-Steinhagen  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Gross

Tag der mündlichen Prüfung: 6.2.2013

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

2013

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung von Eisbildungs- und Schmelzprozessen in einem Eisspeicher.

Ausgangspunkt war das Ziel, einen Eisspeicher für den Verbund mit einer solar betriebenen Absorptionskältemaschine auszulegen, zu bauen und zu optimieren. Für die Auslegung und den Bau des Eisspeichers bzw. dessen Wärmeübertrager aus Kupfer-Glattrohr wurden Berechnungsprogramme zur Abbildung des Betriebsverhaltens in MATLAB erstellt. Grundlage hierfür war die Vermessung von Wärmeübertragern aus Glatt- und Wellrohr. Anhand dieser Programme kann die Optimierung bereits gebauter Wärmeübertrager aber auch die Auslegung neuer Bauformen stattfinden. Zudem ermöglichen sie die Untersuchungen verschiedener Einflussfaktoren auf die Wärmeübertragungsvorgänge im Eisspeicher. Diese sind die Beladungs- und Entladungstemperaturen, Massenströme oder die Speichermasse. Zur Quantifizierung der freien Konvektion im vertikalen Schmelzspalt bei der Entladung des Eisspeichers dient eine aus Messdaten hergeleitete Nusselt-Korrelation.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit setzt sich mit Eisbildung und Schmelzen an Wellrohren auseinander. Mit einem Wärmeübertrager aus Wellrohr fanden Beladungs- und Entladungsversuche am Eisspeicher statt. In MATLAB erstellte Programme zur Berechnung der Erstarrungs- und Schmelzprozesse wurden anhand von Messdaten bewertet. Da keine Nusselt-Korrelationen für den inneren und äußeren Wärmeübergang am Wellrohr bekannt waren, fand eine Abschätzung geeigneter Korrelationen anhand der Wilson-Plot-Methode statt.

Der Wärmeübertrager aus Wellrohr erreicht eine deutlich höhere Übertragungsleistung als die untersuchten Wärmeübertrager aus Glattrohr. Wesentlich verantwortlich dafür ist dessen um den Faktor 2 bis 3 größere Übertragungsfläche. Eine Verbesserung des Wärmeübergangs durch die Wellrohrkontur war nicht festzustellen. Der äußere Wärmeübergang lässt sich ausreichend genau mit einer um den Faktor 0,65 korrigierten Nusselt-Korrelation von Churchill und Chu für waagrecht Glattrohre beschreiben. Die Berechnung des inneren Wärmeübergangs ist mit einer Korrelation nach Gnielinski für Rohrwendeln aus Glattrohr möglich.

Zur Abbildung der Betriebscharakteristika des Eisspeichers wurde für TRNSYS ein Unterprogramm erstellt. Dieses Unterprogramm ist Bestandteil des von *Zetzsche* entwickelten TRNSYS-Modells zur Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Gebäudekühlsystems. Die Kälteleistung zur Kühlung der Räume und der Beladung des Eisspeichers wird von einer solar angetriebenen Absorptionskältemaschine erzeugt.

Das TRNSYS-Unterprogramm zur Abbildung des Eisspeichers basiert auf anhand von Messdaten berechneten Funktionen für das Wärmeübertragungsvermögen  $k_A$  in Abhängigkeit von der übertragenen Energiemenge.

## Abstract

This research project focuses on experimental and theoretical investigations of freezing and melting of water in an ice store.

A small ice store was built and optimized for storing cooling energy generated by a solar powered absorption chiller. To investigate the influence of different parameters on the performance of the heat exchanger which was built of parallel lines of plain copper tubes, a calculation program was developed in the MATLAB environment. It allows, for example, the variation of the temperature and the mass flow of the coolant or the kind of storage mass. The calculation programs also allow the optimization of existing heat exchangers.

For the calculation of the discharging process, a Nusselt correlation was formulated based on measured data. It describes the Nusselt number in the molten gap between the vertical tube and the ice layer during internal discharging.

Another part of the present work focuses on freezing and melting of water at the surface of corrugated pipes. Charging and discharging processes were experimentally investigated, using a heat exchanger built of corrugated pipes. Calculation programs for charging and discharging with this kind of heat exchanger were also developed in the MATLAB environment and validated with the measured data. With the Wilson-Plot-Method correlations for the inner and outer heat transfer coefficients were estimated.

The heat exchanger built from corrugated pipes shows higher charging and discharging rates than the investigated heat exchangers built from plain copper tubes. This is mainly due to the heat transfer area of the heat exchanger built of corrugated pipes which is 2 to 3 times larger than the area of other heat exchangers. The corrugated surface itself does not improve the heat transfer coefficient significantly.

As a result of the analysis with the Wilson-Plot-Method, the outer heat transfer is calculated with a modified Nusselt correlation of Churchill and Chu for horizontal pipes. It is multiplied with a fitting coefficient of 0,65. The inner heat transfer can be calculated with a correlation of Gnielinski for helically coiled plain tubes.

A Non-Standard-Type representing this specific ice store in TNRSYS was established in the present work. It allows investigations of the in-service behaviour of the ice store, as a part of a solar powered cooling system for buildings. This cooling system is developed and theoretically investigated in TRNSYS by *Zetzsche*.

The predicted behaviour of the ice store during charging and discharging is based on values of the overall heat transfer coefficient  $kA$  which are calculated as a function of the actual cooling capacity of the ice store.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemein .....	1
1.2 Stand der Technik und Motivation .....	2
1.3 Das solare Kühlsystem am ITW .....	4
<b>2. Eisspeicher</b>	<b>7</b>
2.1 Thermodynamische Vorgänge bei der Eisspeicherung .....	7
2.2 Speicherkapazität .....	9
2.3 Betriebsverhalten des Eisspeichers .....	10
2.3.1 Beladung .....	10
2.3.2 Externe und interne Entladung .....	11
<b>3. Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>12</b>
3.1 Versuchsaufbau Eisspeicher .....	12
3.1.1 Umwälzkühler .....	13
3.1.2 Kälteträger .....	14
3.1.3 Messtechnik .....	14
3.1.4 Speicherbehälter .....	14
3.1.5 Plattenwärmeübertrager und Umwälzpumpe .....	14
3.1.6 Auslegung und technische Daten der Wärmeübertrager .....	15

3.2	Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Wärmeübertrager .....	16
3.3	Auswertung der Versuche zur Wilson-Plot-Methode.....	17
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen</b>	<b>20</b>
4.1	Beladungsversuche .....	20
4.1.1	Beladung WÜ A-CU-9.....	20
4.1.2	Vergleich der Beladung mit WÜ A-Cu-9, B-Cu-12 und C-ES-4.....	26
4.1.3	Beladungsversuche mit WÜ B-Cu-12 und Tyfocor L.....	28
4.2	Entladungsversuche .....	30
4.2.1	Vergleich externe und interne Entladung .....	31
4.2.2	Interne Entladung WÜ A-Cu-9 .....	33
4.2.3	Vergleich der internen Entladung mit WÜ A-Cu-9, B-Cu-12 und C-ES-4.....	36
4.2.4	Interne Entladung mit WÜ B-Cu-12 und Tyfocor L.....	38
4.3	Wärmeverluste des Eisspeichers.....	40
4.4	Vergleich der Kälteträger .....	40
4.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	42
<b>5.</b>	<b>Modellierung mit MATLAB</b>	<b>46</b>
5.1	Literaturübersicht .....	46
5.2	Modellierung von Erstarrungs- und Schmelzvorgängen .....	46
5.2.1	Quasi-stationäre Näherung .....	47
5.3	Erstarren und Schmelzen am Glattrohr.....	48
5.3.1	Wärmeleitwiderstand der Eisschicht beim Erstarren.....	49
5.3.2	Wärmeübertragung bei der Erstarrung am vertikalen Glattrohr .....	50
5.3.2.1	Einfluss der Eisbildung auf den Lösungsweg .....	52
5.3.3	Wärmeübertragung beim Schmelzen am senkrechten Glattrohr .....	55
5.3.3.1	Einfluss der Schmelzspaltweite .....	58
5.3.3.2	Berechnung der Entladung nach Zerbrechen der Eismasse .....	59
5.4	Erstarrung und Schmelzen am Wellrohr .....	60
5.4.1	Strömungsprofil im Wellrohr.....	61

5.4.2	Einfluss der Wellrohroberfläche.....	61
5.4.3	Herleitung der Oberfläche und des Volumens der Eisschicht am Wellrohr.....	62
5.4.4	Gegenseitige Beeinträchtigung der Eiszyylinder bei der Beladung .....	66
5.4.4.1	Flächenkorrekturfaktor $f_{WR,korr}$ am Wellrohr.....	66
5.4.4.2	Schnittvolumen beim Überschneiden der Eiszyylinder.....	67
5.4.5	Mittlere Dicke und Oberfläche der Eisschicht bei der Beladung .....	68
5.4.6	Mittlere Dicke und Oberfläche des Schmelzspalts bei der Entladung.....	68
5.4.7	Berechnung der äußeren und inneren Nusselt-Zahl.....	69
5.4.7.1	Ausgangsgleichung für die äußere Nusselt-Zahl.....	69
5.4.7.2	Ausgangsgleichungen für die innere Nusselt-Zahl .....	70
5.4.7.3	Ergebnisse zur Wilson-Plot-Methode .....	71
5.4.7.4	Diskussion der Ergebnisse zur Wilson-Plot-Methode .....	73
5.4.8	Berechnung der Beladung am Wellrohr.....	74
5.4.8.1	Berechnung der Oberfläche der Eisschicht am Wellrohr.....	74
5.4.8.2	Wärmeübertragung vor Einsetzen der Eisbildung .....	76
5.4.8.3	Rechengang für die Eisbildung.....	77
5.4.9	Berechnung der Entladung am Wellrohr.....	79
5.4.9.1	Freie Konvektion im horizontalen Schmelzspalt.....	80
5.4.9.2	Freie Konvektion nach Vereinigung der Schmelzspalte .....	81
5.4.9.3	Freie Konvektion nach Abschmelzen der Eismasse.....	82
5.5	Diskussion der Berechnungen mit MATLAB.....	82
5.5.1	Beladung mit WÜ A-Cu-9.....	82
5.5.2	Entladung mit WÜ A-Cu-9.....	85
5.5.3	Beladung mit WÜ C-ES-4 .....	89
5.5.4	Entladung mit WÜ C-ES-4 .....	91
<b>6.</b>	<b>Modellierung mit TRNSYS</b> .....	<b>93</b>
6.1	Randbedingungen und Definitionen.....	93
6.2	Berechnungsschritte des Unterprogramms für den Eisspeicher.....	93
6.3	Struktur des Unterprogramms für den Eisspeicher.....	95

6.4	Berechnung der kA-Funktionen anhand von Messdaten .....	95
6.5	Berechnung der Beladung mit TRNSYS .....	99
6.5	Berechnung der Entladung mit TRNSYS .....	102
6.6	Berechnung einer wechselnden Be- und Entladung .....	104
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>		<b>106</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>109</b>
<b>Anhang I: Hilfsgrößen bei den Messungen</b>		<b>114</b>
I.1	Berechnung der Rayleigh- und Nusseltzahl anhand von Messdaten für den Glattrohr-Wärmeübertrager .....	114
I.2	Verwendete Stoffwertfunktion für Wasser, Ethanol und Tyfocor L .....	116
I.3	Stoffwerte von Eis .....	117
<b>Anhang II: Messdaten zu WÜ B-Cu-12 und C-ES-4</b>		<b>118</b>
II.1	Druckverlust der Wärmeübertrager .....	118
II.2	Beladung WÜ B-CU-12 .....	118
II.3	Entladung WÜ B-CU-12 .....	120
II.4	Beladung Wellrohrwärmeübertrager .....	122
II.5	Entladung Wellrohrwärmeübertrager .....	123
<b>Anhang III: Hilfsgrößen bei den Berechnungen mit MATLAB</b>		<b>124</b>
III.1	Äußere und innere Nusselt-Zahlen für den Glattrohr-WÜ .....	124
III.2	Lineare Gleichungssysteme für die Modellierung der Beladung .....	127
III.2.1	LGS Beladung am Glattrohr-WÜ .....	127
III.2.2	LGS Entladung am Glattrohr-WÜ .....	127
III.2.3	LGS Beladung am Wellrohr-Wärmeübertrager .....	128
III.2.4	LGS Entladung am Wellrohr-Wärmeübertrager .....	129

<b>Anhang IV: Strukturen der Berechnungsprogramme</b>	<b>130</b>
IV.1 Beschreibung der Matlab-Berechnungsprogramme .....	130
III.1.1 Berechnung der Beladung am Glattrohr-Wärmeübertrager .....	130
IV.1.2 Berechnung der Entladung am Glattrohr-Wärmeübertrager .....	131
IV.1.3 Berechnung der Be- und Entladung am Wellrohr-Wärmeübertrager .....	132
IV.2 Berechnungsroutinen des TRNSYS-Unterprogramms .....	135
<b>Anhang V: Fehlerabschätzung</b>	<b>137</b>
V.1 Systematische Abweichungen .....	137
V.1.1 Abweichungen bei den Be- und Entladungsversuchen mit Ethanol .....	137
V.1.2 Abweichung bei der Berechnung von $kA_{Sch}$ .....	139
V.2 Zufällige Abweichungen .....	140
<b>Anhang VI: Exergetische Betrachtung</b>	<b>141</b>
VI.1 Gütegrad des Eisspeichers .....	141
VI.2 Gütegrad Verbund AKM und Eisspeicher .....	143
<b>Lebenslauf</b>	<b>147</b>