

# **Schneckenwärmeübertrager in Latentwärmespeichersystemen - Tests und Wirtschaftlichkeitsstudie für solarthermische Anlagen**

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
**Technischen Universität Carolo-Wilhelmina**  
zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Verena Zipf  
aus : Heilbronn

eingereicht am: 18.06.2015  
mündliche  
Prüfung am: 20.08.2015

Gutachter: Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner  
apl. Prof. Dr. rer. nat. Volker Wittwer, Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg



Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

**Verena Zipf**

**Schneckenwärmeübertrager in  
Latentwärmespeichersystemen -Tests und  
Wirtschaftlichkeitsstudie für solarthermische Anlagen**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3987-0

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Latentwärmespeicher eignen sich besonders zur Speicherung der in zweiphasigen Arbeitsmedien (z.B. Wasser/Dampf) enthaltenen Energie. Momentan sind jedoch noch keine wirtschaftlichen Latentwärmespeicher auf dem Markt verfügbar. In der vorliegenden Arbeit wird ein innovatives aktives Latentwärmespeicherkonzept mit Schneckenwärmeübertrager vorgestellt, bei dem das Phasenwechselmaterial während des Wärmeübergangs beim Phasenwechsel fest - flüssig oder flüssig - fest von Speichertank zu Speichertank gefördert wird. Es wurde ein Teststand zur experimentellen Charakterisierung des Latentwärmespeichers ausgelegt und aufgebaut. In Versuchen wurden konstruktive Maßnahmen und Betriebsstrategien entwickelt, um den Benetzungsgrad der Wärmeübertragerfläche beim Be- und Entladen zu erhöhen. Darüber hinaus wurden die globalen Wärmedurchgangskoeffizienten sowie die Wärmeübergangskoeffizienten während des Schmelzens und des Kristallisierens ermittelt. Der Wärmedurchgang im Schneckenwärmeübertrager ist, verglichen mit einem Rippenrohr – Latentwärmespeicher, ähnlich beim Schmelzen und höher beim Kristallisieren. Aufgrund der sich auf der Wärmeübertragerfläche bildenden Schicht aus festem Phasenwechselmaterial unbekannter Dicke ist es mit dem Teststand nicht möglich, die Wärmeübergangskoeffizienten beim Kristallisieren zu ermitteln. Um dies zu ermöglichen wurde eine Methodik, bei der ein Kratzwärmeübertrager die Vorgänge im Schneckenwärmeübertrager vereinfacht abbildet, erarbeitet und vorgestellt. Das Latentwärmespeicherkonzept wurde weiter entwickelt, um hohe Drücke des Wärmeträgers zu ermöglichen. In Systemsimulationen wurde der Einsatz des Latentwärmespeichers sowohl zentral in solarthermischen Kraftwerken als auch dezentral in solaren Kraft-Wärme-Kopplungssystemen untersucht, und anhand wirtschaftlicher Kennzahlen beurteilt. Anhand dieser Kennzahlen wurden Auslegungsvorschriften für den Speicher im Systemkontext erarbeitet. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz des Speichers sowohl in solarthermischen Kraftwerken als auch in dezentralen solaren Kraft-Wärme-Kopplungssystemen wirtschaftlich sein kann.



## Abstract

Latent heat storages are very appropriate to store energy from two phase working media, such as water/steam. However, currently there are no economic latent heat storages available on the market. In the present work, an innovative active latent heat storage concept with screw heat exchangers is proposed. In that concept, the phase change material is transported actively from one storage tank to the other, while it changes its phase from solid to liquid or from liquid to solid. A test facility was designed and constructed, in order to characterize the latent heat storage experimentally. Constructive measures and operational strategies have been determined in various tests to improve the use of the heat transfer surface during charging and discharging. The overall and the convective heat transfer coefficients during melting and crystallization have been determined. The overall heat transfer coefficient of the latent storage has been compared to that of a latent storage with finned tubes. Its value is similar during charging and higher during discharging. Due to a layer of solid phase change material on the heat transfer surface with unknown thickness, the convective heat transfer coefficient during discharge could not be determined with the experimental facility. Therefore, a method to identify it with a simplified test facility with a scraped surface heat exchanger has been proposed. The latent heat storage concept was revised in order to allow a high steam pressure of the working fluid. In system simulations, the use of the latent heat storage both in central solar thermal power plants as well as in decentralized solar combined heat and power systems was assessed by the use of economic numbers. By comparing these economic numbers for different system designs, design rules for the storage in the system context have been determined. It was shown that the use of the latent heat storage with screw heat exchanger can be economically viable both in solar thermal power plants and in solar heat and power systems.



## Danksagung

Diese Arbeit wurde am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme im Rahmen der Projekte Innolat (gefördert von der E.ON International Research Initiative) sowie SALSA (gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) angefertigt. Ganz herzlich bedanke ich mich bei der Reiner Lemoine Stiftung, die mit einem Stipendium meine Arbeit unterstützte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner, vom ehemaligen Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der TU Braunschweig für seine engagierte Betreuung, bei der er sich stets für anregende inhaltliche Diskussionen und sonstige Fragen ausreichend Zeit nahm. Auch Herrn Prof. Dr. rer. nat. Volker Wittwer danke ich für die wertvollen Gespräche und die Übernahme der Zweitbetreuung, sowie Herrn Professor Scholl für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die sehr gute Zusammenarbeit, die Diskussionen und die stets tatkräftige Unterstützung bei den praktischen Arbeiten bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen Anton Neuhäuser und Daniel Willert, die wesentlich zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben. Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Kramer danke ich für die wissenschaftliche Betreuung am ISE und viele anregende Gespräche, sowie Herrn Dr. Werner Platzer für seine Rückmeldungen und Anregungen zur Arbeit. Danke ebenfalls an Bernhard Schindler, Annie Hofer, Jill Ullrich und Simon Lude für ihre Unterstützung. Auch nochmals mein Dank an alle Studenten (Franzi, Anas, Michael, Armin, Peter, Patrick, Raimund, Laurin, Henning), die wichtige Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir meine Ausbildung ermöglichte, mich stets unterstützte und somit den Grundstein für die Durchführung dieser Arbeit legte.

„Last but not least“: danke, Bernhard für das Verständnis für die langen Arbeitstage, das immer offene Ohr und den „freien Rücken“!

---



---

# Inhalt

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhalt</b> .....	<b>VII</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XXV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 Solarthermische Kollektoren.....	3
2.1.1 Linienkonzentrierende Kollektoren zur Direktverdampfung.....	4
2.1.2 Einsatzgebiete für direktverdampfende Kollektoren.....	6
2.2 Thermische Speicher für konzentrierende solarthermische Systeme.....	7
2.2.1 Stand der Technik: Thermische Speicher für konzentrierende solarthermische Systeme zur Dampferzeugung.....	7
2.2.2 Eignung von Speichern für die Direktverdampfung .....	9
2.2.3 Stand der Technik: Hochtemperatur-Latentwärmespeicher.....	10
2.3 Übersicht über Phasenwechselmaterialien.....	13
2.4 Stand der Technik: Schneckenwärmeübertrager .....	14
<b>3 Untersuchungen am Latentwärmespeicherteststand</b> .....	<b>19</b>
3.1 Beschreibung des aktiven Latentwärmespeicherkonzepts .....	19
3.2 Allgemeine Spezifikationen für den Latentwärmespeicherteststand .....	20
3.2.1 Ziele der Versuche .....	20
3.2.2 Spezifikationen des Teststandes .....	21
3.3 Beschreibung des Latentwärmespeicherteststandes .....	22
3.3.1 Aufbau und verwendete Komponenten .....	22
3.3.2 Anlagenschema .....	25
3.4 Methodik der Versuchsdurchführung und -auswertung .....	26
3.4.1 Berechnung der Bewertungsgrößen.....	27
3.5 Messtechnik des Latentwärmespeicherteststandes .....	31
3.5.1 Erforderliche Messgenauigkeit .....	31
3.5.2 Aufbau des Messsystems .....	33
3.5.3 Temperaturmessung.....	33
3.5.4 Durchflussmessung .....	35
3.6 Inbetriebnahme .....	35
3.6.1 Inbetriebnahme für den Betriebszustand „Speicher beladen“.....	36
3.6.2 Inbetriebnahme für den Betriebszustand „Speicher entladen“.....	38
3.7 Versuchsergebnisse und Auswertung .....	40

---

3.7.1	Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten $k$ .....	41
3.7.2	Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{w1}$ , $\alpha_{w2}$ und $\alpha_T$ .....	52
3.8	Berechnung der PCM-Schichtdicke beim Kristallisieren .....	59
3.9	Zusammenfassung und Ausblick .....	66
<b>4</b>	<b>Theoretische Überlegungen und Berechnungen zum Schneckenwärmeübertrager .....</b>	<b>69</b>
4.1	Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten für einen vergrößerten Schneckenwärmeübertrager .....	69
4.2	Vereinfachtes Modell des SWÜ mit Kratzwärmeübertrager zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten beim Kristallisieren .....	71
4.3	Konzept für Hochdruck - Schneckenwärmeübertrager .....	78
4.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	80
<b>5</b>	<b>Analyse von solarthermischen Systemen mit dem untersuchten Latentwärmespeicher in Simulationen .....</b>	<b>81</b>
5.1	Simulationsumgebung ColSim .....	81
5.2	Quasistationäre Modelle für die Simulation .....	82
5.2.1	Schneckenwärmeübertrager .....	82
5.2.2	Konventioneller Kraftwerksteil .....	87
5.2.3	Direktverdampfendes Solarfeld .....	89
5.2.4	Speichertank .....	91
5.2.5	Pumpe .....	92
5.3	Simulation von direktverdampfenden Kraftwerken mit einer Kombination aus latentem und sensiblem Speicher .....	93
5.3.1	Kraftwerk mit Drei - Tank Speicherkonzept .....	93
5.3.2	Kraftwerk mit Zwei - Tank Speicherkonzept .....	99
5.3.3	Plausibilität des Systemsimulationsmodells .....	101
5.3.4	Ökonomische Bewertungsmethoden und Kostenannahmen .....	102
5.3.5	Weitere Kennzahlen zur Bewertung der Ergebnisse .....	104
5.3.6	Ergebnisvergleich und Diskussion .....	106
5.3.7	Zusammenfassung der Speicherbewertung in 50 MW direktverdampfenden Kraftwerken .....	116
5.4	Simulation eines Systems zur solaren Kraft-Wärme-Kopplung mit Latentwärmespeicher .....	118
5.4.1	Systemaufbau und Betriebsmodi .....	118
5.4.2	Simulationsrandbedingungen und Optimierungsparameter .....	120
5.4.3	Plausibilität des Systemsimulationsmodells .....	123
5.4.4	Ökonomische Bewertungsmethoden und Kostenannahmen .....	124
5.4.5	Ergebnisse und Diskussion .....	126
5.4.6	Zusammenfassung der Speicherbewertung in der solaren Kraft-Wärme-Kopplung .....	131
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang: Stoffwerte der verwendeten Speichermaterialien .....</b>	<b>137</b>
<b>B.</b>	<b>Anhang: Stoffwerte von Thermalölen .....</b>	<b>139</b>

---

---

<b>C. Anhang: Geometriedaten der Schneckenwärmeübertrager.....</b>	<b>140</b>
<b>D. Anhang: Bilder und Schema der Versuche am Schneckenwärmeübertragerteststand .....</b>	<b>143</b>
<b>E. Anhang: Zusatzinformationen zu den Versuchen am Teststand mit Kratzwärmeübertrager .....</b>	<b>145</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>