

# Experimentelle und numerische Untersuchung eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen

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

vorgelegt von  
REBECCA WEBER  
aus Esslingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. D.Eng/Auckland  
Hans Müller-Steinhagen  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. André Thess

Tag der mündlichen Prüfung: 2. August 2018

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

2018

# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein kombinierter Warmwasser-Sorptionswärmespeicher am Beispiel einer thermischen Solaranlage für die Trinkwassererwärmung betrachtet. Das Konzept des kombinierten Speichers zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Vorteile der beiden Speichertechnologien in idealer Weise ergänzen: Durch Adsorptionsprozesse lässt sich thermische Energie über beliebig lange Zeit nahezu verlustfrei speichern, mit dem Warmwasserspeicher ist eine hohe Leistungsentnahme möglich. Für die oben genannte Anwendung besteht das Ziel des Konzepts darin, die Versorgungssicherheit für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser außerhalb der Heizperiode vollständig auf solarer Basis sicherzustellen, damit der Heizkessel, der während dieser Zeit in der Regel mit geringem Nutzungsgrad betrieben wird, ausgeschaltet werden kann.

Der kombinierte Speicher wurde im Originalmaßstab in einer Laborumgebung aufgebaut, in der sich reale Betriebszustände nachbilden lassen. Anhand von experimentellen und numerischen Untersuchungen werden die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Speicherverhalten aufgezeigt und Ansatzpunkte für Optimierungen abgeleitet.

Im Vordergrund der experimentellen Untersuchungen stand, das Verhalten des Speichers während der Ad- und Desorption unter definierten Randbedingungen zu untersuchen, um die Funktionsfähigkeit des Konzepts zu demonstrieren, ein vertieftes Verständnis für die Vorgänge im Speicher zu erlangen und den Einfluss unterschiedlicher Größen auf das Betriebsverhalten zu beschreiben.

Mithilfe von CFD-Methoden wurden zwei Teilaspekte genauer betrachtet: Die Untersuchungen zum Wärmeeintrag in das Adsorbens während der Desorption machen deutlich, dass eine gleichmäßige Regeneration des Adsorbens auf hohem Temperaturniveau möglich ist. Bei der Untersuchung des Wärmeübergangs vom Sorptionswärmespeicher an den Warmwasserspeicher hat sich gezeigt, dass Strömungshindernisse in einem quer angeströmten Luftkanal einen Beitrag zur Anregung von Turbulenz und damit zur Erhöhung des Wärmeübergangs leisten können, wenngleich sich diese auf den hinteren Kanalbereich beschränkt.

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen und numerischen Untersuchungen wurde abschließend das Modell eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers parametrisiert und validiert. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer thermischen

Solaranlage mit kombiniertem Warmwasser-Sorptionswärmespeicher wurden mit diesem Modell Jahressimulationen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Ziel der vollständig solaren Versorgungssicherheit außerhalb der Heizperiode mit dem Konzept des kombinierten Speichers erreichbar ist, während konventionelle Warmwasserspeicher derselben Größe dies nicht leisten können.

# Abstract

The scope of the present work is a combined hot water and sorption store for thermal solar systems. The concept is demonstrated by the example of domestic hot water preparation. The two storage technologies complement each other in an ideal way: the sorption store is particularly suitable for long term storage without heat losses at high storage density, while the water store allows for high heat removal rates. The aim of the concept for the above named application is the securing of a completely solar based domestic hot water supply outside the heating period. The conventional boiler, that is usually operated with low efficiency during that time, could then remain out of operation.

The combined store has been realized in real size in a laboratory environment, where real operating conditions can be emulated. Based on experimental and numerical investigations, the relation between process parameters and the stores behaviour is depicted and approaches for optimization are given.

The main issue of the experimental investigations has been the determination of the combined stores behaviour during ad- and desorption operation under defined boundary conditions. In this way, the functionality of the concept should be demonstrated, a deeper insight into the processes inside the store should be provided and the influence of different parameters on the operation behaviour should be described.

CFD methods have been used to analyse two aspects in more detail: Investigations on the heat supply to the adsorbens during desorption show that a homogeneous regeneration of the adsorbens on high temperature level is possible. The investigation of the heat transfer from the sorption store to the water store showed, that turbulence promoters in an air channel can contribute to the stimulation of turbulence and therefore to the increase of heat transfer, although this is restricted to the downstream area of the channel.

Finally, based on the results of the experimental and numerical investigations, a model of a combined hot water and sorption store has been parameterized and validated. Annular simulations for a solar thermal system including a combined hot water and sorption store have been conducted with this model, to evaluate the thermal performance. The results show that the aim of a security of supply outside the heating period entirely on a solar basis is achievable with the combined store, while a system with conventional hot water store cannot provide this.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund . . . . .	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	2
1.3 Konzept des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers . . . . .	3
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens</b>	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Adsorption . . . . .	7
2.1.1 Adsorption . . . . .	7
2.1.2 Adsorbentien . . . . .	8
2.1.3 Adsorptionsisothermen . . . . .	9
2.1.4 Adsorptionenthalpie . . . . .	11
2.1.5 Adsorptionskinetik . . . . .	12
2.1.6 Energiespeicherdichte von Sorptionsmaterialien . . . . .	12
2.2 Wärmeübertragung und Druckverlust in durchströmten Kanälen . . . . .	14
2.2.1 Konvektiver Wärmeübergang . . . . .	14
2.2.2 Strömungsform . . . . .	16
2.2.3 Strömungshindernisse zur Anregung turbulenter Strömung . . . . .	18
2.2.4 Druckverlust . . . . .	20
2.2.5 Bewertungsgröße Effektivität . . . . .	20
2.3 Bewertungsgrößen thermischer Solaranlagen . . . . .	20
2.3.1 Kollektorstufenwirkungsgrad . . . . .	21
2.3.2 Speichernutzungsgrad . . . . .	21
2.3.3 Energiespeicherdichte . . . . .	22
2.3.4 Solarer Deckungsanteil . . . . .	22

2.3.5	Jährliche anteilige Energieeinsparung . . . . .	22
2.3.6	Nachheiztage . . . . .	23
2.3.7	Stagnationszeit . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Grundlagen der numerischen Berechnung</b>	<b>25</b>
3.1	Erhaltungsgleichungen . . . . .	25
3.1.1	Massenbilanz . . . . .	25
3.1.2	Impulsbilanz . . . . .	26
3.1.3	Energiebilanz . . . . .	26
3.2	Turbulenz . . . . .	26
3.2.1	Reynolds-Gleichungen . . . . .	27
3.2.2	Turbulenzmodelle . . . . .	28
3.2.3	Wandbehandlung . . . . .	29
3.3	Poröse Medien . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchung des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers</b>	<b>33</b>
4.1	Beschreibung der Versuchsanlage . . . . .	33
4.1.1	Kombinierter Warmwasser-Sorptionswärmespeicher . . . . .	34
4.1.2	Versuchsanlage . . . . .	37
4.1.3	Datenerfassung, Anlagenbetrieb und Versuchsauswertung . . . . .	39
4.2	Beladung des Radialstromadsorbers – Desorption . . . . .	41
4.2.1	Experimentelle Untersuchung der Desorption am Prototyp 1 . . . . .	42
4.2.2	Experimentelle Untersuchung der Desorption am Prototyp 2 . . . . .	50
4.3	Entladung des Radialstromadsorbers – Adsorption . . . . .	65
4.3.1	Experimentelle Untersuchung der Adsorption am Prototyp 1 . . . . .	65
4.3.2	Experimentelle Untersuchung der Adsorption am Prototyp 2 . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Numerische Untersuchung des Wärmetransports im Radialstromadsorber</b>	<b>83</b>
5.1	Temperaturverteilung im Festbett des Radialstromadsorbers bei der Desorption . . . . .	84
5.1.1	Modellierung und Randbedingungen . . . . .	84
5.1.2	Simulationsergebnisse und Vergleich mit experimentellen Daten . . . . .	85
5.2	Wärmeübergang im quer angeströmten Kanal mit Strömungshindernissen . . . . .	87
5.2.1	Wärmeübergang im Luftkanal des Prototypspeichers . . . . .	89
5.2.2	Auswahl eines Turbulenzmodells . . . . .	91
5.2.3	Kanal mit flügelartigen Strömungshindernissen (2D) . . . . .	96
5.2.4	Kanäle mit verschiedenen Strömungshindernissen (3D) . . . . .	102

<b>6</b>	<b>Bewertung der Leistungsfähigkeit eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers</b>	<b>107</b>
6.1	Modell des kombinierten Speichers	108
6.1.1	Modellierung des Ad- und Desorptionsprozesses	108
6.1.2	Kopplung zwischen Sorptionswärmespeicher und Warmwasserspeicher	110
6.2	Vergleich von Simulation und Experiment	111
6.3	Modell des Gesamtsystems	113
6.3.1	Vorgaben und Modellparameter	114
6.3.2	Systemregelung	114
6.4	Ergebnisse der Jahressimulationen	116
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>119</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
	<b>Anhang</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Versuchsauswertung</b>	<b>135</b>
A.1	Berechnung mittlerer Temperaturen	135
A.1.1	Mittlere Wassertemperatur	135
A.1.2	Mittlere Temperatur im Sorptionsmaterial	135
A.2	Berechnung der Massen- und Wärmeströme	135
A.2.1	Massenströme	135
A.2.2	Wärmeströme	136
A.3	Koeffizienten der Isothermgleichung nach Gorbach	139
<b>B</b>	<b>Ergänzungen zu Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>141</b>
B.1	Desorptionswärmeübertrager	141
B.2	Luft/Luft-Wärmeübertrager	141
B.3	Messgrößen	142
B.4	Testsequenz zur Entladung des Warmwasserspeichers	142
<b>C</b>	<b>Ergänzende Diagramme der Desorptionsexperimente</b>	<b>145</b>
C.1	Prototyp 1	145
C.2	Prototyp 2	147
<b>D</b>	<b>Simulation des quer angeströmten Luftkanals</b>	<b>149</b>
D.1	Netze und Netzunabhängigkeitsuntersuchungen	149
D.1.1	Glatte Kanal	149
D.1.2	Kanal mit halbkreisförmigen Strömungshindernissen	150

D.1.3	Kanal mit flügel förmigen Strömungshindernissen . . . . .	151
D.1.4	3D-Kanäle mit verschiedenen Strömungshindernissen . . . . .	152
D.2	Solvereinstellungen . . . . .	154
D.3	Berechnung lokaler und mittlerer Nusselt-Zahlen . . . . .	154
D.4	Korrelationen für $\lambda$ und $Nu$ im glatten Kanal . . . . .	155
<b>E</b>	<b>Ergänzende Diagramme zur Simulation</b> . . . . .	<b>157</b>
E.1	Profile der Geschwindigkeit und der turbulenten Intensität . . . . .	157
E.1.1	Variante $e/H = 0,3$ . . . . .	158
E.1.2	Variante $e/H = 0,4$ . . . . .	160
E.1.3	Variante $e/H = 0,5$ . . . . .	162
E.1.4	Variante $b/e = 6,67$ . . . . .	164
E.1.5	Variante $b/e = 5,6$ . . . . .	166
E.1.6	Variante $b/e = 5$ . . . . .	168