

Forschungsbericht BWPLUS

Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)

– KoWaSS –

**Entwicklung eines kombinierten
Warmwasser-Sorptionswärmespeichers
für thermische Solaranlagen**

R. Weber, S. Asenbeck, H. Kerskes

INSTITUT FÜR THERMODYNAMIK UND WÄRMETECHNIK (ITW)
UNIVERSITÄT STUTTGART

Förderkennzeichen: BWE27008

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Mai 2013

Kurzfassung

Durch den steigenden Anteil an fluktuierenden Energiequellen bei der Energieversorgung besteht ein Bedarf an geeigneten Technologien für die thermische Energiespeicherung. Die Weiterentwicklung sorptiver Energiespeicher, denen aufgrund ihrer hohen Speicherdichte und der verlustfreien Speicherung großes Potential zugeschrieben wird, bildet daher einen wichtigen Baustein für eine regenerative Energieversorgung. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein neues Verfahren zur thermischen Energiespeicherung entwickelt, das auf der Kombination eines Warmwasserspeichers und eines Sorptionswärmespeichers basiert. Dabei ergänzen sich die Vorteile der jeweiligen Speichertechnik, während die Nachteile reduziert werden. Mit dem Sorptionsspeicher lässt sich Energie quasi verlustfrei speichern während der Warmwasserspeicher eine hohe Leistungsentnahme ermöglicht. Das Konzept wurde am Beispiel einer thermischen Solaranlage für Trinkwassererwärmung untersucht. Ein offenes System mit direkt in den Warmwasserspeicher integrierter Sorptionseinheit wurde als vorteilhafteste Variante identifiziert und umgesetzt.

Die Funktionsfähigkeit des kombinierten Speichers wurde anhand von experimentellen Untersuchungen an einem Prototypspeicher demonstriert. Voruntersuchungen an einem Miniaturmodell des Sorptionsspeichers zeigten, dass eine konvektive Unterstützung des Wärmetransports bei der Desorption förderlich und erforderlich ist. Bei den Untersuchungen wurden Limitierungen des Speichers ersichtlich die mithilfe von CFD-Methoden im Detail analysiert wurden, um Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. So wurde beispielsweise ein neuer Desorptionswärmeübertrager vorgesehen um den Wärmeintrag bei der Desorption zu verbessern und das Potential von strukturierten Oberflächen zur Steigerung des Wärmeübergangs vom Sorptionswärmespeicher an den Warmwasserspeicher aufgezeigt. Es wurde ein Modell des kombinierten Speichers entwickelt, mit dem die thermische Leistungsfähigkeit im Vergleich zu Standardspeichern, d.h. reinen Warmwasserspeichern, untersucht wurde. Mit den derzeit kommerziell verfügbaren Sorptionsmaterialien weist der kombinierte Speicher im Vergleich zu reinen Warmwasserspeichern eine etwas höhere thermische Leistungsfähigkeit auf. Im Vergleich zum apparativen Aufwand ist der Nutzen für diese Anwendung einer solaren Trinkwassererwärmung für Einfamilienhäuser bisher noch gering. Da das Verfahren nicht auf ein bestimmtes Sorptionsmaterial beschränkt ist, könnte es sich aber in absehbarer Zeit auch für diese Anwendung lohnen, da der Nutzen mit dem Fortschritt der Materialentwicklung steigt.

Es bleibt festzuhalten, dass das Verfahren technisch und theoretisch interessant ist und sich potenziell für andere Anwendungen eignet, bei denen der apparative Aufwand beispielsweise aufgrund einer größeren Dimensionierung weniger ins Gewicht fällt oder bei denen die entsprechenden Geräte bereits in Teilen vorhanden sind. Es lässt sich grundsätzlich überall dort gut anwenden, wo kleine Energiemengen über längere Zeit bei niedriger Temperatur bevorratet werden sollen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Formelzeichen	V
1. Einleitung	1
2. Ziel des Forschungsvorhabens	1
3. Projektübersicht	2
4. Auswahl des Sorptionsmaterials	3
4.1 Stand der Materialforschung	3
4.2 Eingesetzte Sorptionsmaterialien	5
5. Auswahl des Anlagenkonzepts	6
5.1 Offene oder geschlossene Prozessführung	7
5.2 Integriert oder hydraulisch getrennt	8
5.3 Konstruktive Gestaltung und Funktion der Sorptionseinheit	8
6. Experimentelle Voruntersuchungen am Sorptionswärmespeicher im Miniaturmaßstab	10
6.1 Adsorption	11
6.1.1 Versuchsanlage	11
6.1.2 Parametervariation zum Adsorptionsverhalten	12
6.2 Desorption	15
6.2.1 Versuchsaufbau und Vorversuche	15
6.2.2 Parametervariation zum Desorptionsverhalten	17
6.2.3 Energieanteile der Desorption	19
7. Versuchsanlage mit Prototyp des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers	20
7.1 Aufbau und Funktion des Prototypspeichers	20
7.2 Beschreibung der Versuchsanlage	22
7.3 Datenerfassung und Steuerung der Versuchsanlage	24
7.4 Auswertung der Versuchsergebnisse	27
7.4.1 Messgrößen	27
7.4.2 Berechnung der Massenströme	27
7.4.3 Berechnung der Wärmeströme bei der Ad- und Desorption	28
7.5 Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Versuchsanlage	29
8. Experimentelle Untersuchung des Prototypspeichers	31
8.1 Prototypspeicher Version 1	31
8.1.1 Desorption	31
8.1.2 Adsorption	34
8.2 Prototypspeicher Version 2	35
8.2.1 Adsorption	35
8.2.2 Desorption	37
8.2.3 Leistungsentnahme aus dem Warmwasserspeicher	39

9.	Numerische Untersuchung des Sorptionswärmespeichers	42
9.1	Wärmeeintrag in das Speichermaterial	42
9.2	Wärmetransport vom Sorptionsspeicher in den Warmwasserspeicher.....	44
9.2.1	Voruntersuchungen unter Annahme von laminarer Strömung	45
9.2.2	Untersuchungen unter Annahme von laminarer Strömung	47
9.2.3	Untersuchungen unter Berücksichtigung der Turbulenz	48
9.3	Numerische Untersuchung der Adsorption	50
9.3.1	Adsorptionsmodell.....	50
9.3.2	Simulationsergebnisse	51
10.	Numerische Systemsimulation	52
10.1	TRNSYS-Modell des kombinierten Warmwasser-Sorptionwärmespeichers	52
10.1.1	Modellierung des Adsorptions- und Desorptionsprozesses mit PDEXPACK	52
10.1.2	Kopplung zwischen Sorptionsspeicher und Warmwasserspeicher	54
10.1.3	Erste qualitative Überprüfung der Systemsimulationen	55
10.2	Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten.....	56
10.3	Jahressimulationen	56
10.3.1	Vorgaben und Modellparameter	57
10.3.2	Systemregelung	59
10.3.3	Simulationsergebnisse	61
11.	Fazit.....	62
12.	Zusammenfassung und Ausblick	64
	Literatur.....	67
	Anhang.....	70
A	Sorptionmaterialien.....	70
A.1	Synthetischer Zeolith vs. natürlicher Zeolith	70
A.2	Kompositmaterialien	71

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A	m^2	Fläche
$b_{0,0}$	kg/kg ,	Parameter für Adsorptionsisothermen nach Gorbach
$b_{1..4,0}$	$mbar^{-1}$, $mbar^{-2}$	Parameter für Adsorptionsisothermen nach Gorbach
$b_{0,T}$, $b_{1..4,T}$	-	Parameter für Adsorptionsisothermen nach Gorbach
c_p	$J/(kgK)$	spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
D_{eff}^0	m^2/s	effektiver Diffusionskoeffizient
e	m	Rippenhöhe
f	-	Reibungsbeiwert
$fsav$	%	Anteilige Energieeinsparung
G_z	$kg/(m^2s)$	Querschnittsbelastung
h	J/kg	spezifische Enthalpie
Δh_{ads}	J/kg	Adsorptionenthalpie
H	J	Enthalpie
H	m	Kanalhöhe
k	$W/(m^2K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
K^{LDF}	$1/s$	Massenübergangskoeffizient
l	m	Länge
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	kg/mol	molare Masse
p	Pa	Druck
q_j	mol/kg	Adsorbensbeladung
q_j^*	mol/kg	Gleichgewichtsbeladung
Q	J	Energie
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	$J/(mol K)$	universelle Gaskonstante
R_p	m	Partikelradius
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
T_0	K	Referenztemperatur
u	m/s	Geschwindigkeit
v	m/s	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
x, y, z	m	kartesische Koordinaten
x	$kg_{H_2O}/kg_{tr.Luft}$	absolute Feuchte
X	$kg_{H_2O}/kg_{tr.Zeo}$	Adsorbensbeladung
y_j	mol/mol	molarer Anteil von Wasser in Luft

Griechische Buchstaben

α	$W/(m^2K)$	Wärmeübergangskoeffizient
ε_M	-	Emissivität
ε_W	-	Effektivität der Wärmeübertragung
ε_G	-	Gesamthohlraumanteil inklusive Hohlraumanteil der Partikel
ε_B	-	Porosität des Festbetts
η	-	Wirkungsgrad

ϑ	°C	Temperatur
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
μ	kg/(ms)	dynamische Viskosität
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_{Sch}	kg/m ³	Schüttdichte
φ	%	relative Feuchte

Indizes

ads	Adsorption
amb	Umgebung
aux	Nachheizung
aus	austretend
B	Festbett
ein	eintretend
konv	konventionell
eff	effektiv
g	Gas
ges / G	gesamt
GG	Gleichgewicht
Grenz	Grenztemperatur
j	Komponente j
Koll	Kollektor
max	maximal
M	Material
p	Partikel
quer	Querschnitt
s	Feststoff
sch	Schüttung
sol	Solarkreis
tr	trocken
V	auf das Volumen bezogen
w	Wasser
W	Wärmeübertragung
Zapf	Warmwasserzapfung
Zeo	Zeolith

Abkürzungen

AIPO	Aluminophosphate
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPC	Compound Parabolic Concentrator
Exp	Experiment
INC	Institut für nichtklassische Chemie
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
MOF	Metal organic frameworks
PDG	partielle Differentialgleichung
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
RSM	Reynolds-Spannungs-Modell
SAPO	Silico-Aluminophosphate
Sim	Simulation
SWS	Sorptionswärmespeicher

TC		Thermoelement
V1		Version 1 des Prototypspeichers
V2		Version 2 des Prototypspeichers
WWS		Warmwasserspeicher
WÜ		Wärmeübertrager
WVR		Wärmeverlustrate

Dimensionslose Kennzahlen

Nu	-	Nusselt-Zahl
Re	-	Reynolds-Zahl

1. Einleitung

Die thermische Energiespeicherung nimmt eine zentrale Rolle für eine effiziente, zukunftsorientierte und belastbare Energieversorgung ein. Insbesondere der Umbau der Energiewirtschaft mit zwangsläufig steigenden regenerativen Anteilen stellt vor dem Hintergrund einer größer werdenden Zahl von fluktuierenden Energiequellen die Notwendigkeit geeigneter Speichertechnologien heraus. Im Bereich der elektrischen Energieversorgung wie auch der Wärmebereitstellung wird an neuen Technologien gearbeitet, um den steigenden Speicherbedarf effektiv und kostengünstig zu decken. Von klassischen Anwendungen bis hin zum effizienten Wärmemanagement in Kraftfahrzeugen, insbesondere mit Elektroantrieb, werden kompakte und leistungsfähige Wärmespeicher immer wichtiger.

Im Bereich der thermischen Energiespeicherung rücken neben der Speicherung fühlbarer Wärme insbesondere physikalische und chemische Speichermechanismen in den Fokus der Wissenschaft. Die Nutzung von Phasenwechselmaterialien ist nach wie vor ein Forschungsschwerpunkt für Anwendungen mit geringer Temperaturdifferenz des Arbeitsmediums. Thermochemischen Speichern wird ein großes Potential zugesprochen, weil sie einerseits die größte Speicherkapazität haben und andererseits für einen großen Temperaturbereich eingesetzt werden können. Das gestiegene Interesse an dieser Technologie zeigt sich auf nationalen und internationalen Tagungen und Konferenzen, in denen zahlreiche Arbeiten zu dem Thema präsentiert werden (z.B. Expertenworkshop Thermische Energiespeicherung von PTJ/DFG und Eurosun Conference im Jahr 2010, International Research on Energy Storage Conference und ISES Solar World Congress im Jahr 2011).

Vor diesem Hintergrund ist das hier bearbeitete Forschungsvorhaben nicht nur eine technologische Weiterentwicklung von Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung, um deren thermische Leistungsfähigkeit und Kompaktheit sowie die Versorgungssicherheit zu verbessern. Ein wichtiges Antriebsmoment für diese Forschung ist, die Technologie der thermochemischen Wärmespeicherung an ausgewählten Fragestellungen gezielt voranzutreiben.

2. Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens KoWaSS ist es, die Technologie der adsorptiven Wärmespeicherung weiterzuentwickeln und die Leistungsmerkmale – hohe Energiespeicherdichte und geringe Wärmeverluste – auf Anwendungen zu erweitern, bei denen temporär hohe Wärmeentladeleistungen gefordert werden. Ein typisches Beispiel ist die solare Trinkwassererwärmung im häuslichen Bereich. Dieses Ziel kann durch die Kombination eines Sorptionswärmespeichers mit einem Warmwasserspeicher erreicht werden. Der Warmwasserteil stellt den konventionellen Speicherteil dar. Er steht für die kurzzeitige Wärmespeicherung zur Verfügung und ist für die Bereitstellung von hoher Entnahmelistung gut geeignet. Die Sorptionseinheit erweitert den Speicher um die Fähigkeit einer "Langzeit-Wärmespeicherung". Hier wird Überschusswärme verlustfrei für Zeiten gespeichert, in denen keine vollständige Deckung durch die herkömmliche Solaranlage möglich ist.

In diesem Vorhaben wird erstmals eine direkte Kopplung zwischen dem Sorptionsspeicher und einem Warmwasserspeicher erarbeitet. Dies hat mehrere Vorteile:

- Die Anbindung des Wärmespeichers an die bestehende Heizungstechnik bleibt unverändert erhalten, was eine Systemintegration deutlich vereinfacht.
- Die jeweiligen Vorteile der beiden Speicherverfahren (fühlbare Wärme, Sorption) können in idealer Weise miteinander kombiniert werden. Der Warmwasserteil ermöglicht die kurzfristige Wärmespeicherung und eine Wärmeübertragung mit hoher Übertragungsleistung. Der Sorptionsteil ermöglicht die verlustfreie bzw. verlustarme Wärmespeicherung von Überschussenergie.
- Feststoffspeicher haben generell den Nachteil, dass die Wärmeübertragungsleistung vergleichsweise gering ist. Während für die Gebäudebeheizung eine Entnahmelistung von wenigen Kilo-

watt ausreichend sein kann (in Abhängigkeit des Dämmstandards des Hauses), werden für die Trinkwassererwärmung Leistungen größer 20 kW benötigt. Durch die vorgeschlagene Kombination kann dieser Nachteil eliminiert werden, indem der Sorptionsteil kontinuierlich über einen längeren Zeitraum die Wärme mit kleiner Leistung an das Wasservolumen abgibt. Der Wasserteil fungiert quasi als integrierter Pufferspeicher.

Eine thermische Kopplung des Sorptionsspeichers und des Warmwasserspeichers ist aus mehrerer Hinsicht erforderlich. Zum einen wird eine tatsächlich "verlustfreie" Wärmespeicherung erst möglich, wenn auch die Wärmeverluste des Sorptionsspeichers, die in erster Linie während der Desorption entstehen, vom System genutzt werden können. Zweitens kann ein Feststoffspeicher zur Trinkwassererwärmung aus den oben beschriebenen Gründen nur in Verbindung mit einem Warmwasser-Pufferspeicher sinnvoll realisiert werden. Einen interessanten Lösungsansatz stellt die Integration des Sorptionsteils in den Warmwasserspeicher dar. Eine solche Integration ist mit anderen Speichermedien erfolgreich erprobt worden.

Das Prinzip eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers am Beispiel einer Solaranlage für die Trinkwassererwärmung ist in Abbildung 1 dargestellt.

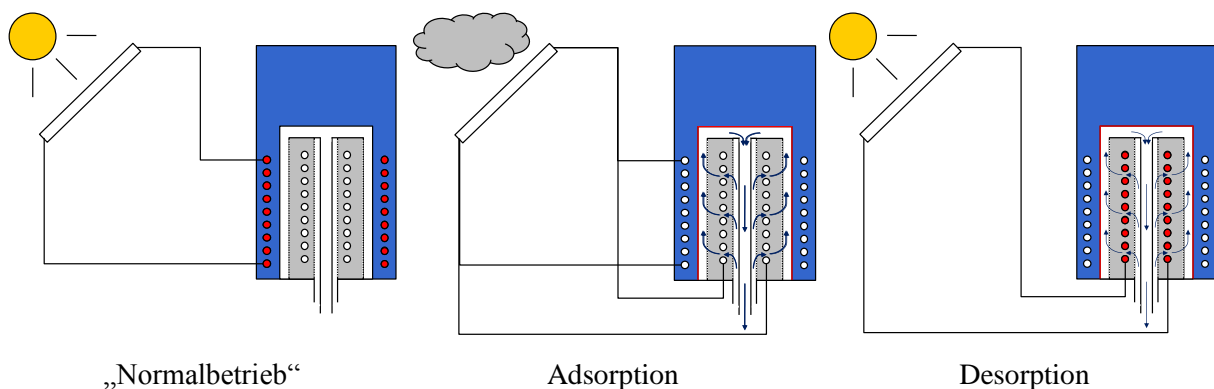


Abbildung 1: Prinzip des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers: wenn Strahlung vorhanden ist wird der Warmwasserspeicher wie bei einer gewöhnlichen thermischen Solaranlage beladen („Normalbetrieb“), während strahlungsarmen Perioden wird Wärme von der Sorptionseinheit an das Wasser übertragen (Adsorption), ist „überschüssige“ Strahlung vorhanden wird das Sorptionsmaterial regeneriert (Desorption)

3. Projektübersicht

Der folgende Abschnitt gibt einen zeitlich geordneten Überblick über die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Arbeiten.

Im ersten Zwischenbericht über das letzte Quartal des Jahres 2008 [17] wurden die geplanten Projektinhalte, Arbeitspakete und Vorgehensweisen vorgestellt. Inhalt des zweiten Zwischenberichts über das Jahr 2009 [18] waren experimentelle Voruntersuchungen an einem kleinen Radialstromadsorber im Miniaturmaßstab und konstruktive Überlegungen zu Auswahl und Umsetzung des Verfahrenskonzepts. Im Jahr 2010, über welches der dritten Bericht informiert [19], wurden Desorptionsversuche an dem Versuchsspeicher im kleinen Maßstab durchgeführt, es erfolgte die Installation des Solarkreises für den Prototypspeicher, der Wasserspeicher sowie der Sorptionswärmespeicher wurden gefertigt und mit Messtechnik ausgestattet und ein numerisches Modell des neuen Speicherkonzepts für die Systemsimulation wurde entwickelt. Im Jahr 2011 wurde für den Prototypspeicher die messtechnische Ausrüstung ergänzt und Kalibrierungen vorgenommen. An der Versuchsanlage erfolgten dann experimentelle Untersuchungen der Ad- und Desorption. Das Programm zur Messdatenerfassung wurde erweitert und eine Datei für die automatisierte Datenaufbereitung erstellt. Weiterhin wurden numerische

Untersuchungen des Sorptionswärmespeichers mithilfe von CFD [20] durchgeführt. Im letzten Projektjahr wurde die überarbeitete Version des Prototypspeichers experimentell untersucht wobei auch eine Leistungsentnahme aus dem Warmwasserspeicher durchgeführt wurde. Die CFD-Untersuchungen wurden fortgeführt und Systemsimulationen zur Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit vorgenommen.

4. Auswahl des Sorptionsmaterials

Eine schematische Darstellung der Sorptionsprozesse, wie sie für die thermische Energiespeicherung angewendet werden können sind in Abbildung 2 dargestellt. Als Adsorbens können grundsätzlich verschiedene Materialien zum Einsatz kommen, welche aufgrund ihrer Eigenschaften unterschiedlich gut für verschiedene Anwendungen geeignet sind.

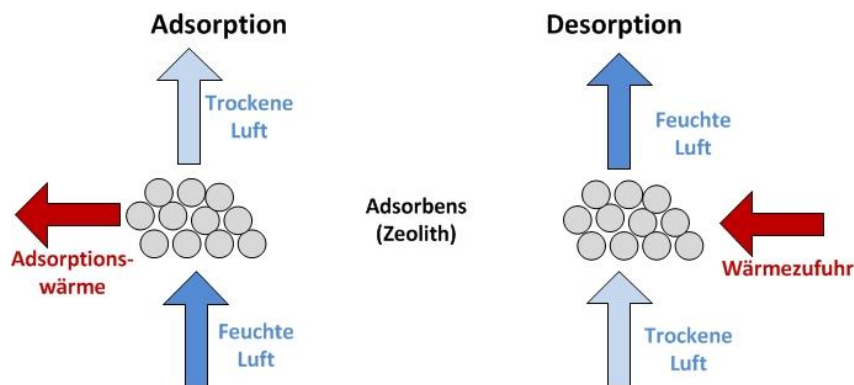


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Ad- und Desorptionsprozesses

Materialuntersuchungen werden von verschiedenen Forschungseinrichtungen durchgeführt (z.B. Fraunhofer ISE, ICN Leipzig, TH Wildau, ITW). Basierend auf dem veröffentlichten Stand der Technik wurden die zur Verfügung stehenden Adsorbentien analysiert und für den vorgeschlagenen Einsatzfall bewertet. Bei den verwendeten Adsorbentien wurde auf kommerziell verfügbare Materialien zurückgegriffen. Materialuntersuchungen waren im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht geplant.

Im Folgenden wird auf den Stand der Materialforschung eingegangen und einige mögliche Sorptionsmaterialien vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile erläutert bevor die in diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Sorptionsmaterialien beschrieben werden.

4.1 Stand der Materialforschung

Durch die Attraktivität der sorptiven Wärmespeicherung werden vermehrt auf nationaler und internationaler Ebene Materialentwicklungen durchgeführt, so dass zu erwarten ist, dass in naher Zukunft verbesserte sorptive Speichermaterialien zur Verfügung stehen. Diese Entwicklungen wurden aufmerksam beobachtet, zahlreiche Kontakte zu führenden Instituten die sich mit Materialentwicklung und Materialbewertung beschäftigen wurden hergestellt. Durch die aktive Mitarbeit in der Task 42 „Compact Thermal Energy Storage – Material Development and System Integration“ der internationalen Energieagentur (IEA) [13] ist ein aktueller Informationsstand gegeben. Zudem stehen eigene Erfahrungen aus vorangegangenen und parallel laufenden Projekten zur Verfügung [2], [16].

Die Größenordnung der Speicherdichten von Wasser, Silikagel, verschiedener Zeolithe sowie von Materialien für die Energiespeicherung durch Hydratation und von Kompositmaterialien sind in Abbildung 3 gegenübergestellt. Vor der Adsorption wurden die Materialien bei 180 °C und einer Feuchte von 1 g/kg regeneriert (Regenerationsbedingungen bei SAPO/AlPO und Cu-BTC nicht be-

kannt). Die Speicherdichte von Wasser bezieht sich auf eine Temperaturdifferenz von 50 K. Im Vergleich zu Wasser weisen synthetische Zeolithe eine um 2–3 Mal höhere Speicherdichte auf. Synthetischer Zeolith in Form von kugelförmigen Pellets ist in Abbildung 4 gezeigt. Natürlicher Zeolith schneidet aufgrund der geringeren Wasseraufnahme schlechter ab, die durch Verunreinigungen sowie den weniger gleichmäßigen kristallinen Aufbau hervorgerufen wird. Vergleichende Untersuchungen zu synthetischem und natürlichem Zeolith vom Typ 4A finden sich in Anhang A.1. Auch die Speicherdichte von Silikagel fällt aufgrund der niedrigeren Adsorptionenthalpie und Wasseraufnahme im Vergleich zu den synthetischen Zeolithen geringer aus. Ein großes Potential in Bezug auf die Speicherkapazität zeigen Materialien wie MgSO_4 , CaCl_2 oder CuSO_4 bei denen Energie nicht durch Sorptionsprozesse, sondern durch eine Hydratationsreaktion gespeichert wird. In reiner Form beziehungsweise in Form von Pulver sind diese Salze allerdings schwer zu handhaben, da sie beispielsweise agglomerieren oder sich verflüssigen oder Reaktionsgeschwindigkeit und Temperaturerhöhung stark von den Zuströmbedingungen abhängen. In Verbindung mit einem Träger, der entweder passiv sein kann (beispielsweise Tonminerale) oder aktiv am Speicherprozess beteiligt ist (beispielsweise Zeolithe) entstehen sogenannte Kompositmaterialien, mit denen die eben genannten Nachteile reduziert werden können. Composite werden zum momentanen Zeitpunkt als noch nicht ausgereift betrachtet und es besteht noch Forschungsbedarf, um deren Eigenschaften weiter zu optimieren. In Anhang A.2 wird beispielhaft ein Komposit aus MgSO_4 und Zeolith 4A als Träger beschrieben. Weiterführende Informationen und Untersuchungen finden sich beispielsweise in [3], [4] und [21]. Aluminophosphate (AIPO) oder Silico-Aluminophosphate (SAPO) sind ebenso wie metallorganische Gerüstmaterialien (MOFs, wie z.B. Cu-BTC) aufwändig in der Herstellung und sehr teuer. Auch deren Langzeitstabilität bedarf weiterer Untersuchungen. Eine Gegenüberstellung verschiedener neuer Sorptionsmaterialien findet sich in beispielsweise in [11], [14], [15].

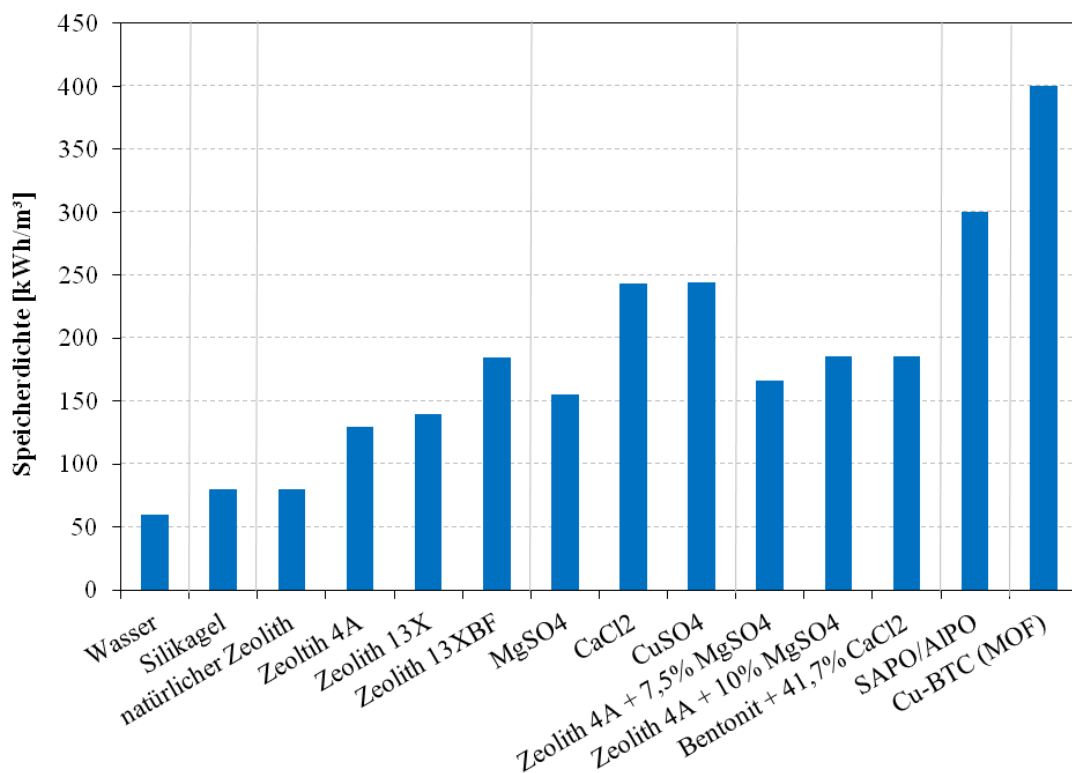


Abbildung 3: Größenordnung der Speicherdichten ausgewählter Materialien zur thermochemischen Wärmespeicherung (Wasser in Bezug auf $\Delta T = 50$ K)



Abbildung 4: Synthetisch hergestellter Zeolith in Kugelform (Kugeldurchmesser ca. 2 mm)

4.2 Eingesetzte Sorptionsmaterialien

Für die Sorptionseinheit des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers muss ein geeignetes Sorptionsmaterial ausgewählt werden. Bei diesem Forschungsvorhaben steht allerdings die Entwicklung eines funktionierenden Verfahrens für einen kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeicher an erster Stelle. Für die Entwicklung dieses Verfahrens steht dabei nicht die Art des Sorptionsmaterials im Vordergrund, da das zu entwickelnde Verfahren nicht an ein bestimmtes Sorptionsmaterial gebunden ist. Die Materialfrage ist daher vorerst von untergeordneter Bedeutung und wird zunächst zurückgestellt.

Die Überlegungen und experimentellen Untersuchungen bezüglich der grundsätzlichen Konzeptentwicklung wurden aus diesem Grund am Beispiel des Zeolith-Typs 4A durchgeführt. Wohlwissend dass leistungsfähigere Materialien auf dem Markt sind, zeichnet sich dieser Typ für die grundlegende Konzepterstellung durch einige Vorteile aus. Das Material wird großtechnisch hergestellt und ist vergleichsweise preiswert. Das Produkt aus Wasseraufnahmefähigkeit und Adsorptionseenthalpie ist hoch. Aus einem vorangegangenen Forschungsvorhaben [16] stehen umfangreiche eigene Erfahrungen zur Verfügung. Die Stoff- und Adsorptionseigenschaften sind gut bekannt und in zahlreichen Veröffentlichungen publiziert. Damit bietet es wichtige Voraussetzungen, die für eine sorgfältige Modellentwicklung wichtig sind.

Nach dem Abschluss der Konzeptentwicklung wurde experimentelle Untersuchungen mit dem leistungsfähigeren Zeolith 13XBF durchgeführt. BF steht für „binderfrei“ und bedeutet, dass die kugelförmigen Pellets keinen Binder enthalten und somit mehr Volumen für den eigentlichen Zeolith vorhanden ist. Zeolith 13XBF zeichnet sich im Vergleich zu Zeolith 4A durch eine höhere Wasseraufnahme und daraus resultierend durch eine höhere Speicherdichte aus. In diesem Projekt wurden die Zeolithe KÖSTROLITH® 13XBFK und KÖSTROLITH® 4AK der Firma CWK - Bad Köstritz verwendet [5]. In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die Sorptionsisothermen beider Zeolithe dargestellt. Für Zeolith 13XBF sind Messwerte aufgetragen. Für eine direkte Vergleichbarkeit der Gleichgewichtsbe-

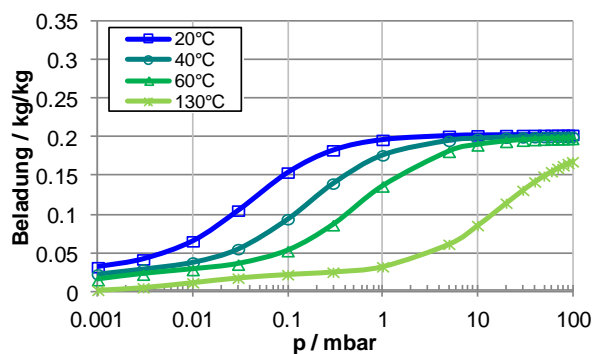


Abbildung 5: Sorptionsisothermen Zeolith 4A (Berechnung nach Gorbach [10])

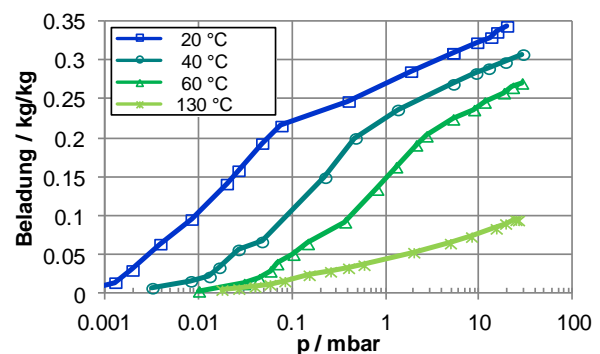


Abbildung 6: Sorptionsisothermen Zeolith 13XBF (Messung INC)

ladung sind die Isothermen für Zeolith 4A nach dem Ansatz von Gorbach [10] (vgl. Abschnitt 9.3.1) bei den gleichen Temperaturen dargestellt.

Die jeweilige Temperaturerhöhung durch Adsorption in einem längs durchströmten Festbett aus Zeolith 4A, Zeolith 13X und Zeolith 13XBF bei Wasserdampfpartialdrücken von 10 mbar und 20 mbar ist in Abbildung 7 gezeigt.

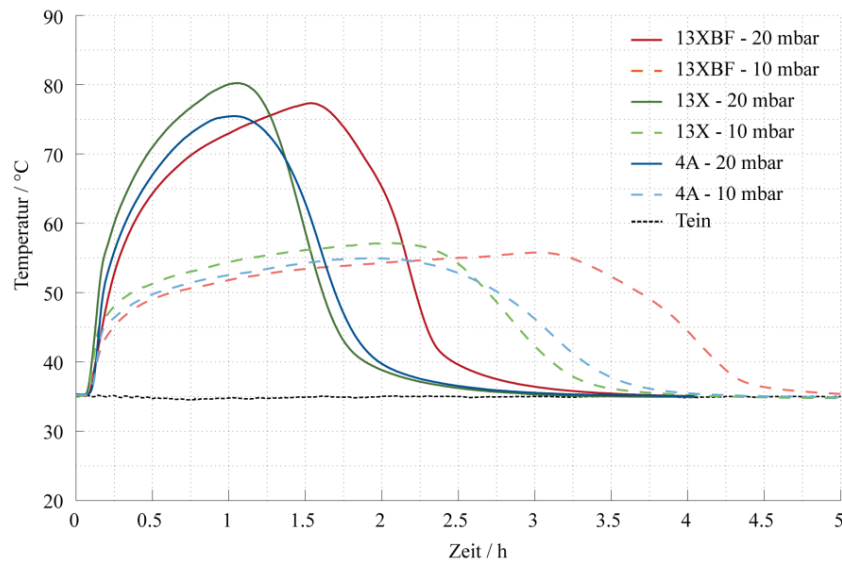


Abbildung 7: Gemessene Temperaturverläufe bei der Adsorption von Wasserdampf am Sorptionsmaterial Zeolith 4A, Zeolith 13X und Zeolith 13XBF, Wasserdampfpartialdrücke 10 mbar oder 20 mbar [22]

Abschließend soll nochmals festgehalten werden, dass das Verfahren nicht auf ein bestimmtes Sorptionsmaterial beschränkt ist. Wenn die Forschungen auf dem Gebiet der Materialuntersuchungen vorschreiten und Produkte mit verbesserten Eigenschaften und geringem Herstellungsaufwand auf den Markt kommen, können diese innovativen Materialien weitgehend problemlos im Sorptionsteil des kombinierten Speichers eingesetzt werden.

5. Auswahl des Anlagenkonzepts

In [17] wurden bereits verschiedene Varianten vorgestellt, die für die Kombination von Warmwasserspeicher und Sorptionsspeicher prinzipiell möglich sind:

- A Die Adsorption wird in einem geschlossenen Kreislauf bei Unterdruck durch Verdampfung mit Niedertemperaturwärme (solar) durchgeführt.
- B Die Adsorption wird in einem offen durchströmten System bei Umgebungsdruck durch Zufuhr von feuchter Luft durchgeführt.
- C Die thermische Kopplung der beiden Speichermedien erfolgt in direkter Weise durch Integration des Sorptionsspeichers in den Warmwasserspeicher
- D Die thermische Kopplung der beiden Speichermedien erfolgt in indirekter Weise. Dabei sind die beiden Speichermedien in einer baulichen Einheit zusammengefasst, jedoch thermisch voneinander getrennt. Der Wärmetransport erfolgt über interne Wärmeübertrager.

Die verschiedenen Varianten sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 schematisch dargestellt.

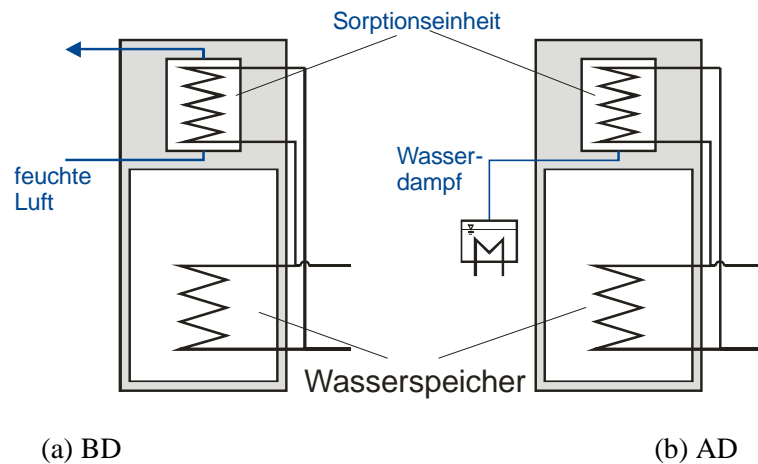


Abbildung 8: Speichervariante thermische Trennung, offener (a) und geschlossener (b) Prozess

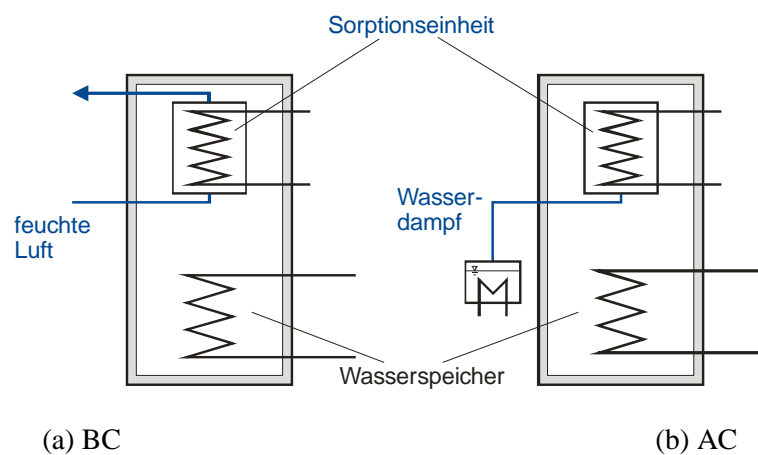


Abbildung 9: Speichervariante direkte Integration, offener (a) und geschlossener (b) Prozess

5.1 Offene oder geschlossene Prozessführung

Unter dem Aspekt, dass die Sorptionseinheit möglichst einfach aufgebaut und kostengünstig herzustellen ist, bietet die offene Prozessführung deutliche Vorteile. Für den Adsorptionsvorgang (Wärmefreisetzung) kann feuchte Umgebungsluft angesaugt und durch das Sorptionsbett geleitet werden. Die frei werdende Adsorptionswärme wird über den gleichen Luftstrom transportiert und der Wärmesenke zugeführt. Nachteilig ist, dass der benötigte Volumenstrom zur Erzielung einer gewissen Heizleistung relativ hoch ist. Bei durchströmten Schüttungen kann dies schnell zu einem ungewünscht hohen Druckverlust und damit zu einer hohen Gebläseleistung führen. Um diesem Effekt entgegen zu wirken sollte der durchströmte Querschnitt möglichst groß und der Strömungsweg möglichst gering sein. In industriellen Prozessen werden deshalb häufig sogenannte Radialstromadsorber eingesetzt. Die Wärmeeinbringung für die Desorption kann über einen integrierten Wärmeübertrager erfolgen. Der relativ schlechte Wärmetransport im Festbett kann durch einen geringen Luftstrom verbessert werden.

Ein geschlossenes System wurde beispielsweise in [31] realisiert. Die geschlossene Prozessführung setzt voraus, dass Wasserdampf erzeugt wird. Das heißt, zusätzlich zum Adsorber wird eine Verdampfer/Kondensator-Einheit inklusive Vorratsbehälter für flüssiges Wasser benötigt. Um mit Niedertemperaturwärme verdampfen zu können, muss das gesamte System im Unterdruck betrieben werden. Die Wärmeein- und -auskopplung erfolgt mittels Wärmeübertrager. Der Wärmetransport im Festbett erfolgt lediglich durch Wärmeleitung. Um hohe Temperaturgradienten zwischen Feststoff und Wärmeträger-

medium zu vermeiden sind aufwendige Wärmeübertrager notwendig. Die für die Verdampfung des Wassers benötigte Wärme kann prinzipiell von den Solarkollektoren geliefert werden. Dies hat jedoch die Einschränkung, dass der Adsorptionsprozess nur ablaufen kann, wenn die solare Einstrahlung auf die Kollektoren entsprechend hoch ist. Insgesamt ist das geschlossene Verfahren apparativ aufwendiger und weniger flexibel als die offene Prozessführung.

5.2 Integriert oder hydraulisch getrennt

Bezüglich der Kopplung von Warmwasserspeicher und Sorptionsspeicher besitzt die direkte Integration des Sorptionsteils in dem Warmwasserteil wesentliche Vorteile: Die während und nach der Desorption abgegebene Wärme wird an den umgebenden Wasserraum abgegeben und bleibt somit dem System erhalten. Dies führt zu einer weiteren Annäherung an das Ideal einer verlustfreien Speicherung. Eine Wärmedämmung für den Sorptionsspeicherteil kann entfallen. Außerdem führt die Integration des Sorptionsspeichers in den Wasserspeicher zu einer sehr kompakten und platzsparenden Einheit. Die Realisierung dieses Konzepts setzt voraus, dass die Desorption des Sorptionsmaterials, eingetaucht in einem Wasserspeicher, überhaupt möglich ist, es also gelingt den Feststoff auf die benötigte hohe Temperatur (bis 180 °C) aufzuheizen, ohne dass das umgebende Wasser zu Sieden beginnt. Eine Wärmedämmung des inneren Behälters ist nicht zweckmäßig, da während der Adsorption die Wärme aus dem Sorptionsspeicher über die Behälterwandung an das umgebende Wasser übertragen werden soll.

Der hier verfolgte Lösungsansatz sieht folgendermaßen aus: Durch die Einbringung eines Luftspalts zwischen Sorptionsmaterial und Behälterwand kann der Wärmetransport durch Wärmeleitung im Feststoff an die Behälterwand und damit an das umgebende Wasser verhindert werden. Die thermische Entkopplung ist notwendig, um das Sorptionsmaterial auf die benötigten Temperaturen von deutlich über 100 °C aufheizen zu können. Der Wärmetransport zwischen dem aufgeheizten Feststoff und der Behälterwand erfolgt nun nur noch durch Strahlung und durch den desorbierten Wasserdampf. Der Wasserdampf kondensiert an der „gekühlten“ Behälterwand, wodurch die freiwerdende Kondensationswärme an das umgebende Wasser abgeführt wird. Wird das Sorptionssystem bei Umgebungsdruck betrieben, liegt die maximale Kondensationstemperatur bei 100 °C.

Diese Überlegungen zeigen, dass das Radialstromkonzept bereits die notwendigen konstruktiven Voraussetzungen für die Durchführung der Adsorption und Desorption im integrierten Speicher mitbringt. Neben den bereits diskutierten Vorteilen der offenen Prozessführung, scheint damit auch die Integration des Sorptionsspeichers in den Warmwasserspeicher möglich zu sein. Die in Abschnitt 6.2 dargestellten experimentellen Untersuchungen bestätigen die Richtigkeit dieser Überlegungen.

5.3 Konstruktive Gestaltung und Funktion der Sorptionseinheit

Der Sorptionsspeicher wird als eigenständige Konstruktionseinheit aufgebaut, die durch eine Flanschverbindung in einen konventionellen Warmwasserspeicher integriert werden kann. Abbildung 10 zeigt im linken Bild den in den Warmwasserspeicher integrierten Sorptionsspeicher. Die Sorptionseinheit, bei der Adsorption und bei der Desorption, ist rechts dargestellt. Die Sorptionseinheit ist als Radialstromadsorber mit einem Volumen von ca. 100 l ausgeführt. Bei Verwendung kommerzieller Adsorbentien wie Zeolith 4A wird damit eine Speicherkapazität von ca. 12 bis 15 kWh erreicht. Diese ist ausreichend für die Erwärmung von etwa 300–370 l Trinkwasser.

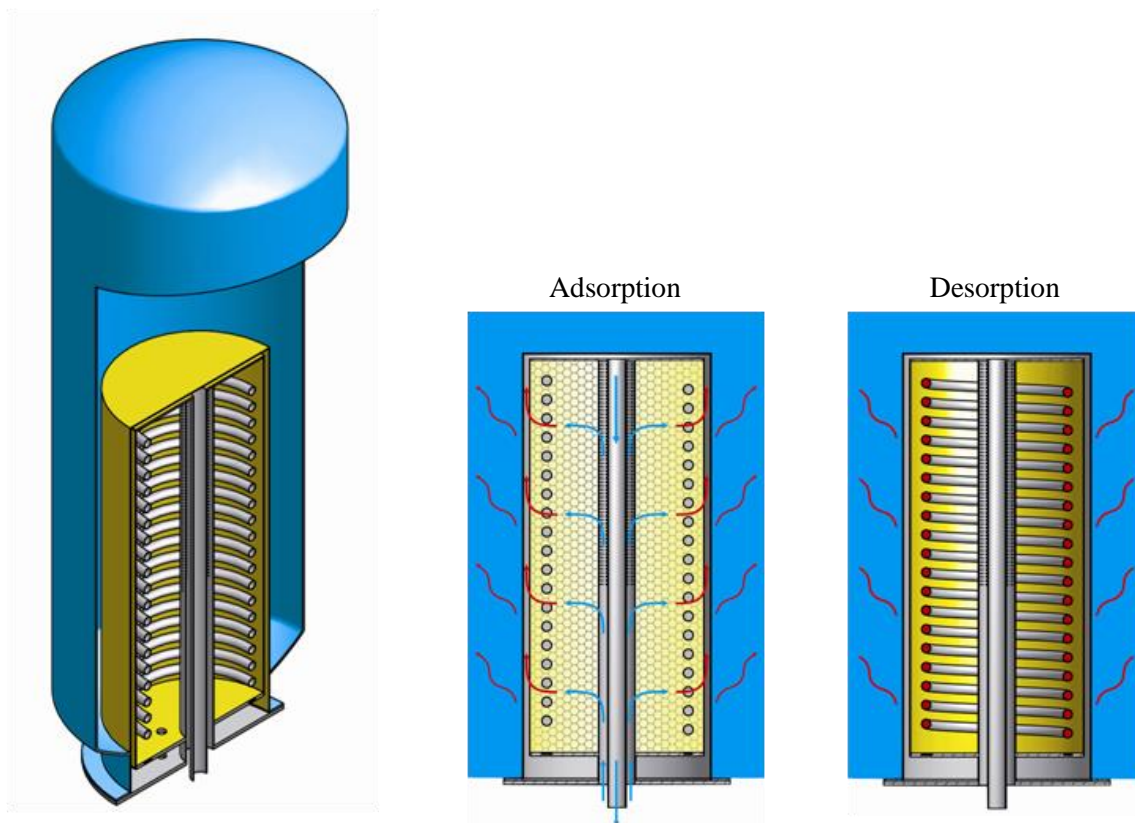


Abbildung 10: Warmwasserspeicher mit integrierter Sorptionseinheit (links), schematische Darstellung der Sorptionseinheit bei der Adsorption und bei der Desorption (rechts)

Zur Beschreibung der Funktionsweise der Sorptionseinheit wird zunächst der Adsorptionsfall betrachtet:

In der Mitte befindet sich ein Koaxialrohr, in dessen äußerem Ringspalt angesaugte feuchte Umgebungsluft eintritt und nach oben strömt. Die äußere Wandung des Koaxialrohrs besteht aus einem Metallgewebe, so dass die feuchte Luft radial durch den Adsorptionsbereich (gelb eingefärbter Bereich) strömt. Die Außenwandung des inneren Behälters, welcher das Sorptionsmaterial enthält, besteht ebenfalls aus einem feinmaschigen Drahtgeflecht, so dass die Luft nach Durchströmen des Sorptionsbereichs in den Ringspalt zwischen Sorptionsbehälter und äußerem Behälter (grau eingefärbter Bereich) eintritt. In diesem Ringspalt sammelt sich die Luft und strömt zum oberen Deckel der Sorptionseinheit. Im inneren Rohr des Koaxialrohres strömt die Luft nach unten und tritt aus der Adsorptionseinheit aus. Bei der Durchströmung des Sorptionsbereichs wird die Feuchtigkeit von dem Sorptionsmaterial adsorbiert. Durch die freiwerdende Adsorptionenthalpie wird der Luftstrom aufgeheizt. Die resultierende Temperaturerhöhung beträgt zwischen 15 und 40 Kelvin und ist abhängig von der Eintrittsluftfeuchte und der Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 6.1). Bei der Durchströmung des Ringspalts wird die Wärme an das die Sorptionseinheit umgebende Wasser abgeführt. Für eine angestrebte Heizleistung von einem Kilowatt ist ein Luftstrom von ca. $100 \text{ m}^3/\text{h}$ bei sommerlichen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$, relative Feuchte 50 %) notwendig. Der resultierende Druckverlust beim Durchströmen der Sorptionseinheit beträgt ca. 60 Pa. Das heißt, die Durchströmung kann mit energiesparenden Gleichstromlüftern realisiert werden.

Die Behälteroberfläche, die für den Wärmetransport an das umgebende Wasser zur Verfügung steht beträgt bei einem zylinderförmigen Mantel ca. $1,4 \text{ m}^2$. Um eine Leistung von einem Kilowatt an das

Wasser zu übertragen, müssen hohe Wärmeübertragungskoeffizienten oder zusätzliche Übertragungsflächen realisiert werden. Außerdem ist es für die Effizienz des Verfahrens wichtig, dass die Temperaturdifferenz zwischen ein- und austretendem Luftstrom so gering wie möglich ist. Diese Themen werden in Kapitel 8.2 und 9.2 behandelt.

Die Desorption des Sorptionsmaterials soll mit der Überschusswärme der Solarkollektoren realisiert werden. Während eine konventionelle Solaranlage bei geringer Wärmeentnahme und gleichzeitig hoher Solarstrahlung in Stagnation geht, wird nun das Kollektorfeld verwendet, um das Sorptionsmaterial zu trocknen. Dass die solare Regeneration von Zeolithen mit handelsüblichen CPC-Vakuumröhrenkollektoren möglich ist, konnte bereits in dem Forschungsvorhaben MonoSorp [16] gezeigt werden. In die Sorptionseinheit ist ein Wärmeübertrager eingebaut, der das Sorptionsmaterial solarthermisch aufheizt. Bei Temperaturen von 180 °C beträgt der Wirkungsgrad der genannten Kollektoren noch ca. 40 %. Bei einer Kollektorfläche von 4,6 m² steht somit eine Desorptionsleistung von ca. 1,8 kW zur Verfügung, abzüglich der Rohrleitungsverluste. Damit beträgt die Desorptionsdauer ca. 8–10 Stunden. Der aus dem Sorptionsmaterial austretende Wasserdampf kondensiert an der kalten Behälterwand und wird durch einen Ablauf im Boden der Sorptionseinheit abgeführt. Aufgrund des sehr hohen Wärmeübergangs kann die Kondensationsenthalpie an das umgebende Wasser abgegeben und damit näherungsweise vollständig zurückgewonnen werden.

6. Experimentelle Voruntersuchungen am Sorptionswärmespeicher im Miniaturmaßstab

Vor dem Bau eines Prototypspeichers im Originalmaßstab wurden zunächst Vorversuche an einem Sorptionsspeicher in verkleinertem Maßstab durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit des Konzepts zu prüfen. Mit diesen Versuchen wurden zum einen Erkenntnisse über das Adsorptionsverhalten in einer radial durchströmten Schüttung gewonnen. Desweiteren musste geklärt werden, inwiefern eine Desorption im Hinblick auf die in Abschnitt 5.2 angesprochene Problematik der hohen Desorptionstemperatur möglich ist, wenn sich der Sorptionsspeicher in einem Wasserspeicher befindet. Im Folgenden wird dieser Speicher in Abgrenzung zum späteren Prototypspeicher als Versuchsspeicher bezeichnet. Der Versuchsspeicher sowie dessen Durchströmung mit Umgebungsluft ist in Abbildung 11 gezeigt.

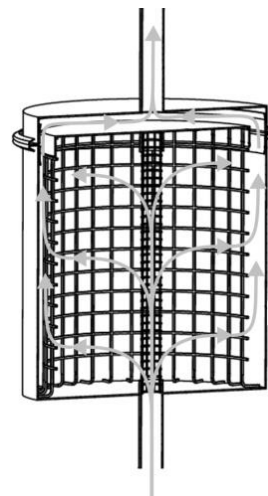
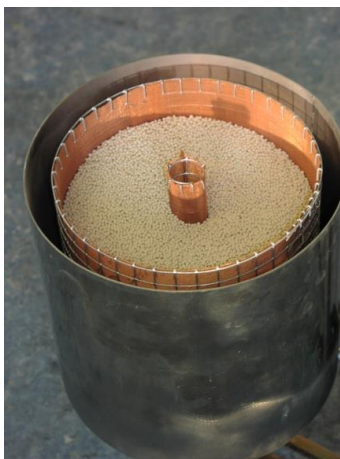


Abbildung 11: Radialstromadsorber: Foto der Versuchsanordnung (links), schematische Darstellung der Durchströmung (rechts)

6.1 Adsorption

Die Adsorption von Wasserdampf am Adsorbens Zeolith 4A in axial durchströmten Festbetten ist gut bekannt. Die Laborversuche geben Aufschluss über die Eigenschaften bei der Sorption in einem radial durchströmten Festbett.

6.1.1 Versuchsanlage

Der Aufbau der Versuchsanlage ist schematisch in Abbildung 12 dargestellt. Der Sorptionspeicher, der in Abbildung 13 gezeigt ist, hat eine Höhe von 20 cm, der Außendurchmesser beträgt ebenfalls 20 cm. Der Versuchsspeicher ist an das Druckluftnetz angeschlossen. Die Dosierung des Volumenstroms erfolgt mit einem Schwebekörper-Durchflussmesser. Ein Teilstrom der Luft wird über eine Fritte durch ein Wasserbad geleitet, wodurch sich die Luftfeuchtigkeit einstellen lässt. Zur Regelung der Lufttemperatur am Eintritt des Behälters sind die Zuleitungen zum Sorptionspeicher elektrisch beheizt. Die Zu- und Ableitungen des Sorptionspeichers sind wärmeisoliert. An Ein- und Austritt des Speichers werden jeweils Temperatur und relative Feuchte gemessen, in der Adsorbenschüttung sind weitere 12 Thermoelemente angebracht (siehe Abbildung 14). In Abbildung 15 ist ein beispielhaftes Adsorptionsexperiment gezeigt. In diesem Diagramm sind die Temperaturprofile in der Schüttung sowie die absolute Feuchte am Ein- und Austritt des Behälters über der Zeit dargestellt. Im nebenstehenden Schnitt durch den Sorptionspeicher ist die Position der 12 Temperaturmessstellen in der Schüttung ersichtlich. Die radiale Position der Messstellen wird durch die Farbe, die vertikale Position durch die Kurvenart (durchgezogen, gestrichelt, gestrichpunktet) angezeigt. Grau dargestellt und auf die rechte Achse bezogen sind die Werte der absoluten Feuchte an Ein- und Austritt.

Bei der Durchströmung der Schüttung mit feuchter Luft wird Wasserdampf zum Sorptionsmaterial transportiert. Der Wasserdampf wird adsorbiert wobei die Adsorptionenthalpie frei wird. Über die Temperaturerhöhung in der Schüttung lässt sich der Verlauf der Adsorption verfolgen. Mit der Zeit wandert die Adsorptionsfront durch die Schüttung. Der Durchbruch kennzeichnet sich durch einen starken Anstieg der Feuchte am Austritt, der in Abbildung 15 nach ca. 17 Stunden erfolgt. Der Sorptionspeicher fasst ein Adsorbensvolumen von etwa 4 Litern. Bei einer Schüttdichte von 650 kg/m^3 entspricht dies einer Masse von 2,6 kg trockenen Zeoliths. Wenn die Desorptionstemperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ betrug nimmt Zeolith 4A bei nahezu vollständiger Beladung 18 Gew.% Wasser auf, was einer Wasserbeladung von knapp 120 kg/m^3 entspricht. Da pro Kilogramm adsorbiertem Wasser etwa 1 kWh frei wird, resultiert eine Speicherdichte von ca. 120 kWh/m^3 .

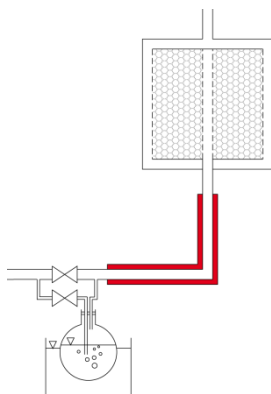


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

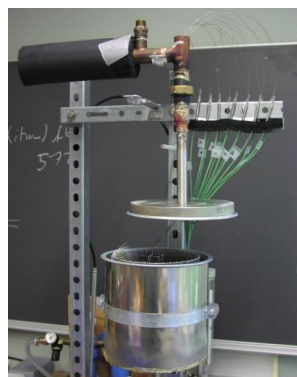


Abbildung 13: Geöffneter Radialstromadsorber

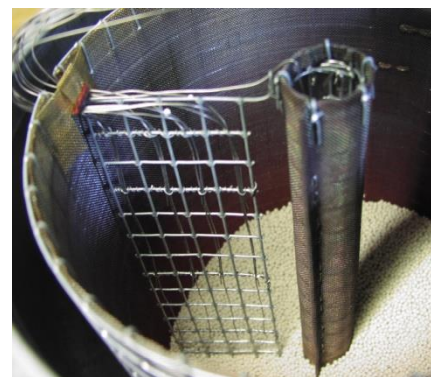


Abbildung 14: Temperaturmessung im Zeolithbett

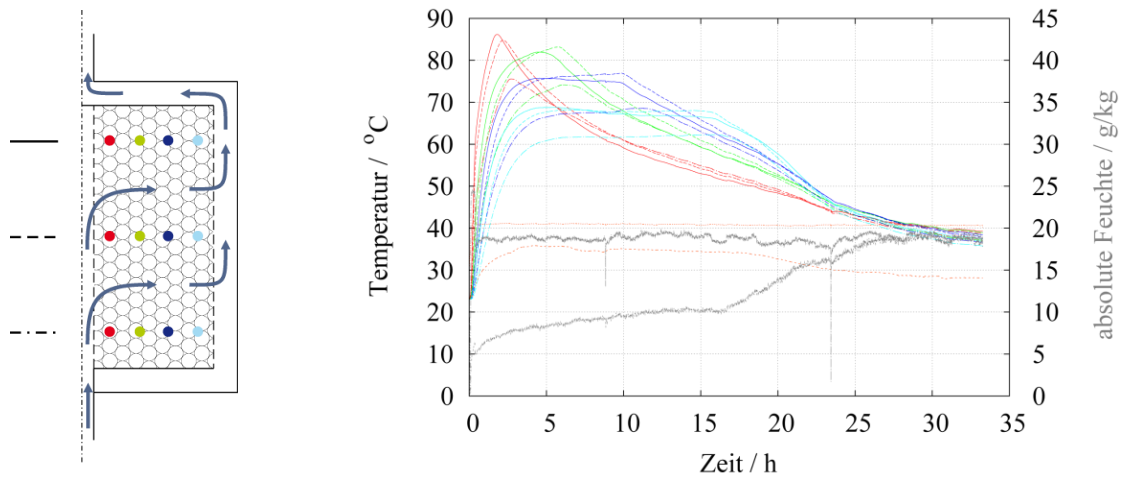


Abbildung 15: Luftvolumenstrom $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, Temperatur der eintretenden Luft $41 \text{ }^\circ\text{C}$, absolute Feuchte der eintretenden Luft $18,5 \text{ g/kg}$

6.1.2 Parametervariation zum Adsorptionsverhalten

An der Versuchsanlage wurden Adsorptionsversuche unter Variation der wesentlichen Einflussparameter wie der Eintrittstemperatur, der absoluten Feuchte am Eintritt und des Luftvolumenstroms durchgeführt. Einige Versuche und deren Randbedingungen sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Zwischen den Adsorptionsversuchen erfolgte jeweils eine Desorption des Adsorbens, indem die Schüttung für 32 Stunden mit heißer, trockener Luft durchströmt wurde. Die Temperatur am Speichereintritt betrug dabei $180 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabelle 1: Parametervariation

Versuchsnummer		9	3	13	15	11	13	15	23
Volumenstrom	m^3/h	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Eintrittstemperatur	$^\circ\text{C}$	23	23	25	41	25	25	41	41
absolute Feuchte	g/kg	8,0	8,5	17,0	18,5	7,5	17,0	18,5	16,5

Generell zeigt sich bei den Adsorptionsversuchen das erwartete Verhalten. Je geringer die absolute Feuchte am Eintritt bei ansonsten gleichen Eintrittsbedingungen ist, desto kleiner fällt die Temperaturerhöhung aus und desto später erfolgt der Durchbruch. In Abbildung 16 und in Abbildung 17 sind zwei Versuche mit unterschiedlichen absoluten Feuchten dargestellt. Die Farbe und die Art der Kurven in diesem und den folgenden Diagrammen sind in Abbildung 15 den Positionen der Temperatursensoren zugeordnet. Bei kleinerem Volumenstrom wird, bei gleichzeitig konstanter Eintrittstemperatur und absoluter Feuchte, pro Zeit eine kleinere Wassermenge zugeführt. Daraus resultiert eine geringere Temperaturerhöhung und die Zeit bis zum Durchbruch der Adsorptionsfront steigt. Ein Vergleich der Temperaturverläufe bei unterschiedlichem Volumenstrom ist in Abbildung 18 und Abbildung 19 gegeben. Die Temperatur der eintretenden Luft wurde bei diesen Versuchen noch nicht mithilfe der Heizung eingestellt, weswegen die Eintrittsbedingungen nicht vollständig konstant sind. Ab Versuch Nr.13 wurde die Eintrittstemperatur über die Heizung geregelt.

Einfluss der Feuchte

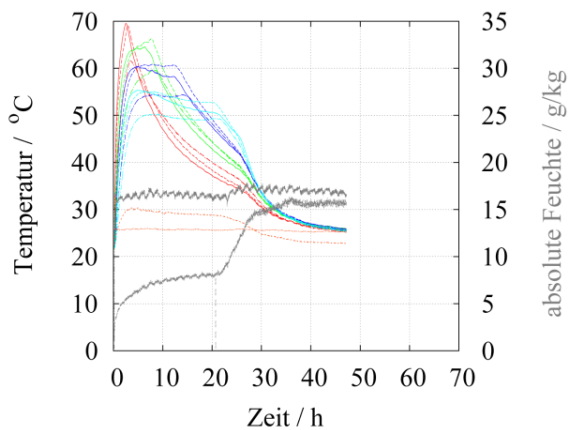


Abbildung 16: Nr. 13, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 17 \text{ g/kg}$

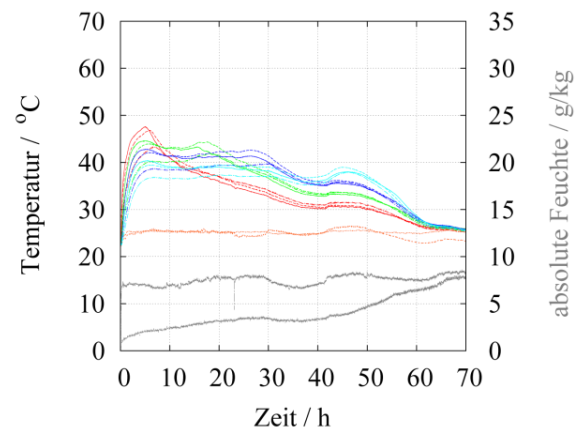


Abbildung 17: Nr. 11, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 7,5 \text{ g/kg}$

Einfluss des Volumenstroms

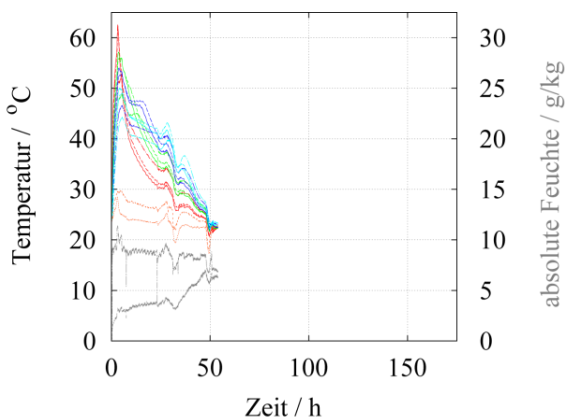


Abbildung 18: Nr. 3, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 8,5 \text{ g/kg}$

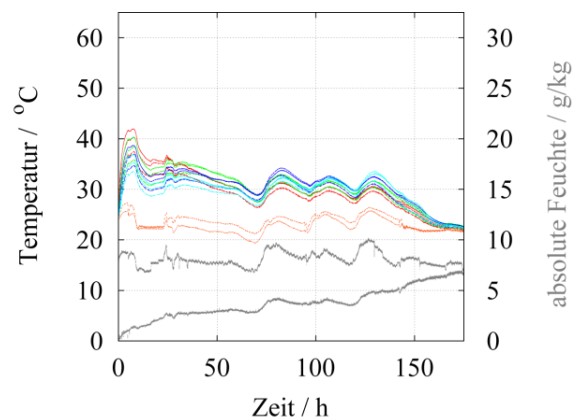


Abbildung 19: Nr. 9, $\dot{V} = 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 8 \text{ g/kg}$

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist gezeigt, dass sich die Temperaturverläufe bei einer höheren Eintrittstemperatur nach oben verschieben. Die Temperaturerhöhung in Bezug auf die Eintrittstemperatur bleibt dabei in etwa gleich.

In axial durchströmten, gut wärmegeämmten Festbetten ist die maximal erreichte Temperaturerhöhung an allen axialen Positionen etwa gleich groß. Anders verhält es sich im Radialstromadsorber. Hier wird ein deutlicher radialer Temperaturgradient gemessen. Je weiter sich die Messstelle am Rand des Behälters befindet, desto niedriger ist die Temperatur. Dies lässt sich auf den Einfluss der Temperatur der Behälterwand zurückführen. Wird der Sorptionsbehälter gedämmt, verringert sich der Wärmetransport an die Umgebung, die Wandtemperatur steigt und der radiale Temperaturgradient in der Schüttung fällt geringer aus.

Bei Versuchen mit gedämmtem Behälter werden an den äußeren Messstellen höhere Temperaturen erreicht. In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind die Temperaturverläufe für den ungedämmten und gedämmten Speicher dargestellt. Die Dämmung besteht aus Mineralwolle mit einer Dicke von 8 cm.

Einfluss der Eintrittstemperatur

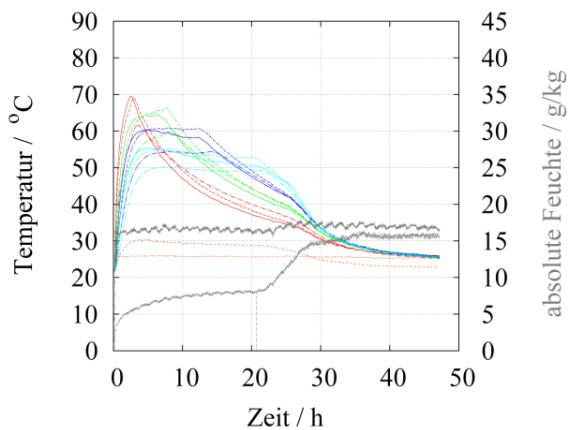


Abbildung 20: Nr. 13, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 17 \text{ g/kg}$

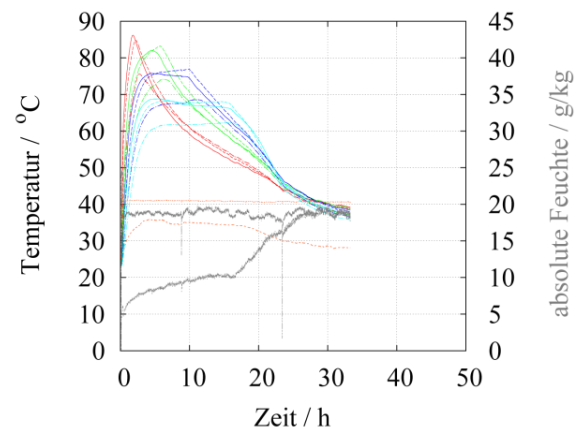


Abbildung 21: Nr. 15, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 18,5 \text{ g/kg}$

Einfluss der Wandtemperatur

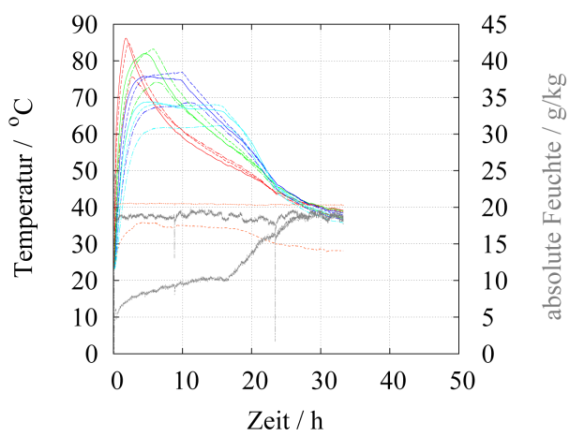


Abbildung 22: Nr. 15, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 18,5 \text{ g/kg}$, ohne Dämmung

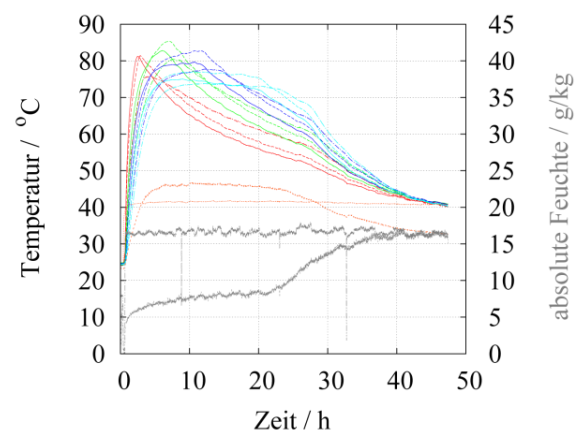


Abbildung 23: Nr. 23, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $x = 16,5 \text{ g/kg}$, mit Dämmung

Ein Vergleich der Temperaturverläufe in den drei horizontalen Ebenen ergibt, dass die gemessenen Temperaturen an den unteren Messtellen (Strichpunktlinie) niedriger sind, als die in der mittleren und oberen Ebene. In Abbildung 24 sind zur besseren Übersicht nur die Verläufe der drei inneren Messstellen gezeigt. Mögliche Erklärungen für dieses Verhalten sind zum einen größere Wärmeverluste über den Boden des Behälters als über den Deckel oder eine ungleichmäßige Durchströmung der Schüttung.

Die Versuche zeigen, dass eine Variation der Parameter das Adsorptionsverhalten beeinflusst. Die abgegebene Leistung des Adsorbens und das lokale und zeitliche Temperaturprofil sind von der zugeführten Wassermenge pro Zeit abhängig. Die Einstellung der zugeführten Wassermenge ist durch Variation der Eintrittsfeuchte oder des Volumenstroms möglich. Die aufgenommene Wassermenge und die abgegebene Wärme sind dagegen weitgehend unabhängig von den Strömungsbedingungen.

Für einen optimierten Betrieb des Sorptionsspeichers bleibt als Steuerungsparameter der Volumenstrom, da die Feuchte der genutzten Umgebungsluft nicht beeinflusst werden kann.

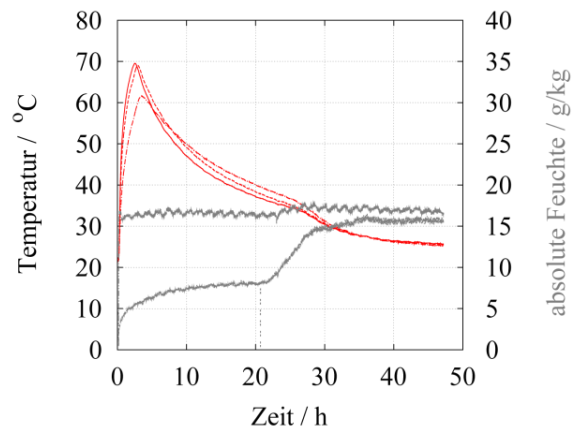


Abbildung 24: Nr. 13, $\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $x = 17 \text{ g/kg}$

6.2 Desorption

Auch die Desorption, also die Regeneration des Sorptionsmaterials, wurde im verkleinerten Maßstab untersucht.

6.2.1 Versuchsaufbau und Vorversuche

Um das Zusammenwirken von Sorptions- und Warmwasserspeicher während der Desorption zu untersuchen erfolgte ein Umbau der Versuchsanlage. Der Sorptionsspeicher wurde am Eintritt abgedichtet und bis zum oberen Rand in einen Wasserspeicher getaucht. In Abbildung 25 ist gezeigt wie der Sorptionswärmespeicher (a) in einen Wasserspeicher mit Schauglas (b) eingehängt wird (c). Der Sorptionsspeicherdeckel wurde gedämmt. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 26 gezeigt.

Die Wärmezufuhr für die Desorption soll im Prototypenspeicher nicht über die Zufuhr heißer Luft, sondern über einen Wärmeübertrager in der Schüttung erfolgen. Für die Vorversuche wurde eine elektrische Heizung als doppelte Wendel gewickelt und in die Schüttung des Sorptionsspeichers eingebaut.

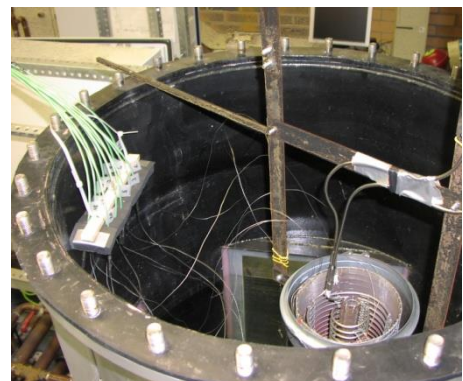
Der geöffnete Sorptionsspeicher mit Heizleitung ist in Abbildung 27 gezeigt. Zur Messung des radialen Temperaturprofils wurden Thermolemente an der Innen- und Außenwand des Behälters, im Luftspalt und in der Schüttung angebracht, weiterhin wurde die Wassertemperatur gemessen.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 25: Sorptionswärmespeicher (a), Wasserspeicher mit Schauglas (b), Sorptionsspeicher in Wasserspeicher eingehängt (c)

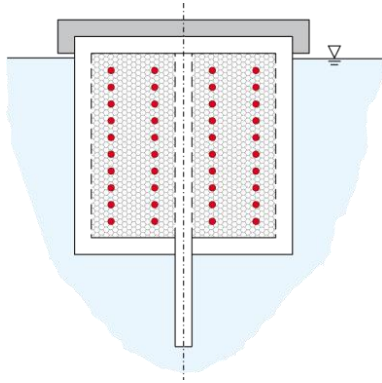


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Desorptionsversuche

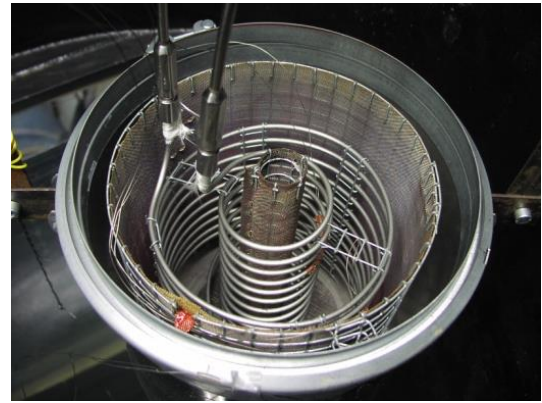


Abbildung 27: Sorptionsspeicher mit elektrischer Heizung

In ersten Versuchen wurde die Temperatur der inneren Heizspirale auf 210 °C geregelt. Es wurden Versuche mit Wassertemperaturen von 25 °C, 40 °C, 50 °C und 60 °C durchgeführt. In Abbildung 28 ist das Temperaturprofil im Sorptionsspeicher bei einer Wassertemperatur von 50 °C dargestellt. Ausgehend von der Schüttung zeigte sich im Luftspalt ein deutlicher Temperaturabfall. Die gemessene Außentemperatur der Behälterwand stieg bei dem Versuch mit einer Wassertemperatur von 25 °C um maximal 2,8 K über die Wassertemperatur an, bei allen weiteren Versuchen lag die Wandtemperatur maximal 1,5 K höher als die Wassertemperatur.

Im Anschluss an die Desorptionsexperimente wurde der Behälterdeckel abgenommen. An der Innenseite der Behälterwand war ein deutlicher Niederschlag von kondensiertem Wasser erkennbar. Das Kondensat läuft nach unten ab und sammelt sich am Behälterboden.

Die Ergebnisse dieser Desorptionsversuche zeigen, dass die Desorption eines im Warmwasserspeicher integrierten Sorptionsspeichers auch für hohe Desorptionstemperaturen möglich ist. Das Aufheizen des Sorptionsmaterials gelingt, während die Außenwand des Behälters „kalt“ bleibt, da sich im Randbereich des Adsorbens und insbesondere über dem Luftspalt ein starkes Temperaturgefälle einstellt.

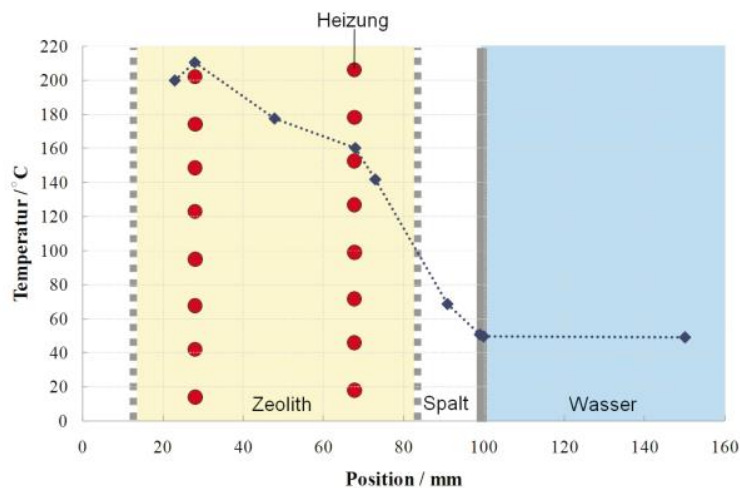


Abbildung 28: Temperaturprofil im Sorptionsspeicher bei der Desorption, Wassertemperatur 50 °C

Voraussetzung für einen optimalen Adsorptionsprozess ist eine möglichst vollständige Desorption. Da die Wärmeleitung im Sorptionsmaterial gering ist, stellt die schnelle Erwärmung aller Bereiche der Schüttung auf die erforderliche Desorptionstemperatur eine Herausforderung dar. Die im Versuchsspeicher für den Eintrag der Desorptionswärme verwendete elektrische Heizung wurde, wie bereits oben beschrieben, wendelförmig auf zwei Radien in der Schüttung angeordnet, um einen möglichst geringen Abstand zu allen Bereichen des Sorptionsmaterials zu erhalten. Da die rein auf Wärmeleitung basierende Aufheizung nur sehr langsam erfolgt, sollte weiter untersucht werden, welche Verbesserung des Wärmetransports und damit der Desorptionsleistung erreicht wird, wenn während der Zufuhr von Desorptionswärme ein geringer Luftstrom durch die Zeolithschüttung geleitet wird. Dies war in den oben dargestellten Versuchen apparativ noch nicht möglich.

Der Versuchsaufbau wurde daher für die weiterführenden Untersuchungen umgestaltet und bietet damit die Möglichkeit, das Sorptionsmaterial mit Luft zu durchströmen. Weiterhin kann das bei der Desorption entstehende Kondensat mit dem erweiterten Versuchsaufbau abgeführt und gesammelt und die über die elektrische Heizung zugeführte Leistung gemessen werden. An diesem Versuchsaufbau wurden weitere Experimente mit dem Fokus auf die Desorption durchgeführt.

6.2.2 Parametervariation zum Desorptionsverhalten

Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf das Desorptionsverhalten zu ermitteln und insbesondere die Auswirkungen einer Luftdurchströmung des Sorptionsmaterials während der Desorption zu untersuchen. Die Bedingungen sind in Tabelle 2 dargestellt. Es wurden Versuche bei drei unterschiedlichen Temperaturen der elektrischen Heizung von 150 °C, 180 °C, und 210 °C durchgeführt. Der Luftvolumenstrom wurde zwischen 0 und 1,4 m³/h variiert, wobei entweder trockene Luft oder Luft mit einer relativen Feuchte von 50 % bezogen auf 20 °C eingeleitet wurde. Die Versuchsdauer betrug zwischen 5 und 25 Stunden.

Tabelle 2: Parametervariation bei den Desorptionsversuchen

Heizungstemperatur	150 °C, 180 °C, 210 °C
Volumenstrom der Luft	0–1,4 m ³ /h
Relative Feuchte der Luft	0 %, 50 %
Versuchsdauer	5–25 h

Wird die Desorption ohne eine Durchströmung mit Luft durchgeführt, erfolgt der Wärmetransport im Sorptionsmaterial nur durch Wärmeleitung. In Abbildung 29 ist der Einfluss der Heizungstemperatur sowie der Versuchsdauer auf den desorbierten Wasseranteil dargestellt. Der desorbierte Wasseranteil ist das Verhältnis der Masse des desorbierten Wassers bei Versuchsende zu der Masse des Wassers das bei Versuchsbeginn im Sorptionsmaterial adsorbiert war. Erwartungsgemäß steigt der desorbierte Wasseranteil mit der Temperatur. Bei einer Heizungstemperatur von 210 °C wird nur etwa die Hälfte des zu Beginn adsorbierten Wassers desorbiert. Auch eine Verlängerung der Versuchsdauer bringt keine signifikante Erhöhung der desorbierten Wassermenge. Die unzureichende Desorption ist darauf begründet, dass die für die Desorption erforderliche Temperatur im Bett des Sorptionsmaterials nicht erreicht wird. Selbst bei einer Heizungstemperatur von 210 °C wurden im Sorptionsmaterial lediglich Temperaturen zwischen 140 °C und 190 °C gemessen. Durch den desorbierten Wasserdampf, der nur sehr langsam durch Diffusionsvorgänge abtransportiert wird, steigt der Wasserdampfpartialdruck im Speicher stark an, womit sich das Sorptionsgleichgewicht zu höheren Beladungen verschiebt.

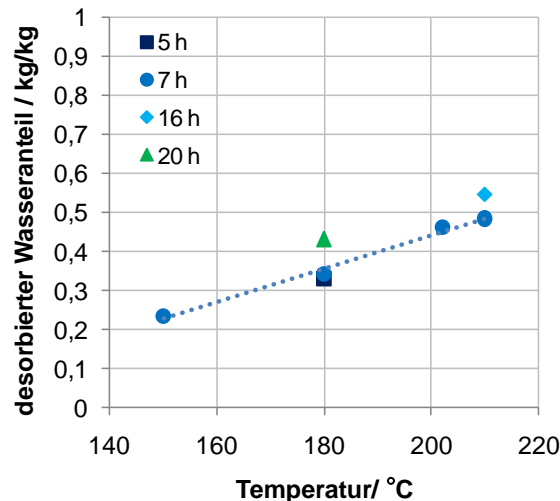


Abbildung 29: Einfluss von Heizungstemperatur und Versuchsdauer auf die Desorptionsleistung, keine Durchströmung mit Luft

Um den Wärmeeintrag und damit die Desorptionsleistung zu verbessern wurden Desorptionsversuche bei zusätzlicher Durchströmung der Schüttung mit Luft durchgeführt. Der Wärmetransport erfolgt damit durch Leitung und Konvektion. Mit dem Luftstrom wird das desorbierte Wasser abtransportiert. Der so verringerte Wasserdampfpartialdruck begünstigt die Desorption.

Der Versuchsstand wird mit Druckluft betrieben, die annähernd trocken ist. In Abbildung 30 ist der Einfluss des Volumenstroms der Luft auf die Menge des desorbierten Wassers gezeigt. Die Desorptionsleistung erhöht sich mit steigendem Volumenstrom und steigender Versuchsdauer. Bei einer Heizungstemperatur von 180 °C, einem Volumenstrom von 1,4 m³/h und einer Versuchsdauer von 17 h werden knapp 75 % des im Sorptionsmaterial adsorbierten Wassers desorbiert. Bei einem vergleichbaren Versuch ohne Luft waren dies nur ca. 40 %. Die Temperaturmessungen im Bett zeigen, dass nun eine deutlich homogenere Temperaturverteilung vorliegt.

Die Ergebnisse sind im Vergleich zu den Versuchen ohne Luft deutlich besser, eine vollständige Desorption wird jedoch noch nicht erreicht. Dies liegt daran, dass bei Vorgabe einer Solltemperatur von 180 °C an der Heizung nur eine mittlere Betttemperatur von ca. 150 °C erreicht wird. Aufgrund der Anordnung der Heizung, die zunächst nur auf Wärmeleitung ausgelegt war, bleibt zudem der innere Bereich der Schüttung infolge der mit 20 °C eintretenden Luft kalt. Für einen Betrieb mit Luft ist daher die Positionierung der Heizung unmittelbar am Lufteintritt vorzusehen. Weiterhin ist zu beachten, dass ein Teil der desorbierten Feuchtigkeit mit dem Luftstrom ausgetragen wird. Diese Feuchtigkeitsmenge wurde bei der Bilanzierung nicht erfasst. Somit liegt die tatsächliche Desorptionsrate etwas höher als angegeben.

Für den realen Betrieb eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers steht anstelle trockener Druckluft lediglich Umgebungsluft zur Verfügung, die im Sommer typischerweise eine relative Feuchte von 50 % bei 20 °C aufweist. Um diese Bedingungen nachzustellen wurde die Druckluft befeuchtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bei einer Heizungstemperatur von 180 °C und einer Versuchsdauer von 17 h sind in Abbildung 31 dargestellt und zum Vergleich den entsprechenden Ergebnissen mit trockener Luft gegenübergestellt. Erwartungsgemäß verringert sich die Menge des desorbierten Wassers im Vergleich zu den Versuchen mit trockener Luft, da ein höherer Wasserdampfpartialdruck das Sorptionsgleichgewicht zu höheren Wasserbeladungen verschiebt. Die relativ geringe Differenz zu den Ergebnissen mit trockener Luft kann durch eine höhere Temperatur kompensiert werden.

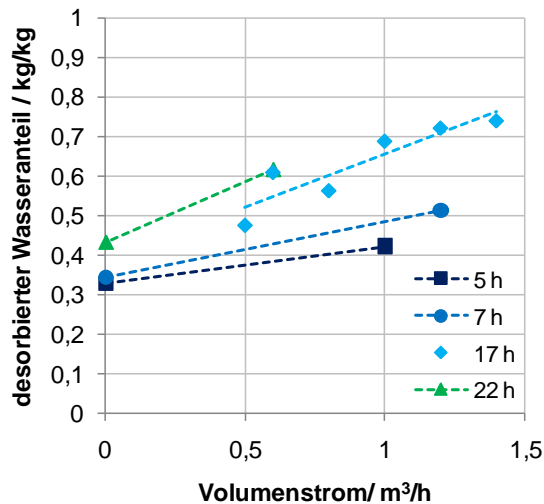


Abbildung 30: Einfluss des Volumenstroms trockener Luft und der Versuchsdauer auf den desorbierten Wasseranteil, Heizungstemperatur 180 °C

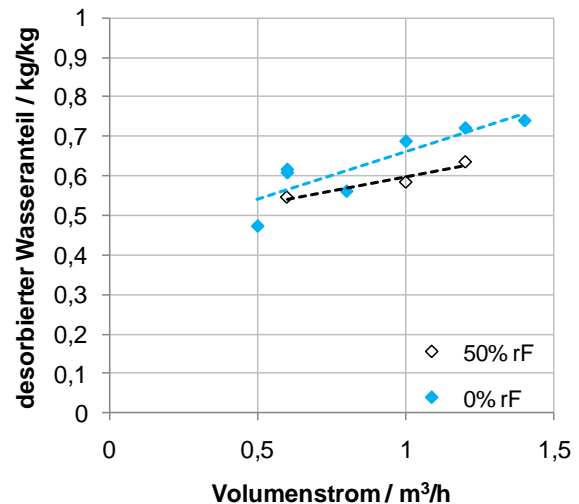


Abbildung 31: Einfluss der Luftfeuchte und des Volumenstroms auf den desorbierten Wasseranteil, Heizungstemperatur 180 °C, Versuchsdauer 17 h

6.2.3 Energieanteile der Desorption

Die Experimente zeigen, dass eine Durchströmung des Sorptionsspeichers mit Luft deutliche Vorteile für die Desorption bewirkt. Ein Teil der eingebrachten Energie muss dabei für die Aufheizung der Luft aufgewendet werden. Um einen besseren Verständnis für die Vorgänge während der Desorption zu erhalten, sowie einen Eindruck von der Effizienz der Desorption zu bekommen, d.h. welcher Anteil der insgesamt eingebrachten Wärme tatsächlich für die Desorption aufgewendet wird, wird eine Energiebilanz aufgestellt. Die über die elektrische Heizung eingebrachte Energie kann in 5 Anteile aufgeteilt werden. Energie wird benötigt um die Zeolithschüttung sowie das darin adsorbierte Wasser zu erwärmen, für die Desorption selbst und um den Luftstrom aufzuwärmen. Zudem geht Energie über die Hülle des Sorptionsspeichers verloren. Diese Anteile sind für einen beispielhaften Desorptionsversuch (Temperatur der Heizung 180 °C, Luftvolumenstrom 0,6 m³/h) in Abbildung 32 über der Zeit aufgetragen.

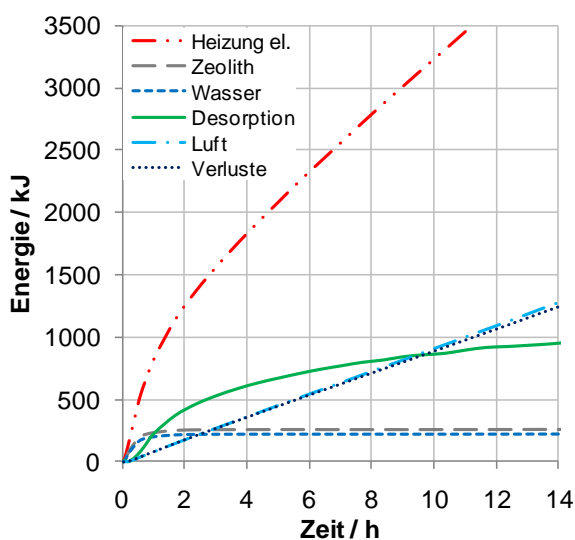


Abbildung 32: Energieanteile bei der Desorption

Zeolith und Wasser sind nach einer knappen Stunde aufgeheizt. Die Energie die für die Desorption aufgewendet wird ist im Vergleich zur insgesamt zugeführten Energie durch die elektrische Heizung klein. Nach 10 h weisen die Anteile für Desorption, Lufterwärmung und Wärmeverluste etwa gleiche Werte auf, die bei rund 30 % der zugeführten Energie liegen. Damit trägt nur ca. ein Drittel der zugeführten Energie zur Desorption bei.

Hier zeigt sich der Vorteil des Konzepts des in den Warmwasserspeicher integrierten Sorptionswärmespeichers, da die als Verluste bezeichnete Wärmemenge nun dem Warmwasserspeicher zugeführt wird, somit dem System erhalten bleibt und die Systemeffizienz erhöht.

Eine weitere Effizienzsteigerung kann erreicht werden, indem der Luftstrom vor dem Verlassen des Systems abgekühlt wird und damit auch dessen Wärme im System verbleibt.

7. Versuchsanlage mit Prototyp des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers

Aufbauend auf den Ergebnissen der Untersuchungen im Versuchsspeicher wurde ein Prototyp eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers realisiert. In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Funktionsweise des Prototypspeichers beschrieben, die Versuchsanlage vorgestellt, die Messtechnik und die Datenerfassung erläutert sowie Ergebnisse eines ersten Adsorptionsversuchs vorgestellt.

7.1 Aufbau und Funktion des Prototypspeichers

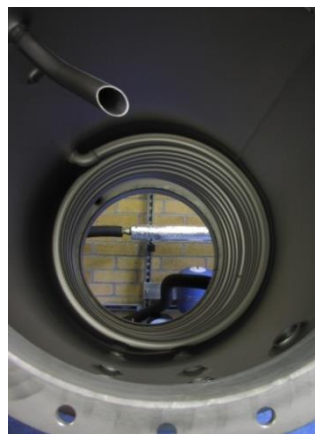
Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Komponenten des Prototypspeichers beschrieben, der am ITW aufgebaut wurde.

Die Fertigung des Warmwasserspeichers erfolgte durch einen Industriepartner. Der Speicher besteht aus Edelstahl und enthält einen Solarkreiswärmeübertrager, zwei Flansche an Ober- und Unterseite mit einem Durchmesser von 580 mm, Anschlüsse für den Wasserzu- und -ablauf sowie Anschlüsse für die Temperaturmessung. Über eine Drehvorrichtung, mit der sich der Warmwasserspeicher um 360° drehen lässt, ist eine einfache Montage des Sorptionswärmespeichers am unteren Flansch möglich. In Abbildung 33 ist der Warmwasserspeicher ohne Dämmung dargestellt und ein Blick in den Speicher gegeben. Mit eingebautem Sorptionswärmespeicher fasst der Warmwasserspeicher ein Wasservolumen von knapp 230 Litern.

Der Sorptionswärmespeicher, der in Abbildung 34 gezeigt ist, wurde am ITW konstruiert und gefertigt. Der Speicher beinhaltet ein Volumen von ca. 100 Litern für das Sorptionsmaterial und fasst damit eine Masse von 78,9 kg trockenem Zeolith 4A. Das Sorptionsmaterial wird von zwei konzentrischen Zylindern aus Metallgewebe begrenzt und oben und unten mit einem Deckel verschlossen. Dadurch lässt sich die Schüttung in radialer Richtung mit Luft durchströmen.



(a)



(b)

Abbildung 33: Warmwasserspeicher, Außenansicht mit Stützen für die Temperaturmessung (a), Blick in den Speicher mit Solarkreiswärmeübertrager (b)



Abbildung 34: Sorptionswärmespeicher, innerer Behälter aus Metallgewebe (links), äußere Hülle aus Edelstahlblech (rechts)

Wird der äußere Mantel des Sorptionswärmespeichers zylinderförmig gestaltet, beträgt die Mantelfläche ca. $1,4 \text{ m}^2$. Um die wärmeübertragende Fläche zum Warmwasserspeicher zu vergrößern und damit den Wärmetransport bei der Adsorption zu verbessern wurde die Außenhülle des Sorptionswärmespeichers als gefaltetes Blech ausgeführt. Damit wird eine Vergrößerung der Fläche auf 2 m^2 erreicht. In Abbildung 34 ist der Sorptionswärmespeicher in zwei Teile zerlegt abgebildet, links ist das äußere Metallgewebe erkennbar, rechts die gefaltete Außenhülle.

In der ersten Version des Prototypspeichers dient eine Wendel aus Edelstahlwellrohr, die über der gesamten Höhe in der Zeolithschüttung um das innere Metallgewebe gewickelt ist, als Wärmeübertrager für die Zufuhr der Desorptionswärme aus dem Solarkreis. Dieser Wellrohrwärmeübertrager ist in Abbildung 35 dargestellt. In Kapitel 8.1.1 und 9.1 wird gezeigt, dass sich durch die ungleichmäßige Wicklung Probleme bei der Erwärmung des Sorptionsmaterials ergeben können. Daher wurde der Wärmeübertrager in einer zweiten Version des Prototyps durch eine regelmäßige Edelstahlwendel ersetzt, die in Abbildung 36 dargestellt ist. Durch die Positionierung des Wärmeübertragers im Zentrum des Sorptionswärmespeichers wird Luft direkt beim Eintritt in das Bett erwärmt, so dass das gesamte Sorptionsmaterial aufgeheizt werden kann.



Abbildung 35:
Wärmeübertrager
aus Wellrohr



(a)



(b)

Abbildung 36: regelmäßig gewickelter Wärmeübertrager für die Desorption

Schnitte durch den Sorptionswärmespeicher und den kombinierten Speicher als CAD-Zeichnung sind in Abbildung 37 gezeigt. Anhand dieser Zeichnungen lassen sich die Ad- und Desorption erläutern.

Bei der Adsorption wird feuchte Umgebungsluft mit einem Ventilator angesaugt, tritt in den Ringspalt zwischen dem roten Rohr und dem blau dargestellten Metallgewebe in den Speicher ein und strömt in radialer Richtung durch das Sorptionsmaterial. Der in der Luft enthaltene Wasserdampf adsorbiert am Zeolith wobei Adsorptionswärme frei wird. Die so erwärmte Luft tritt durch das äußere Metallgewebe aus dem Sorptionsmaterial aus, gelangt in den Luftspalt und strömt an der gefalteten Außenhülle entlang nach oben, wobei Wärme an den Wasserspeicher abgegeben wird. Der Austritt der Luft erfolgt durch das zentrale, rot dargestellte Abluftrohr.

Die Desorption erfolgt durch Zufuhr von Wärme über den rot dargestellten wendelförmigen Wärmeübertrager, der mit dem Solarkreis verbunden ist. Wie in Kapitel 6.2.2 gezeigt, wird auch während der Desorption ein Luftstrom durch das Sorptionsmaterial geleitet, um den Wärmetransport in der Schüttung zu verbessern. Die Luft wird direkt beim Eintritt in den Sorptionsbereich durch den Wärmeübertrager erwärmt. Das desorbierte Wasser tritt mit dem Luftstrom aus dem Sorptionsbereich aus. Ein Teil kondensiert an der gefalteten Außenhülle und wird über einen Auslass im Boden abgeführt. Der übrige Teil wird mit dem Luftstrom durch das Kernrohr ausgetragen.



Abbildung 37: Zeichnungen des Sorptionswärmespeichers und des kombinierten Speichers

7.2 Beschreibung der Versuchsanlage

Die am ITW aufgebaute Versuchsanlage, in die der Prototypspeicher eingebunden wurde, wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Für die solare Beheizung des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers stehen CPC-Vaku-
umröhrenkollektoren mit einer Fläche von $4,6 \text{ m}^2$ zur Verfügung, die in Abbildung 38 gezeigt sind.
Die Rohrleitungen des Solarkreises wurden aus Edelstahl ausgeführt und verschweißt, um die Dicht-
heit des Solarkreises bei hohen Temperaturen und unter hohem Druck zu gewährleisten. Der Solar-
kreis beinhaltet eine Pumpe, ein Durchflussmessgerät sowie Ausdehnungsgefäße und ist in Abbildung
39 gezeigt.

Schematisch ist die Versuchsanlage in Abbildung 40 dargestellt. Die Leistung von den Sonnenkolle-
ktoren kann entweder, wie bei einer gewöhnlichen thermischen Solaranlage, dem Warmwasserspeicher
über den Solarkreiswärmeübertrager (im Schnitt als weiße Kreise dargestellt) zugeführt werden oder
dem Sorptionsmaterial zur Desorption über den Desorptionswärmeübertrager (im Schnitt rot darge-
stellt). Um auch während strahlungsarmer Perioden oder während der Wintermonate desorbieren zu
können, vor allem aber um definierte Randbedingungen vorgeben zu können ist ein elektrischer Heiz-
stab in den Solarkreis integriert, der anstelle der Kollektoren als Wärmequelle genutzt werden kann.



Abbildung 38: CPC-Vaku-umröhrenkollektoren



Abbildung 39: Verrohrung des Solarkreislaufs
im Labor

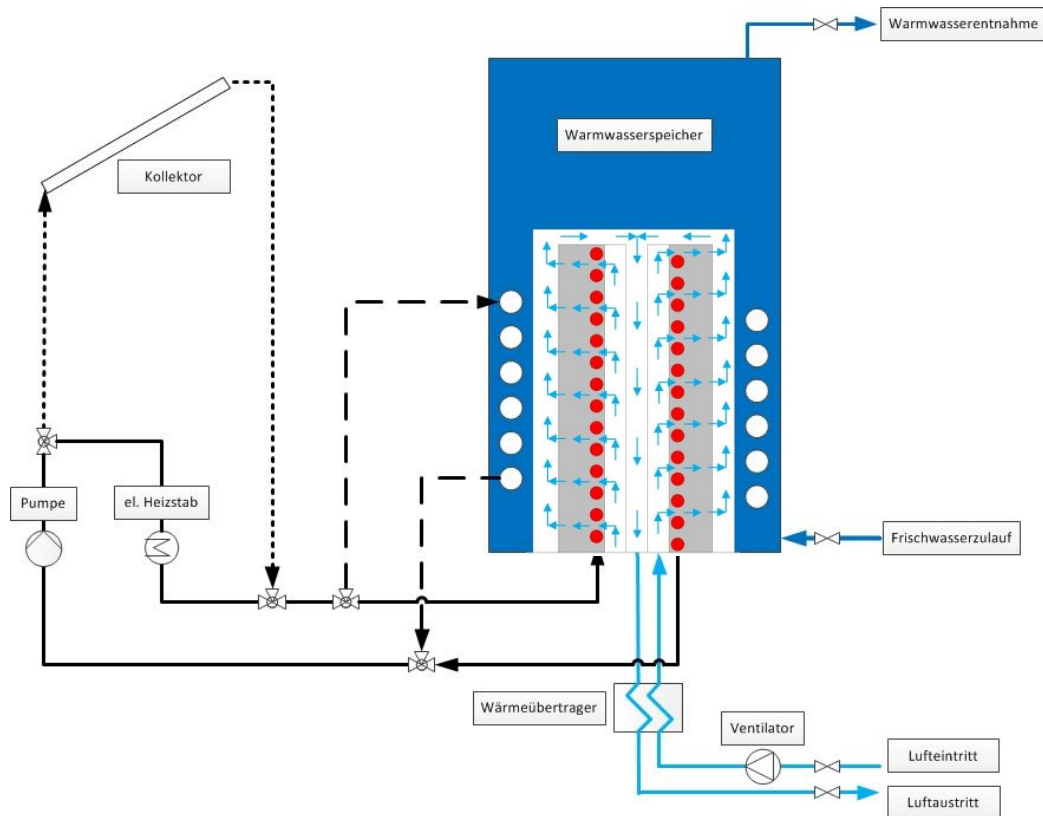


Abbildung 40: Schematische Darstellung der Versuchsanlage mit dem Prototypspeicher

Mit einem Ventilator wird Raumluft aus dem Labor angesaugt und durch den Sorptionsspeicher geleitet. Dem Wasserspeicher kann im oberen Bereich warmes Wasser entnommen werden, wobei im unteren Bereich kaltes Wasser nachströmt.

In der erweiterten zweiten Version des Prototypspeichers wurde ein Luft/Luft-Wärmeübertrager installiert, um die Wärme der aus dem Sorptionsspeicher austretenden Luft zurückzugewinnen und gleichzeitig die eintretende Luft vorzuwärmen. Der Luft/Luft-Wärmeübertrager ist in Abbildung 41 und in Abbildung 42 mit Dämmung gezeigt.

Die Erweiterung des Prototypspeichers beinhaltet außerdem die Installation von Komponenten für eine Warmwasserentnahme aus dem Warmwasserspeicher. Diese Leistungsentnahme ermöglicht die Bewertung des Speichers hinsichtlich seiner thermischen Leistungsfähigkeit. Die für die Wasserentnahme benötigten Komponenten und Messgeräte sind in Abbildung 43 schematisch dargestellt. Der



Abbildung 41: Luft/Luft-Wärmeübertrager



Abbildung 42: Luft/Luft-Wärmeübertrager mit Dämmung

Volumenstrom des entnommenen Wassers wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät gemessen, für die Messung der Temperaturen am Ein- und Austritt des Warmwasserspeichers werden Platin-Widerstandsthermometer eingesetzt. Durch die Verzweigung im Zulauf mit je einem Strangregulierungsventil und einem Magnetventil lassen sich bei der Wasserentnahme zwei verschiedene Volumenströme einstellen.

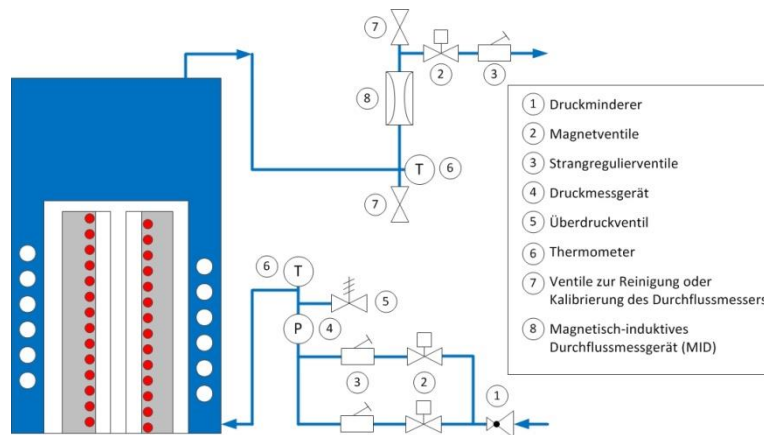


Abbildung 43: Komponenten für die Entnahme von Wasser aus dem Warmwasserspeicher

7.3 Datenerfassung und Steuerung der Versuchsanlage

Um den Ad- und Desorptionsprozess analysieren und bewerten und die Versuchsanlage steuern zu können, werden diverse Messgrößen erfasst. Wie in Abbildung 44 dargestellt werden Temperaturen an 9 Stellen im Sorptionsmaterial und an 7 Stellen im Warmwasserspeicher gemessen sowie die für eine energetische Bilanzierung benötigten Ein- und Austrittsgrößen erfasst.

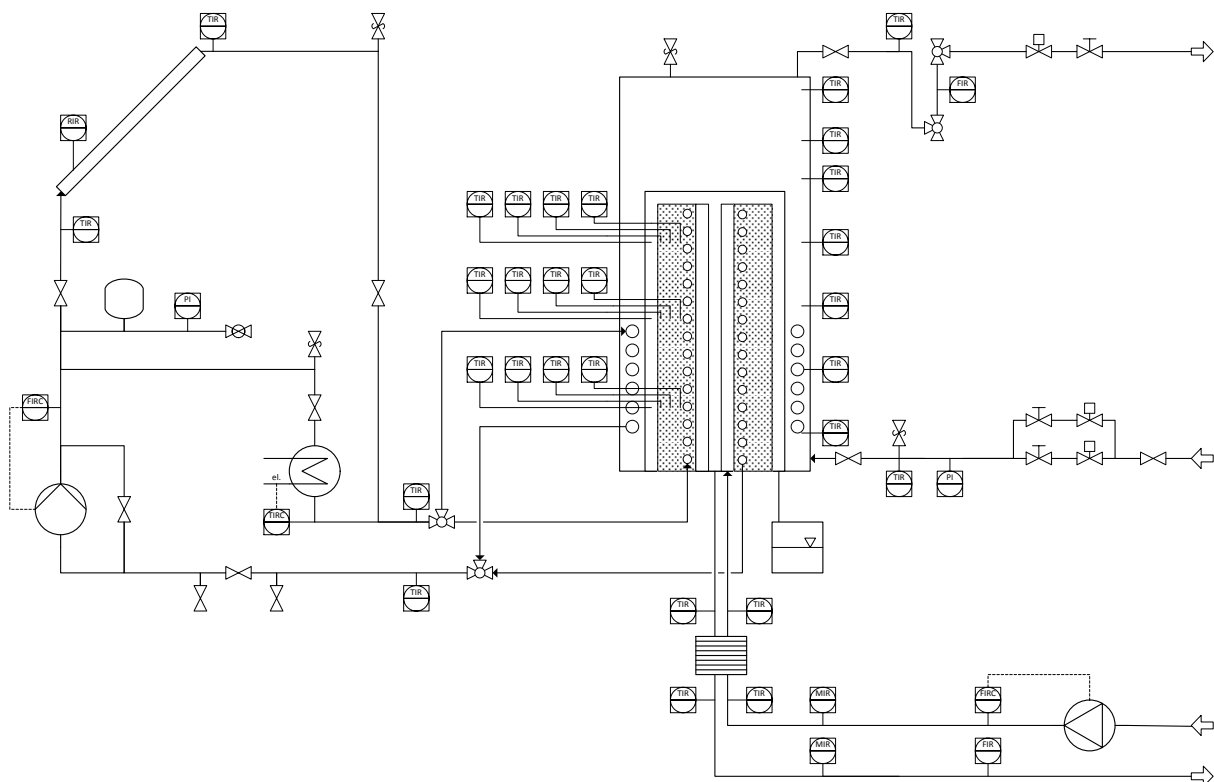


Abbildung 44: R&I-Fließbild der Versuchsanlage

In Abbildung 45 sind Messingröhrchen gezeigt, durch welche Thermoelemente in drei verschiedenen Höhen in die Zeolithschüttung eingebracht werden. Das Kupfergewebe an den Enden schützt die Thermolemente und ermöglicht gleichzeitig eine direkte Umströmung der Sensoren. Um eine Verschiebung der Messingröhrchen während des Befüllens der Sorptionseinheit mit Zeolith zu verhindern wurden deren Enden in der zweiten Version des Prototypspeichers fixiert. Die über den Speicherboden eingebauten Thermolemente sind in Abbildung 46 zu sehen. Zur Messung der Luftgeschwindigkeit mit Hitzdrahtanemometern ist ein definiertes Geschwindigkeitsprofil erforderlich. Zu diesem Zweck wurden am Ein- und Austritt aus dem Sorptionsspeicher Einlaufstrecken mit Strömungsgleichrichtern vorgesehen.



Abbildung 45: Messingröhrchen für den Einbau der Thermolemente in die Zeolithschüttung

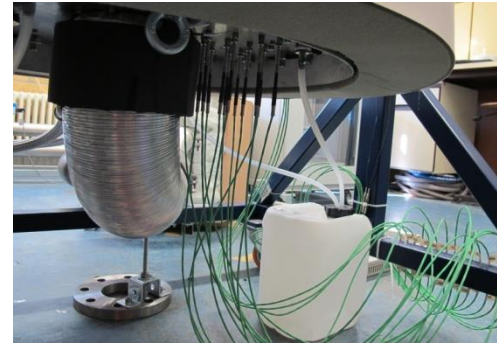


Abbildung 46: Thermolemente zur Temperaturmessung im Zeolithbett

Die Anzeige und Aufzeichnung der gemessenen Größen erfolgt über ein Datenerfassungs- und Steuerungsprogramm in LabVIEW. Über dieses Programm werden neben der Messgrößenaufzeichnung auch Geräte angesprochen und gesteuert. Ein Teil der Programmoberfläche ist in Abbildung 47 bis Abbildung 49 gezeigt. Über Anzeigeelemente und Diagramme mit den Messwerten lässt sich die Anlage während der Durchführung von Versuchen überwachen und steuern. Die aufgezeichneten Daten werden in eine Textdatei geschrieben.

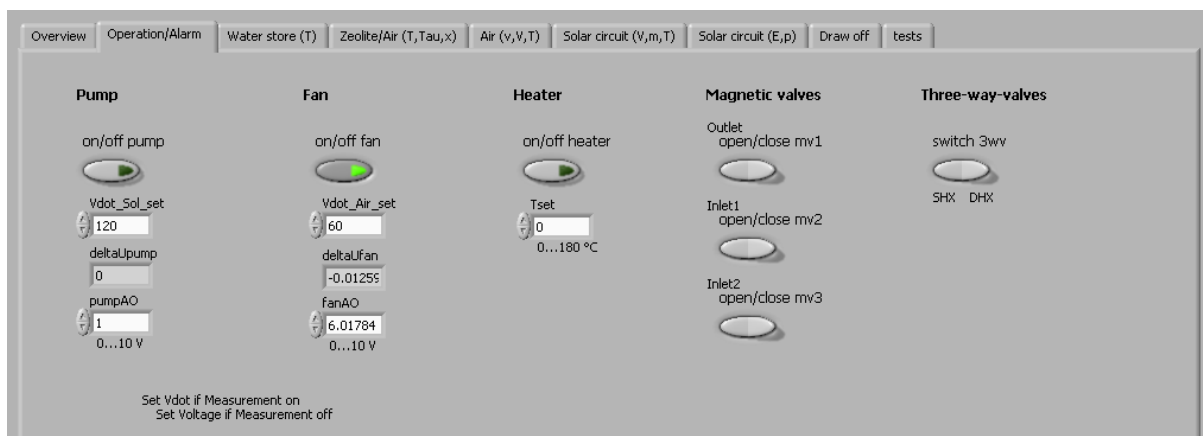


Abbildung 47: Oberfläche des Programms zur Datenerfassung und Steuerung der Versuchsanlage, Bedienung von Pumpe, Ventilator, elektrischer Heizung, und Ventilen

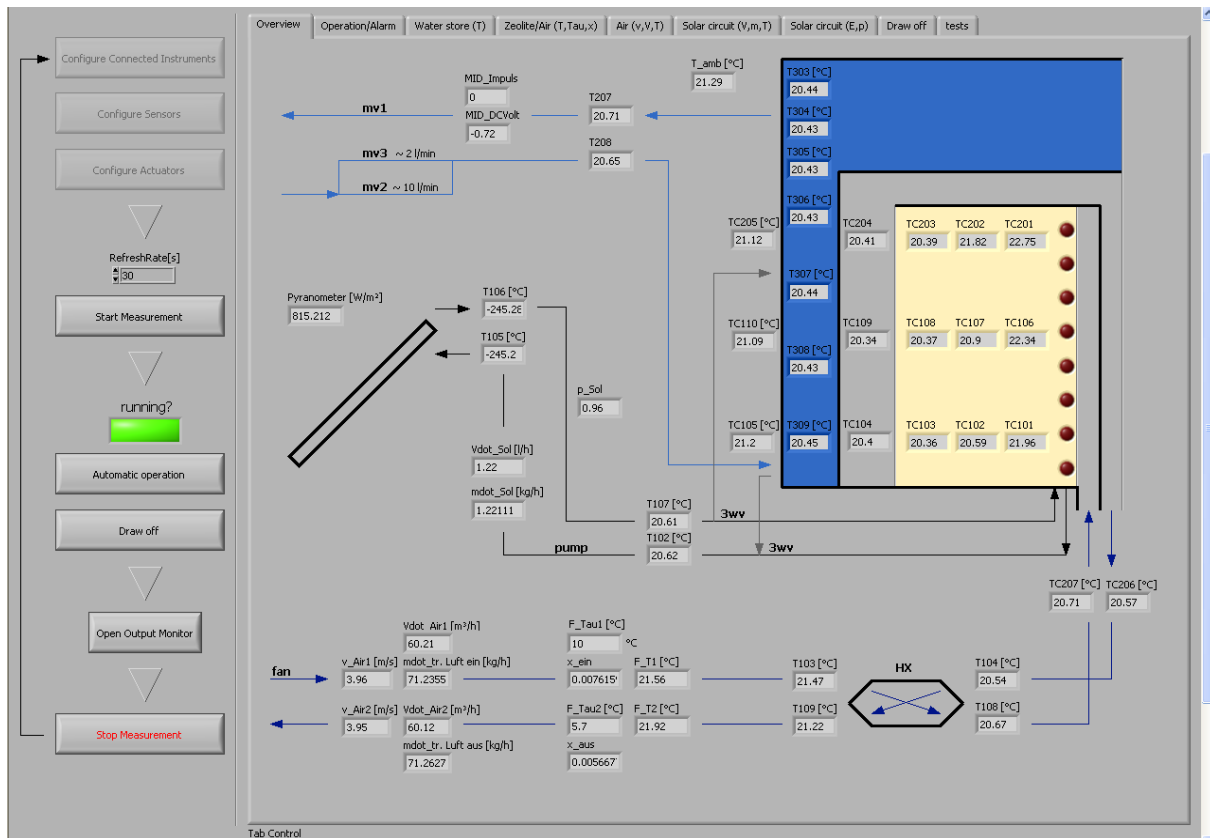


Abbildung 48: Oberfläche des Programms zur Datenerfassung und Steuerung der Versuchsanlage, Übersichtsansicht

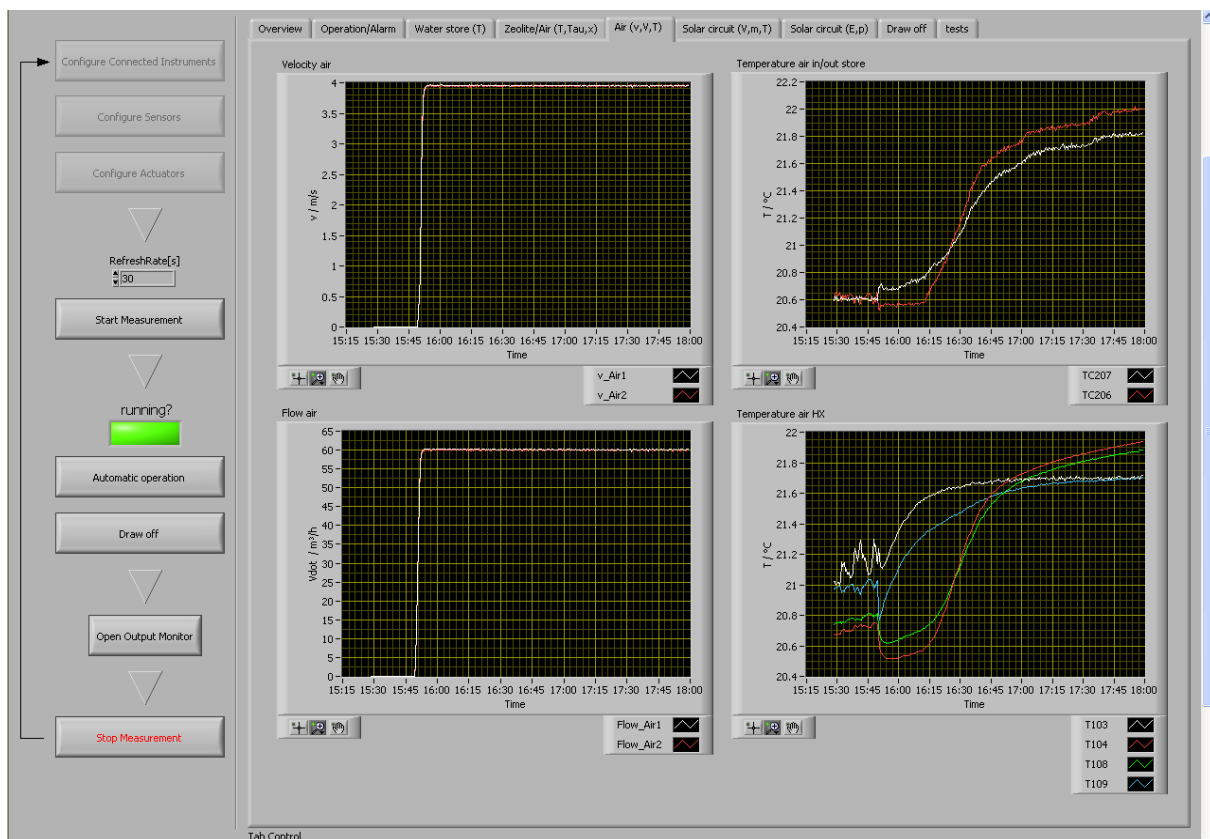


Abbildung 49: Oberfläche des Programms zur Datenerfassung und Steuerung der Versuchsanlage, Diagramme mit Messwerten

7.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

Um die Auswertung der Messdaten zu erleichtern wurde eine Auswertedatei in Excel erstellt, mit der die Aufbereitung der Messwerte nach dem Einlesen aus der durch LabVIEW erzeugten Textdatei weitgehend automatisiert erfolgt.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die gemessenen Größen mit der zugehörigen Position und dem Messprinzip aufgelistet. Im Anschluss sind die Größen die sich durch Berechnungen ergeben aufgeführt und die Berechnung erläutert.

7.4.1 Messgrößen

Die gemessenen Größen mit der jeweiligen Position sowie der Anzahl und dem zugrunde liegenden Messprinzip sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Messgrößen am Prototyp des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers

Messgröße	Position	Anzahl	Messprinzip
Temperatur	Wasser im Warmwasserspeicher	7	Pt100
	Zeolith im Sorptionsspeicher	9	TC
	Luftspalt zwischen Zeolith und Wasser	3	TC
	Solarkreis, Ein- und Austritt Kollektor	2	Pt100
	Solarkreis, Ein- und Austritt Sorptionspeicher	2	Pt100
	Dämmung, Außenseite Wasserspeicher	3	TC
	Luft, Laborraum	1	Pt100
	Wasser, Ein- und Austritt Warmwasserspeicher bei Zapfung	2	Pt100
	Luft, Luft/Luft-Wärmeübertrager	4	Pt100
	Luft, Ein- und Austritt Sorptionsspeicher	2	TC
	Luft, Ein- und Austritt Sorptionsspeicher bzw. Luft/Luft-Wärmeübertrager (am Taupunktspiegel)	2	Pt100
Taupunkttemperatur	Luft, Ein- und Austritt Sorptionsspeicher bzw. Luft/Luft-Wärmeübertrager	2	Taupunktspiegel
Geschwindigkeit	Luft, Ein- und Austritt Sorptionsspeicher	2	Hitzdrahtanemometer
Volumenstrom	Solarkreis	1	Schwebekörper
	Zapfung aus Warmwasserspeicher	1	MID
Druck	Solarkreis	1	
Strahlung	Kollektor	1	Pyranometer

7.4.2 Berechnung der Massenströme

Aus den gemessenen Größen kann der Massenstrom im Solarkreis, der Massenstrom während der Warmwasserzapfung und der Luftmassenstrom berechnet werden. Mit der Kenntnis der Taupunkttemperatur lässt sich die absolute Feuchte der Luft bestimmen und damit der Massenstrom der Komponente H₂O im Luftstrom.

Massenstrom Luft

$$\dot{m}_{\text{Luft}} = \rho_{\text{Luft}} \cdot \dot{V}_{\text{Luft}} = \rho_{\text{Luft}} \cdot v_{\text{Luft}} \cdot A_{\text{quer}} \quad (1)$$

Aus der gemessenen Luftgeschwindigkeit in der Rohrmitte wird unter Annahme eines ausgebildeten Strömungsprofils eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit berechnet.

Massenstrom Solarkreis

$$\dot{m}_{\text{Sol}} = \rho(\vartheta_{\text{Sol}}) \cdot \dot{V}_{\text{Sol}} \quad (2)$$

Massenstrom Warmwasserzapfung

$$\dot{m}_{\text{Zapf}} = \rho(\vartheta_{\text{Wasser}}) \cdot \dot{V}_{\text{Zapf}} \quad (3)$$

7.4.3 Berechnung der Wärmeströme bei der Ad- und Desorption

Bei der Ad- und Desorption treten am Speicher verschiedene Wärmeströme auf, die nach den Gleichungen 4 bis 10 berechnet bzw. abgeschätzt werden können.

Erwärmung Zeolith und darin adsorbiertes Wasser

Der Wärmestrom, der für die Erwärmung des Zeolith aufgewendet wird berechnet nach Gleichung 4. Die gemessenen Zeolithtemperaturen werden für diese Berechnung volumetrisch gewichtet.

Es wird die Annahme getroffen, dass sich der im Zeolith adsorbierte Wasserdampf wie flüssiges Wasser erwärmt. Nach [30] ist anzunehmen, dass die Wärmespeicherkapazität dadurch geringfügig überschätzt wird. In der Gleichung 5 ist $m_{\text{H}_2\text{O,ads}}(t)$ die zum Zeitpunkt t im Sorptionsmaterial adsorbierte Wassermasse. Diese berechnet sich aus der Differenz der Masse an adsorbiertem Wasser zu Beginn eines Versuchs und der bis zum Zeitpunkt t ab- bzw. zugeführten Wassermasse.

$$\dot{Q}_{\text{Zeo}} = m_{\text{Zeo}} \cdot c_{\text{Zeo}} \cdot \frac{(\bar{\vartheta}_{\text{Zeo}}^{t_n} - \bar{\vartheta}_{\text{Zeo}}^{t_{n-1}})}{(t_n - t_{n-1})} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O,ads}} = m_{\text{H}_2\text{O,ads}}(t_n) \cdot c_{p\text{Wasser}}(\bar{\vartheta}_{\text{Zeo}}) \cdot \frac{(\bar{\vartheta}_{\text{Zeo}}^{t_n} - \bar{\vartheta}_{\text{Zeo}}^{t_{n-1}})}{(t_n - t_{n-1})} \quad (5)$$

Ad-/Desorption

Der Wärmestrom, der aus dem Adsorptionsprozess resultiert, berechnet sich aus dem Massenstrom des adsorbierenden Wasserdampfs und der Adsorptionsenthalpie. Die Berechnung erfolgt analog für die Desorption.

$$\dot{Q}_{\text{ads}} = \dot{m}_{\text{ads}} \cdot \Delta h_{\text{ads}} \quad (6)$$

Erwärmung Luft

Über den Luftstrom kann dem Speicher Wärme zugeführt oder entzogen werden. Der Wasseranteil im Luftstrom wird für die Berechnung vernachlässigt. \dot{Q}_{Luft} beschreibt die Abkühlung von ϑ_{aus} auf ϑ_{ein} bei gleicher Feuchte.

$$\dot{Q}_{\text{Luft}} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_p(\bar{\vartheta}_{\text{Luft}}) \cdot (\vartheta_{\text{Luft}}^{\text{aus}} - \vartheta_{\text{Luft}}^{\text{ein}}) \quad (7)$$

Erwärmung Wasser im Wasserspeicher

Der Wärmestrom \dot{Q}_{Wasser} wird über die Temperaturerhöhung des Wassers im Warmwasserspeicher pro Zeiteinheit berechnet. Die Wassertemperaturen werden bei der Berechnung volumetrisch gewichtet.

$$\dot{Q}_{\text{Wasser}} = m_{\text{Wasser}} \cdot c_p(\bar{\vartheta}_{\text{Wasser}}) \frac{(\bar{\vartheta}_{\text{Wasser}}^{t_n} - \bar{\vartheta}_{\text{Wasser}}^{t_{n-1}})}{(t_n - t_{n-1})} \quad (8)$$

Wärmeverluste über Mantel des Warmwasserspeichers

Eine Abschätzung der Wärmeverluste über den Mantel des Warmwasserspeichers kann mit einem konvektiven Anteil und einem Strahlungsanteil erfolgen. Es werden Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten und die Emissivität auf der Speicheraußenseite angenommen.

$$\dot{Q}_{\text{Verluste}} = \alpha \cdot A \cdot (\bar{\vartheta}_{\text{Mantel}}^{\text{außen}} - \vartheta_{\text{amb}}) + \varepsilon_M \cdot \sigma \cdot A \cdot (\bar{T}_{\text{Mantel}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (9)$$

Wärmeeintrag über Desorptionswärmeübertrager

Über den Desorptionswärmeübertrager wird dem Speicher Wärme vom Kollektor zugeführt, die mit Gleichung 10 berechnet wird.

$$\dot{Q}_{\text{WÜ}} = \dot{V}_{\text{sol}} \cdot \rho(\vartheta_{\text{sol}}^{\text{aus}}) \cdot c_p(\bar{\vartheta}_{\text{sol}}) \cdot (\vartheta_{\text{sol}}^{\text{ein}} - \vartheta_{\text{sol}}^{\text{aus}}) \quad (10)$$

7.5 Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Versuchsanlage

Nach der Fertigstellung des Prototypspeichers wurde ein erster Adsorptionsversuch durchgeführt. Der Sorptionswärmespeicher wurde mit Umgebungsluft aus dem Laborraum durchströmt. Bei einer relativen Feuchte von 47 % bei 20,5 °C entspricht dies einem Wasserdampfpartialdruck von 11,4 mbar. Der Wasserdampf adsorbiert am Sorptionsmaterial, wodurch Adsorptionsenthalpie frei wird. Die im Zeolithbett gemessenen Temperaturen sind in Abbildung 50 über der Zeit aufgetragen. Die Temperaturerhöhung in der Schüttung beträgt etwa 25 K. Die Schwankungen der Temperaturen sind auf die nicht vollständig konstanten Bedingungen von Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft zurückzuführen. Der Adsorptionsverlauf lässt sich anhand der Temperaturen verfolgen. Eine steile Adsorptionsfront bewegt sich durch die Schüttung. Nach etwa 40 Stunden beginnt die Austrittsfeuchte, wie in Abbildung 51 dargestellt, auf den Wert der Eintrittsfeuchte anzusteigen und die Temperaturen im äußeren Bereich der Schüttung sinken auf den Wert der eintretenden Luft. Das Sorptionsmaterial ist beladen. Wie in Abbildung 52 dargestellt, konnte das Wasser im Warmwasserspeicher im vorliegenden Versuch auf 35 °C erwärmt werden, was einer Temperaturerhöhung von 20 K entspricht.

Anhand der ersten Ergebnisse war noch keine qualitative Auswertung durchführbar. Der erste Versuch diente vielmehr der Kontrolle der Messtechnik. Das Experiment hat gezeigt, dass bei der Luftvolumenstrommessung noch Nachbesserungsbedarf bestand. Weiterhin fällt die Temperatur an der Messstelle 3 im oberen Teil des Zeoliths früher ab, als an den Messstellen 3 im mittleren und unteren Bereich, was darauf schließen lässt, dass sich das obere Messingröhrchen mit dem Thermoelement beim Befüllen des Sorptionspeichers offenbar nach innen verschoben hat.

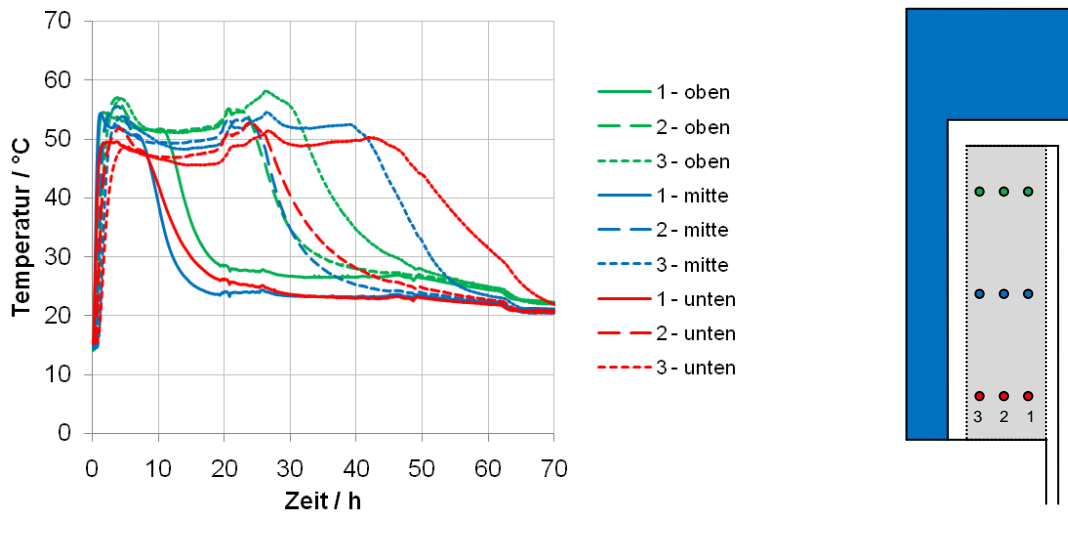


Abbildung 50: Temperaturverlauf im Sorptionsmaterial bei der Adsorption und Position der Messstellen

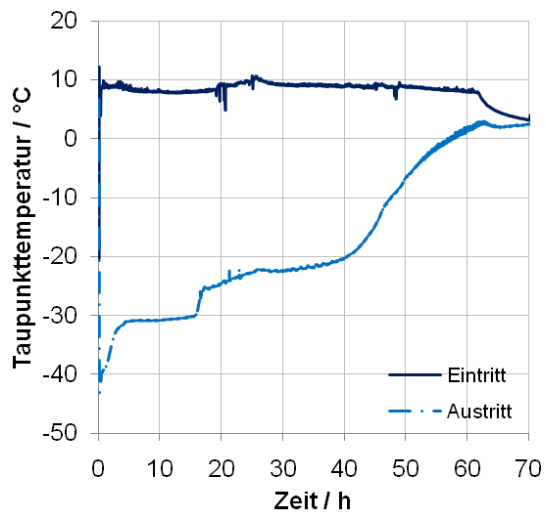


Abbildung 51: Taupunkttemperatur des ein- und austretenden Luftstroms

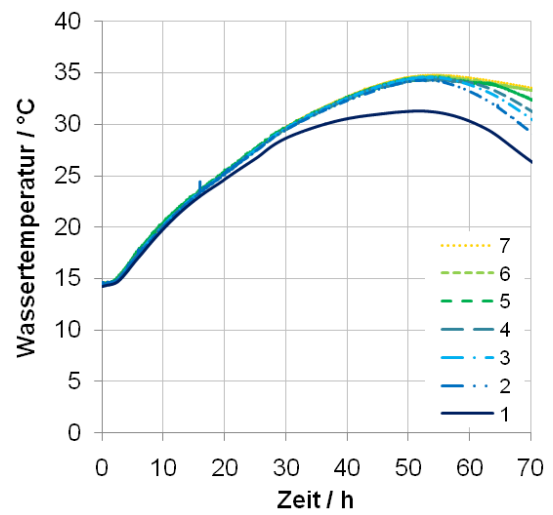


Abbildung 52: Temperatur in verschiedenen Höhen im Warmwasserspeicher, von unten (1) bis oben (7)

8. Experimentelle Untersuchung des Prototypspeichers

8.1 Prototypspeicher Version 1



Abbildung 53: Kombiniertes Warmwasser-Sorptionswärmespeicher mit Dämmung und Messtechnik

Nach der Fertigstellung einer ersten Version des Prototyps des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers im Originalmaßstab stand eine Versuchsanlage zur Verfügung, mit der die Vorgänge während der Ad- und Desorption messtechnisch untersucht werden konnten. Der Sorptionswärmespeicher war mit Zeolith 4A befüllt. In Abbildung 53 ist der Prototyp des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers mit Dämmung und Messtechnik abgebildet.

Im Vordergrund der experimentellen Untersuchungen stand zunächst 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 verschiedener Größen auf das Betriebsverhalten zu beschreiben. Die Versuchsergebnisse werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert.

8.1.1 Desorption

Um die Kapazität des Sorptionswärmespeichers vollständig nutzen zu können muss bei den gegebenen Bedingungen eine bestmögliche Trocknung des Sorptionsmaterials erreicht werden. Voraussetzung dafür ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Zeolithschüttung auf hohem Niveau sowie der Abtransport der desorbierten Feuchtigkeit. Um den Zeolith zu desorbieren steht das Wärmeträgerfluid im Desorptionswärmeübertrager mit bis zu 180 °C zur Verfügung [16]. Der Wärmeeintrag in das Zeolithbett ist aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Zeoliths schwierig. Die notwendige Verbesserung des Wärmeeintrags wird durch einen konvektiv unterstützten Wärme- und Feuchtigkeitstransport erreicht, indem Raumluft (Temperatur ca. 24 °C, Wasserdampfpartialdruck ca. 14 mbar) angesaugt wird und durch den Sorptionswärmespeicher strömt. Der wendelförmige Desorptionswärmeübertrager befindet sich im Speichermaterial auf der Lufteintrittsseite (vgl. Abbildung 55). Zur Untersuchung des Desorptionsprozesses wurden konstante Randbedingungen geschaffen, indem das Wärmeträgerfluid nicht durch die Sonnenkollektoren sondern durch eine elektrische Heizung erwärmt wurde.

Die Ergebnisse einer exemplarischen Desorption sind in Abbildung 54 gezeigt. Die Positionen der entsprechenden Temperaturmessstellen sind in Abbildung 55 dargestellt. In den durchgeführten Experimenten wurde deutlich, dass die Temperaturen in der Zeolithschüttung lokal sehr unterschiedlich sind und bei der exemplarischen Desorption Werte zwischen 125 °C und 170 °C erreichen. Damit wird das angestrebte einheitliche Temperaturprofil noch nicht erreicht. Die Ursache dafür wird in Abschnitt 9.1 erläutert.

Der Vorteil des direkt in den Warmwasserspeicher integrierten Sorptionswärmespeichers wird in Abbildung 54b deutlich. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur im Warmwasserspeicher während

des Desorptionsexperiments von etwa 30 °C auf 70 °C steigt. Zusätzlich zur Desorption erfolgt demnach auch eine Aufheizung des Warmwasserteils. Dies bedeutet, dass die Energie die über den Mantel des erwärmten Sorptionswärmespeichers „verloren“ geht, dem Warmwasserspeicher als nutzbare Energie zugeführt wird.

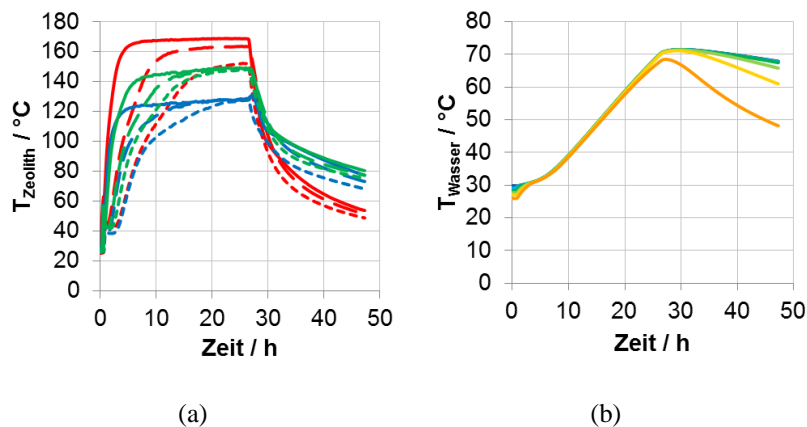


Abbildung 54: Temperatur im Speicher bei der Desorption (a) in der Zeolithschüttung, (b) im Warmwasserspeicher; Luftvolumenstrom 50 m³/h, Wasservolumenstrom im Desorptionswärmeübertrager 100 l/h, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

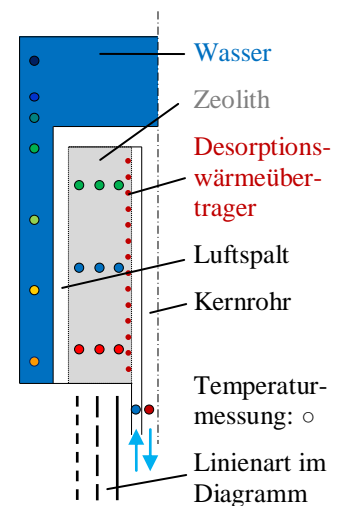


Abbildung 55: schematische Darstellung des kombinierten Speichers mit Begriffen und Positionen der Temperaturmessstellen

Der Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung und die Höhe des erzielbaren Temperaturniveaus wurde systematisch untersucht. Dazu wurde der Luftvolumenstrom von 20 m³/h bis 80 m³/h in Schritten von 10 m³/h variiert. In Abbildung 56 ist der zeitliche Verlauf der Temperaturen in der Zeolithschüttung bei drei der untersuchten Volumenströme aufgetragen. Aus den Diagrammen geht hervor, dass die Temperaturdifferenz innerhalb des Speichers mit steigendem Volumenstrom zunimmt, die mittlere Speichertemperatur sinkt und sich ein „stationärer Zustand“ schneller einstellt. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung wird in keinem der durchgeführten Experimente erreicht. Tendenziell zeigt sich, dass ein geringerer Luftvolumenstrom für eine einheitlichere Temperatur günstig ist.

Je höher der Volumenstrom ist desto mehr Wärme wird vom Wärmeübertrager an den Sorptionswärmespeicher übertragen. Damit vergrößert sich die Temperaturdifferenz des Wärmeträgerfluids zwischen Ein- und Austritt des Wärmeübertragers und die Temperaturspreizung in der Zeolithschüttung nimmt zu. Die über den Wärmeübertrager abgeführte Leistung ist bei einem Volumenstrom von 20 m³/h mit 1 kW deutlich geringer als bei 80 m³/h mit 2,6 kW.

Aufgrund der Durchströmung des Desorptionswärmeübertragers von unten nach oben sollte sich ein Temperaturabfall in der Zeolithschüttung von unten (rot) nach oben (grün) ergeben. Entgegen dieser Erwartung liegt der kälteste Bereich in der mittleren Ebene des Speichers (blau). Da die experimentellen Untersuchungen nur begrenzt Aufschluss über die Vorgänge im Speicher und insbesondere über die Ursachen der Temperaturverteilung geben können erfolgten weitere Untersuchungen mittels CFD, die in Abschnitt 9.1 vorgestellt werden.

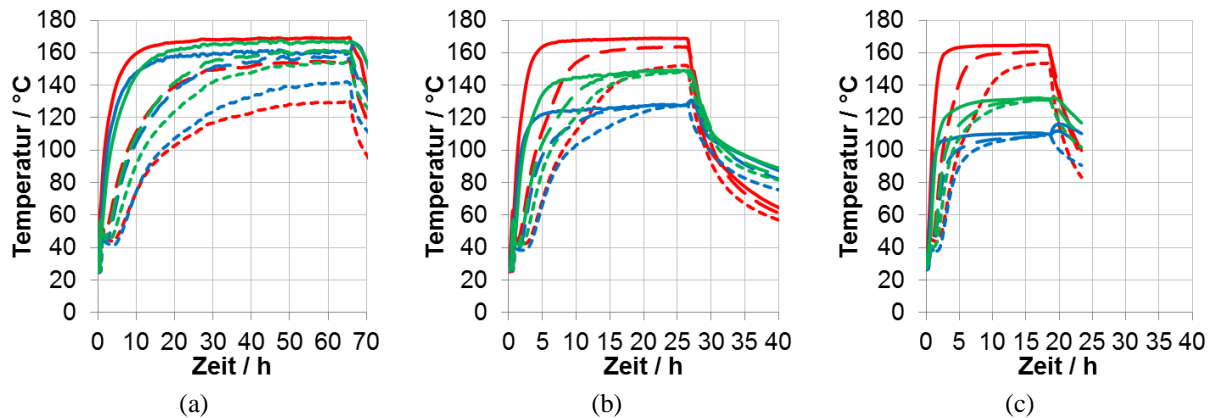


Abbildung 56: Temperatur in der Zeolithschüttung während der Desorption, Luftvolumenstrom von (a) 20 m³/h, (b) 50 m³/h, (c) 80 m³/h, Position der Messstellen vgl. Abb. Abbildung 55

Neben einer gleichmäßigen Erwärmung auf ein hohes Temperaturniveau ist auch die Abfuhr der Feuchtigkeit von großer Bedeutung. Dadurch dass desorbiertes Wasserdampf, aufgrund des konvektiven Transports, abgeführt wird ergibt sich ein geringerer Wasserdampfpartialdruck und damit eine Verschiebung des Gleichgewichts hin zu kleineren Beladungen, was die Desorption begünstigt.

Der Einfluss des Luftvolumenstroms auf die desorbierte Wassermasse ist in Abbildung 57 dargestellt. Die Ergebnisse der verschiedenen Experimente zeigen, dass bei kleinen Luftvolumenströmen tendenziell mehr Wasser desorbiert wird. Aus dem Zusammenhang zwischen Volumenstrom und desorbierte Wassermenge kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass kleine Volumenströme für die Desorption zu bevorzugen sind.

Wird zudem die Desorptionsdauer als Kriterium herangezogen, die in Abbildung 58 gezeigt ist, ergibt sich ein anderes Bild. Mit sinkendem Volumenstrom steigt die Versuchsdauer. Bei 20 m³/h wurde über 60 Stunden lang desorbiert. Selbst mit dem größten untersuchten Volumenstrom von 80 m³/h ergab sich noch eine Desorptionsdauer von etwa 18 Stunden. Unter dem Aspekt einer realen Betriebsweise sind lange Desorptionszeiten nachteilig. Bei einem solaren Betrieb kann die Desorption ca. 6-8 Stunden pro Tag durchgeführt werden. Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, dass nach einer sechsständigen Desorption lediglich etwa 30 % der Speicherkapazität für die Adsorption verfügbar wären.

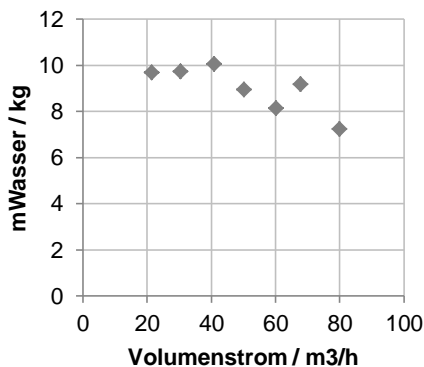


Abbildung 57: Desorbierte Wassermasse

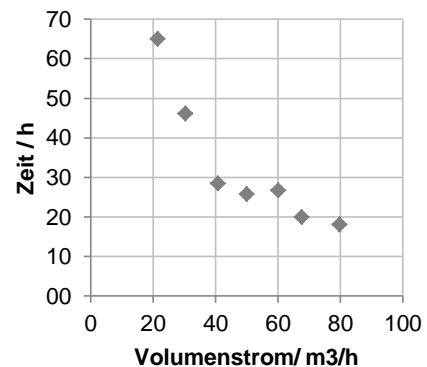


Abbildung 58: Dauer der Desorptionsexperimente

Um eine solare Desorption innerhalb weniger Stunden zu ermöglichen ist eine schnellere Aufheizung des Speichermaterials erforderlich, die bislang dadurch erschwert wird, dass die Luft mit Umgebungstemperatur in den Speicher eintritt und allein durch das Passieren des Desorptionswärmeübertragers erwärmt wird. Eine Verbesserung in Form einer schnelleren Erwärmung kann durch eine Vorwärmung der eintretenden Luft erreicht werden. Diese wird im bestehenden Speicher in geringem Maße durch die austretende Luft im Kernrohr (vgl. Abbildung 55) vorgewärmt. Aufgrund der begrenzten Fläche ist aber nicht zu erwarten dass ein ausreichender Wärmetransport erreicht werden kann. Da der Luftstrom am Austritt eine hohe Temperatur aufweist und mit dieser Energie aus dem System abgeführt wird, wurde in der zweiten Version des Prototypen ein Luft/Luft-Wärmeübertrager eingebaut, in welchem die eintretende Luft durch die austretende Luft vorgewärmt wird. Die damit erreichten Verbesserungen werden im Abschnitt 8.2 dargestellt.

8.1.2 Adsorption

Das Ziel bei der Adsorption ist es, die im Sorptionsmaterial gespeicherte Energie möglichst vollständig an den Warmwasserspeicher zu übertragen. Der Wärmetransport aus dem Zeolithbett erfolgt durch die erwärmte Luft, die an der Innenseite des Sorptionsspeichermantels entlang strömt. Der begrenzte Wärmeübergang liegt auf der Luftseite. Der wasserseitige Wärmeübergang ist um etwa eine Größenordnung höher und damit unkritisch.

Die durchgeführten Experimente bestätigen die generelle Funktionsfähigkeit des Konzepts. Die erreichbare Temperaturerhöhung im Zeolithbett und im Warmwasserspeicher ist in Abbildung 59a und b dargestellt. Das erzielte Adsorptionsverhalten ist für den Anwendungszweck günstig. Im Sorptionswärmespeicher wird in der gesamten Zeolithschüttung eine Temperaturerhöhung um etwa 40 K erreicht, die während der Adsorptionsdauer konstant bleibt. Die Temperaturerhöhung im Wasserspeicher ist mit 15 K geringer als erwartet. Eine Analyse des Wärmetransports zeigt, dass der übertragene Wärmestrom selbst bei der vorhandenen treibenden Temperaturdifferenz von 35-40 K nur ca. 250 W beträgt. In der Folge ist auch die in Abbildung 59c gezeigte Lufttemperatur am Austritt hoch, wodurch etwa zwei Drittel der durch die Adsorption frei gewordenen Energie an die Umgebung verloren gehen.

Konstruktiv bedingt kann der Luftstrom im Luftspalt nur bis auf Wassertemperatur gekühlt werden, wodurch selbst bei idealem Wärmeübergang Energie aus dem System abgeführt wird, da die Luft am Austritt des Speichers wärmer als Eintritt am ist. Um zu einem effizienten Betrieb zu gelangen muss diese Energie insbesondere bei der Adsorption zurückgewonnen werden. Dazu ist der Einsatz des bereits bei der Desorption beschriebenen Luft/Luft-Wärmeübertragers notwendig, um sicherzustellen, dass die Austrittstemperatur nur unwesentlich über der Eintrittstemperatur liegt.

Aus den Versuchsergebnissen werden die Grenzen des bisherigen Prototyps aufgezeigt. Die Ergebnisse machen deutlich, dass ein guter Wärmetransport für die Effizienz des Prozesses bedeutend ist. Der limitierende Prozessschritt ist der Wärmeübergang auf der Luftseite, der sich durch kleine Werte des Wärmeübergangskoeffizienten ausdrückt. Eine Erhöhung des Luftvolumenstroms kann zu Turbulenz und zu höheren Wärmeübergangskoeffizienten führen.

Eine weitere Möglichkeit um zum einen die wärmeübertragende Fläche und zum anderen den Wärmeübergangskoeffizienten zu erhöhen bietet der Einsatz von strukturierten Oberflächen. Da experimentelle Untersuchungen zur Überprüfung diesbezüglicher Optimierungsmaßnahmen sehr aufwendig sind, werden CFD-Methoden als Mittel eingesetzt, um veränderte Geometrien des Sorptionsspeichermantels sowie Strömungsverhältnisse zu untersuchen. Diese werden in Abschnitt 9.2 vorgestellt.

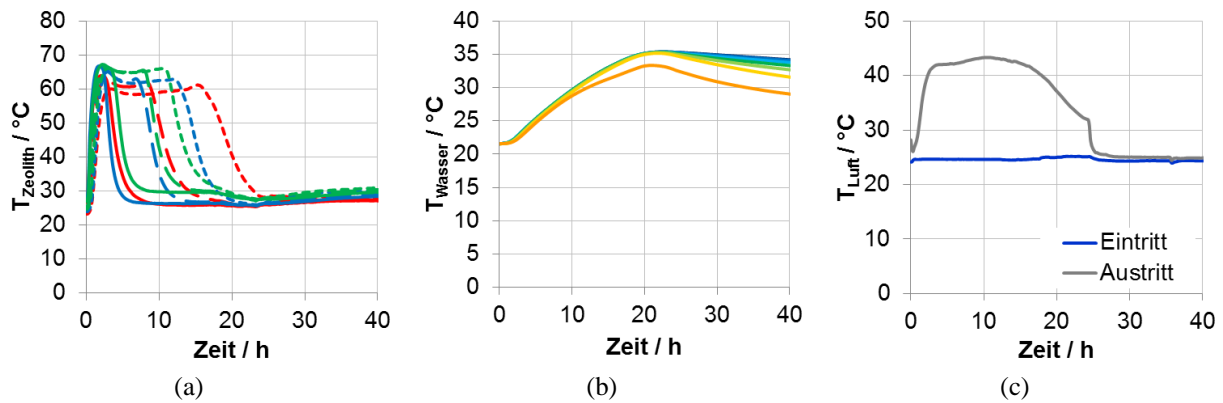


Abbildung 59: Temperaturen bei der Adsorption (a) im Zeolithbett, (b) im Warmwasserspeicher, (c) der Luft an Ein- und Austritt des Speichers, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Wasserdampfpartialdruck der Luft am Speichereintritt 15 mbar, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

8.2 Prototypspeicher Version 2

Anhand der experimentellen Untersuchungen mit dem ersten Prototypspeicher wurden einige Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. Mit den aus diesen Versuchen gewonnenen Erfahrungen wurde der erste Prototyp erweitert und umgebaut. Damit entstand eine zweite Version des Prototypspeichers mit folgenden wesentlichen Neuerungen:

- Sorptionsmaterial
Das Sorptionsmaterial Zeolith 4A wurde durch Zeolith 13XBF ersetzt. Mit dem Wechsel zu Zeolith 13XBF kommt der für diesen Einsatzzweck derzeit am besten geeignete kommerziell erhältliche Zeolith zum Einsatz
- Desorptionswärmeübertrager
Der Desorptionswärmeübertrager aus Wellrohr wurde durch eine Edelstahlwendel mit gleichmäßiger Steigung ersetzt (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36), um bei der Desorption eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Sorptionsmaterial zu erreichen.
- Luft/Luft-Wärmeübertrager
Zur Rückgewinnung der Energie der austretenden Luft wurde ein Luft/Luft-Wärmeübertrager eingesetzt (siehe Abbildung 41 und Abbildung 42)
- Leistungsentnahme aus dem Warmwasserspeicher
Der Versuchsstand wurde um eine Einrichtung zur definierten Warmwasserentnahme aus dem Warmwasserspeicher erweitert, um Trinkwasserlastprofile aufprägen zu können

Wie sich die experimentellen Ergebnisse durch diese Neuerungen verändert haben wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

8.2.1 Adsorption

Die erste Version des Prototypspeichers wird im Folgenden mit V1, die erweiterte Version mit V2 bezeichnet. In Abbildung 62 bis Abbildung 65 sind die Ergebnisse zweier Adsorptionsexperimente gegenübergestellt, links V1 und rechts V2.

In Abbildung 60 und Abbildung 61 sind die Lufttemperaturen am Ein- und Austritt aufgetragen. Die Austrittstemperatur konnte bei V2 durch den Luft/Luft-Wärmeübertrager reduziert werden und liegt bei etwa $30\text{--}32 \text{ }^\circ\text{C}$ im Vergleich zu $45 \text{ }^\circ\text{C}$ bei dem gezeigten Adsorptionsexperiment mit Prototyp V1. Die Wärmeverluste werden dadurch deutlich verringert.

In Abbildung 62 und Abbildung 63 sind die Temperaturen in der Zeolithschüttung während einer Adsorption aufgetragen (zur Erklärung der Kurven siehe Abbildung 55). Mit dem Prototyp V1 wird eine Temperaturerhöhung von etwa 40 K durch die Adsorption erreicht. Auch im Prototyp V2 liegt die Temperaturerhöhung, die sich aufgrund der Adsorption ergibt, bei etwa 30–40 K. Durch den Einsatz des Luft/Luft-Wärmeübertragers bei V2 tritt die Luft bereits vorgewärmt in den Sorptionspeicher ein. Dadurch verschiebt sich das Temperaturniveau im Prototyp V2 nach oben und es werden Temperaturen bis zu 95 °C erreicht. Dies hat zur Folge, dass sich ein höheres treibendes Temperaturgefälle zum Warmwasserspeicher einstellt, wodurch sich die Wärmeübertragung verbessert.

Diese Erhöhung der Wärmeübertragung zeigt sich in den unteren beiden Abbildungen, Abbildung 64 und Abbildung 65, in denen die Temperaturen im Warmwasserspeicher dargestellt sind. Bei Prototyp V1 beträgt die Temperaturerhöhung 15 K. Bei Speicher V2 ist eine größere Temperaturerhöhung im Wasser von 35 K zu erkennen und der Speicher erreicht dadurch eine Wassertemperatur von 55 °C.

Die größere Temperaturerhöhung im Warmwasserspeicher resultiert zum größten Teil aus der größeren treibenden Temperaturdifferenz zwischen Sorptionspeicher und Warmwasserspeicher. Soll der Wärmestrom weiter gesteigert werden, muss direkt am Wärmeübergang in dem ringspaltförmigen Luftkanal ansetzt werden. Das hier noch erschließbare Potential wurde mithilfe von CFD-Simulationen untersucht, die in Kapitel 9.2 aufgeführt sind.

Die Versuche machen deutlich, dass die ergriffenen Maßnahmen die gewünschten Auswirkungen haben und die Aufheizung des Wasserspeichers durch Adsorption gelingt.

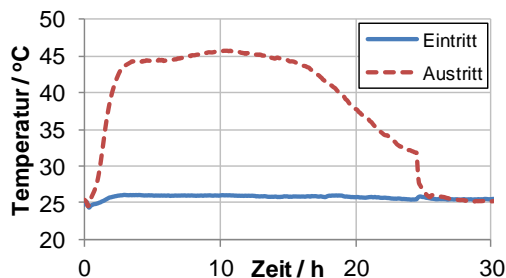


Abbildung 60: Temperaturen der ein- und ausströmenden Luft, Luftvolumenstrom 60 m³/h, Prototyp V1

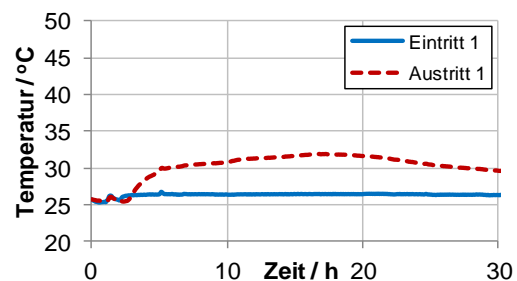


Abbildung 61: Temperaturen der ein- und ausströmenden Luft, Luftvolumenstrom 80 m³/h, Prototyp V2

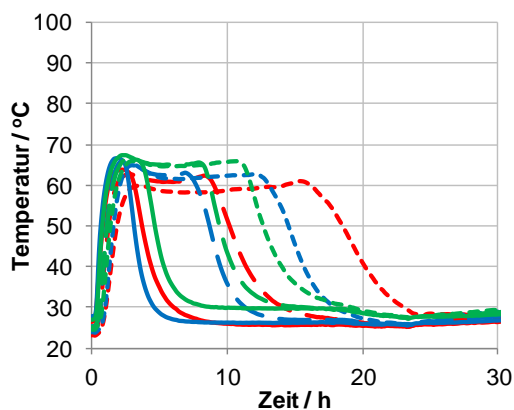


Abbildung 62: Temperaturen in der Zeolithschüttung (4A), Luftvolumenstrom 60 m³/h, Prototyp V1, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

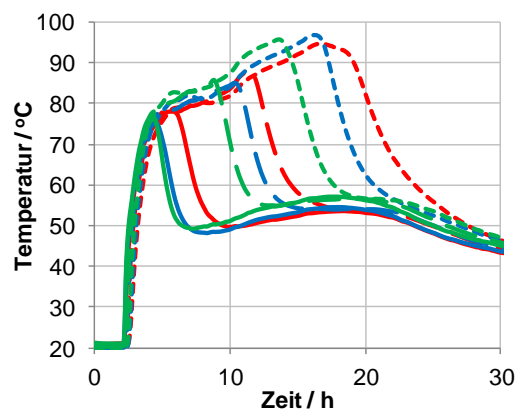


Abbildung 63: Temperaturen in der Zeolithschüttung (13XBF), Luftvolumenstrom 80 m³/h, Prototyp V2, Messstellen vgl. Abbildung 55

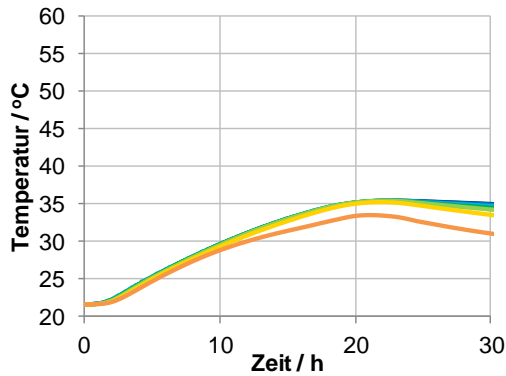


Abbildung 64: Temperaturen im Warmwasserspeicher, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V1, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

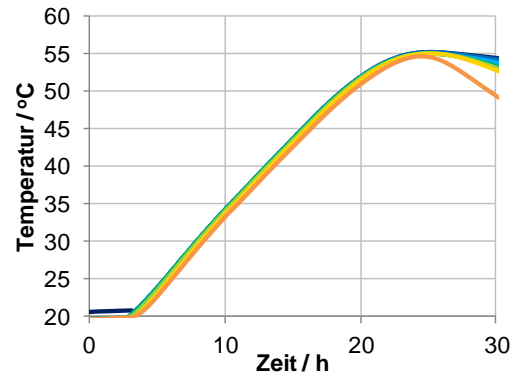


Abbildung 65: Temperaturen im Warmwasserspeicher, Luftvolumenstrom $80 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V2, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

8.2.2 Desorption

Wie bei der Adsorption werden auch für die Desorption zwei Versuche gegenübergestellt. Der Luftvolumenstrom beträgt jeweils $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Beim Prototyp V1 bestand das Problem darin, dass das Sorptionsmaterial in verschiedenen Ebenen sehr ungleichmäßig erwärmt wurde, was in Abbildung 66 zu sehen ist. Nach dem Austausch des Desorptionswärmeübertragers aus Wellrohr durch einen Wärmeübertrager mit gleichmäßiger Steigung ergibt sich der in Abbildung 67 dargestellte Temperaturverlauf. Die Desorption wurde bei diesem Versuch nach 10 Stunden beendet, weshalb die Temperatur von dort an wieder abfällt. Anhand der Diagramme zeigt sich sehr deutlich der Einfluss der Wärmeübertragerwicklung auf das Temperaturfeld im Sorptionsmaterial. Ein Vergleich der Temperaturen nach 10 Stunden Desorption zeigt, dass der gleichmäßige Wärmeübertrager eine einheitlichere Temperatur im Prototyp V2 bewirkt. Die mittlere Temperatur im Zeolithbett liegt hier nach 10 Stunden mit 140 °C um etwa 10 K höher als bei V1. Die rot dargestellten Messwerte aus der unteren Messebene fallen etwas aus dem Rahmen, da dort geringere Temperaturen gemessen werden als an den entsprechenden Stellen in den beiden darüber liegenden Messebenen. Ursächlich hierfür sind einerseits die Wärmeverluste über den ungedämmten Sorptionspeicherboden sowie der Einfluss des Luftvolumenstroms. Die Temperaturen liegen bei höherem Luftvolumenstrom näher zusammen. Im Prototyp V1 sind die Temperaturen der unteren roten Messebene deutlich höher, weil im unteren Bereich die Windungen des Wellrohrs sehr dicht gewickelt waren.

Wie bei der Adsorption verringert sich die Temperatur der austretenden Luft durch den Luft/Luft-Wärmeübertrager deutlich von 80 °C auf 35 °C nach 10 Stunden Desorptionszeit, wie in Abbildung 68 und Abbildung 69 dargestellt. Die Wärmeverluste durch den austretenden Luftstrom werden dadurch reduziert. Die Wärme des austretenden Luftstroms wird zurückgewonnen und die Luft tritt vorgewärmt in den Speicher ein. Das Sorptionsmaterial erfährt zu Beginn eine schnelle Erwärmung, solange bis die Lufteintrittstemperatur erreicht ist.

Die Zunahme der Wassertemperatur beträgt bei beiden Versuchen etwa 12 K in den ersten 10 Stunden, was in Abbildung 70 und Abbildung 71 zu erkennen ist. Wenn bei der Desorption auf diese Weise auch die fühlbare Wärme dem System erhalten bleibt, nähert man sich so dem Ideal einer tatsächlich verlustfreien Speicherung.

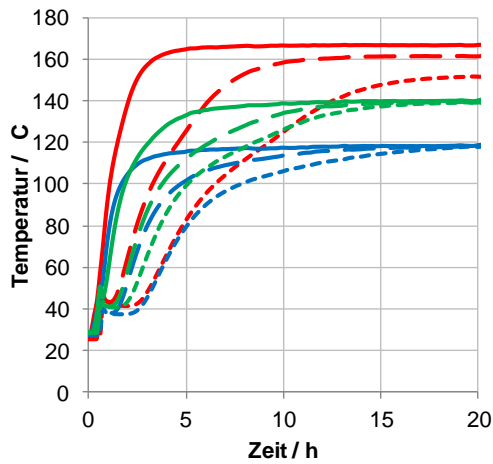


Abbildung 66: Temperaturen in der Zeolithschüttung (4A) während einer Desorption, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V1

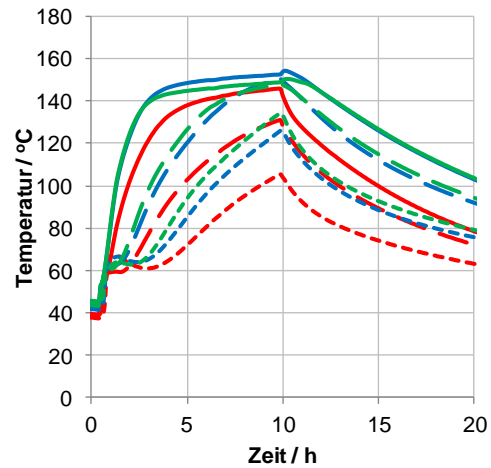


Abbildung 67: Temperaturen in der Zeolithschüttung (13XBF), während einer Desorption, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V2

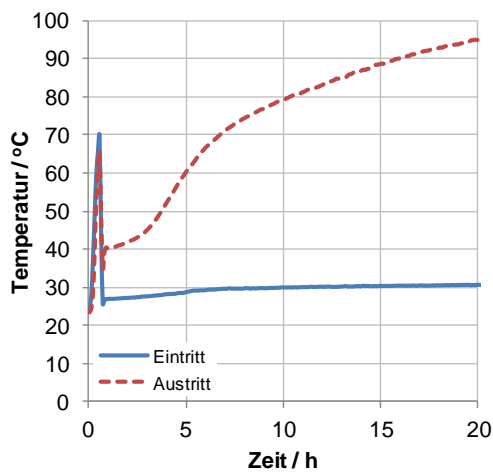


Abbildung 68: Temperaturen der ein- und ausströmenden Luft, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V1

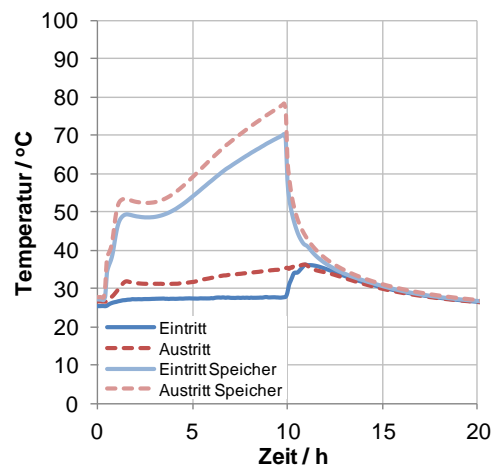


Abbildung 69: Temperaturen der ein- und ausströmenden Luft (um den Luft/Luft-Wärmeübertrager), Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V2

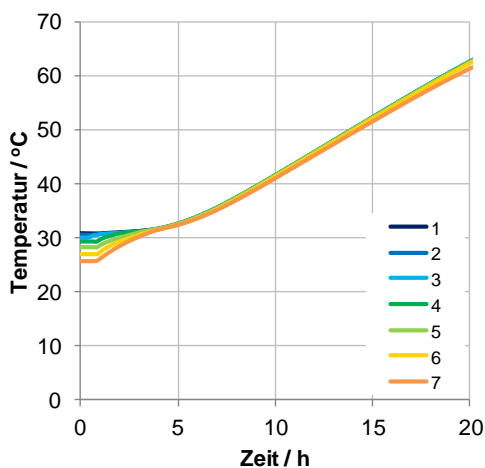


Abbildung 70: Temperaturen im Warmwasserspeicher, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V1, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

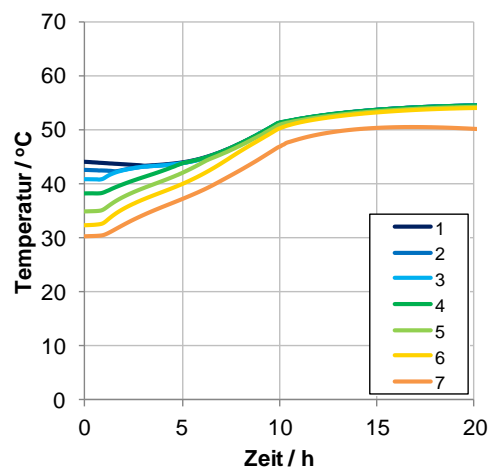


Abbildung 71: Temperaturen im Warmwasserspeicher, Luftvolumenstrom $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Prototyp V2, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55

8.2.3 Leistungsentnahme aus dem Warmwasserspeicher

Mit dem neuen Teststand zur Warmwasserentnahme (siehe Abbildung 43) ist es möglich, dem Warmwasserspeicher eine definierte Leistung zu entnehmen. Dabei wird dem Speicher aus dem oberen Bereich warmes Wasser entnommen, welches im unteren Speicherteil durch kaltes Wasser ersetzt wird (siehe Abschnitt 7.2). Dem Speicher kann damit ein definiertes Lastprofil aufgeprägt werden. Das thermische Verhalten des Speichers unter dynamischen Entladebedingungen wurde experimentell untersucht. Hiermit sind Aussagen über die thermische Leistungsfähigkeit und die Erhöhung der nutzbaren Warmwassermenge möglich. Die Ergebnisse können mit Simulationsergebnissen des kombinierten Speichers verglichen werden.

8.2.3.1 Testsequenz in Anlehnung an ISO 9459-5

Die Wasserentnahme erfolgt in Anlehnung an die Prüfnorm ISO 9459-5 [12], die eine allgemeingültige Testmethode darstellt, um Vorhersagen über das Langzeitverhalten von Anlagen zur solarunterstützten Warmwasserbereitung zu treffen. In der Norm sind verschiedene Testsequenzen mit unterschiedlichen Zielsetzungen enthalten, unter anderem der Test S-Sol B. Diese Testsequenz läuft wie folgt ab:

- 5 Wasserentnahmen im Abstand von jeweils 2 Stunden
- Volumenstrom in der 1. Minute der Entnahme 2 l/min (zur Vortemperierung der Messgeräte), danach 10 l/min
- Entnahme wird beendet, wenn:
 - ein definiertes Volumen entnommen wurde
 - oder
 - die Austrittstemperatur des Wassers einen Grenzwert unterschreitet, sofern mindestens 5 Liter Wasser entnommen wurden

Das Entnahmevolumen und die Grenztemperatur sind dabei abhängig von der Kollektorfläche und vom Volumen des Wasserspeichers. Für den Prototyp des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers ergeben sich nach der Norm $V_{\text{Entnahme}} = 45 \text{ l}$ und $T_{\text{Grenz}} = 50 \text{ °C}$.

Die Testsequenz wurde in LabVIEW programmiert und in das bestehende Datenerfassungs- und Verarbeitungsprogramm der Versuchsanlage integriert. Die Bedienoberfläche ist in Abbildung 72 dargestellt.

8.2.3.2 Durchführung der Testsequenz

Die Testsequenz wurde auf den kombinierten Warmwasser Sorptionswärmespeicher angewendet. Das Lastprofil wurde zum einen während eines Adsorptionsvorgangs aufgeprägt und zum anderen während eines Referenzversuchs ohne Adsorption oder anderem Energieeintrag. Der Ablauf war für beide Versuche identisch:

1. Konditionierung des Warmwasserspeichers auf 45 °C
2. 5 Warmwasserentnahmen im Abstand von 2 Stunden
3. Endkonditionierung des Warmwasserspeichers auf 45 °C

Der Volumenstrom betrug während den Wasserentnahmen zwischen 520 l/h und 620 l/h und lag damit die meiste Zeit innerhalb der von der Norm gesetzten Grenzen ($600 \pm 60 \text{ l/h}$). Eine genaue Einhaltung der Vorgaben in der Norm ist dennoch nicht zwingend notwendig, da bei der Nachsimulation die Randbedingungen mit vorgegeben werden. Die Grenztemperatur wurde auf 40 °C festgesetzt. In Abbildung 73 und Abbildung 74 sind die Zeitpunkte der 5 Wasserentnahmen sowie die anschließende Endkonditionierung für die Versuche mit und ohne Adsorption zu erkennen.

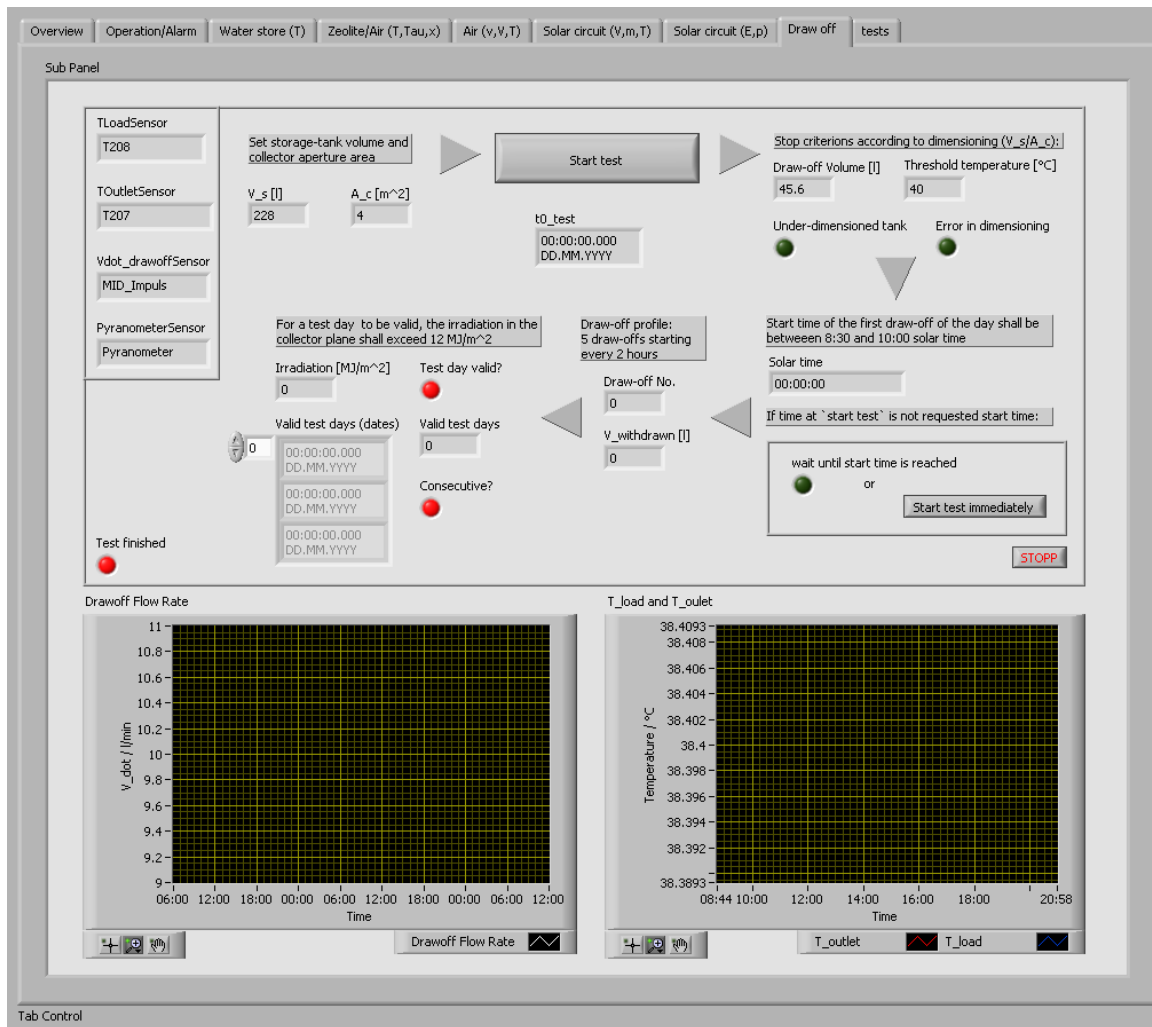


Abbildung 72: Bedienoberfläche für die Durchführung des Leistungstests (Test S-Sol B) in Anlehnung an die Norm ISO 9459-5

Der zeitliche Verlauf der Temperaturen im Warmwasserspeicher auf sieben verschiedenen Höhen ist in Abbildung 75 und Abbildung 76 dargestellt. Bei der Testsequenz ohne Adsorption kühlt sich der Speicher erwartungsgemäß mit jeder Warmwasserentnahme von unten her weiter ab, da im unteren Bereich kaltes Wasser nachströmt. So entsteht eine Schichtung von warmem und kaltem Wasser über die Höhe des Speichers. Die Nutztemperatur im oberen Speicherbereich wird bereits unterschritten, bevor das gesamte Wasservolumen ausgetauscht ist. Die Temperatur des entnommenen Wassers sinkt im Laufe der 5. Entnahme unter die Grenztemperatur von 40 °C, wodurch die Wasserentnahme vorzeitig beendet wird. Bei der Testsequenz mit Adsorption erwärmt sich das Wasser nach jeder Wasserentnahme durch den Wärmeeintrag von der Adsorption und der Bereitschaftsteil weist am Ende der Testsequenz noch Nutztemperatur auf. Dem Speicher wurden dabei etwa 20 % mehr Warmwasser oberhalb der Nutztemperatur entnommen als beim Test ohne Adsorption. In Abbildung 77 und Abbildung 78 ist jeweils die mittlere Temperatur im Warmwasserspeicher dargestellt. Die innere Energie des Speichers nach der fünften Wasserentnahme bei der Testsequenz mit Adsorption war im Vergleich zur Testsequenz ohne Adsorption um 26 % höher.

Die Durchführung eines Leistungstests veranschaulicht das Verhalten des Speichers unter Trinkwasserlast und stellt heraus, dass die mit kleiner Leistung freiwerdende Adsorptionsenthalpie für hohe Leistungsentnahmen nutzbar gemacht werden kann. Mit den in diesem Experiment vorliegenden Randbedingungen wird das Potential des Sorptionsspeichers nicht voll ausgeschöpft, da zum einen das

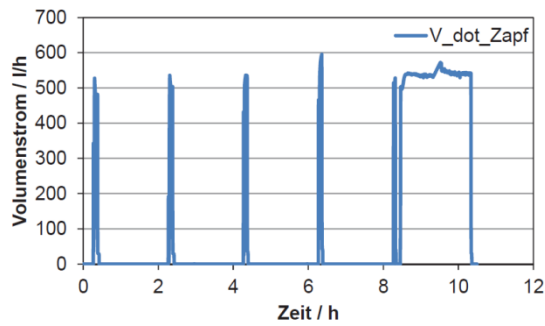


Abbildung 73: Volumenstrom des entnommenen Wassers aus dem Warmwasserspeicher, Testsequenz ohne Adsorption

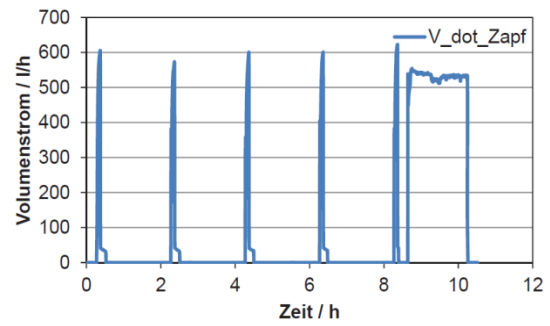


Abbildung 74: Volumenstrom des entnommenen Wassers aus dem Warmwasserspeicher, Testsequenz mit Adsorption

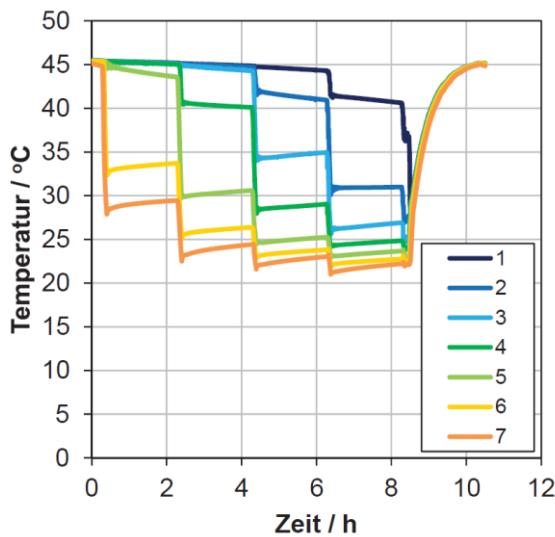


Abbildung 75: Temperaturen im Warmwasserspeicher (1: oberer Speicherbereich ...7: unterer Speicherbereich), Testsequenz ohne Adsorption

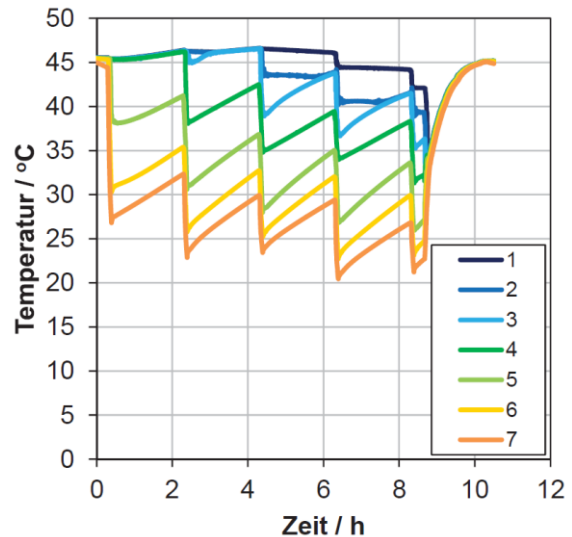


Abbildung 76: Temperaturen im Warmwasserspeicher (1: oberer Speicherbereich ...7: unterer Speicherbereich), Testsequenz mit Adsorption

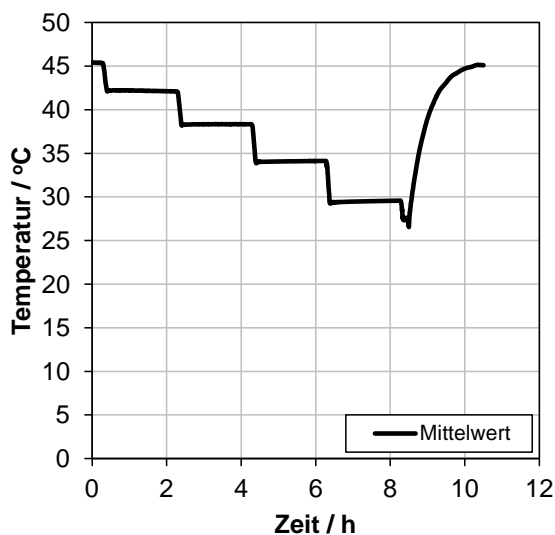


Abbildung 77: Temperatur im Warmwasserspeicher (Mittelwert), Testsequenz ohne Adsorption

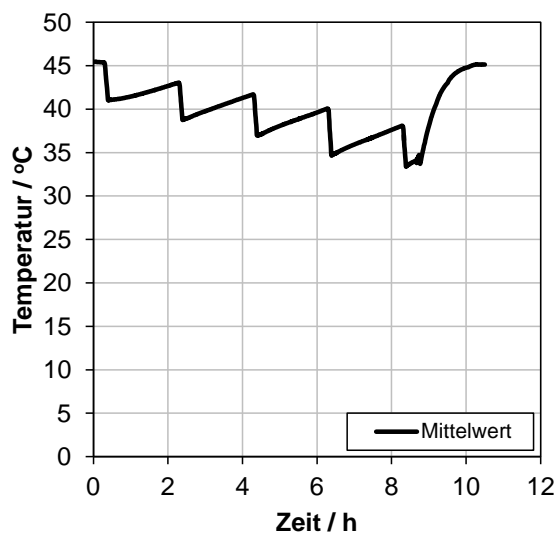


Abbildung 78: Temperatur im Warmwasserspeicher (Mittelwert), Testsequenz mit Adsorption

Adsorptionsmaterial zu Beginn des Leistungstests nicht vollständig trocken und zum anderen die Adsorption nach der 5. Wasserentnahme noch nicht abgeschlossen war. Dies ist beispielsweise daran zu erkennen, dass die Temperaturen im Warmwasserspeicher auch nach der 5. Wasserentnahme weiter ansteigen. Bei größeren Intervallen zwischen den Zapfungen würde mehr Leistung an den Warmwasserspeicher übertragen und dadurch jeweils höhere Wassertemperaturen erreicht.

Mit den durchgeführten Testsequenzen stehen Versuchsergebnisse mit hoher Dynamik zur Verfügung, die für einen Vergleich mit einem Modell des kombinierten Speichers herangezogen werden können, was in Kapitel 10.2 gezeigt wird.

9. Numerische Untersuchung des Sorptionswärmespeichers

In den experimentellen Untersuchungen wurden entscheidende Faktoren im Hinblick auf einen effizienten Betrieb des Speichers identifiziert. Herausforderungen stellen der Wärmetransport vom Sorptionswärmespeicher an den Warmwasserspeicher dar sowie die Wärmezufuhr in das Sorptionsmaterial während der Desorption. Genauere Untersuchungen des Sorptionswärmespeichers wurden mittels CFD mit dem Programm Ansys Fluent [1] durchgeführt um zum einen ein besseres Verständnis für die Vorgänge im Speicher zu erhalten und um Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten und zu überprüfen.

9.1 Wärmeeintrag in das Speichermaterial

Die Erwärmung des Speichermaterials für die Desorption wird durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Sorptionspeichermaterials behindert, weshalb der Wärmetransport konvektiv unterstützt wird. Experimente zeigten, dass die Temperaturverteilung im Speichermaterial vom Luftvolumenstrom abhängt (vergleiche Abschnitt 8.1.1). Da die experimentellen Untersuchungen nur in begrenztem Umfang Aufschluss über die Vorgänge im Speicher geben können wurden numerische Simulationen durchgeführt, um das Speicherverhalten umfassender zu untersuchen.

Es wurden stationäre Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse der stationären Simulation sind vergleichbar mit dem Zustand am Ende eines Experiments. Um Rechenzellen und damit Rechenzeit zu sparen wurde die Achsensymmetrie des Speichers ausgenutzt und 2D-Simulationen durchgeführt. Das Speichermaterial wurde als poröses Medium modelliert, die Parameter für Reibungs- und Trägheitsverluste wurden nach Ergun bestimmt. Zur Berücksichtigung turbulenter Strömung wurde das $k-\omega$ -SST Turbulenzmodell verwendet. Die Temperatur des Wärmeübertragers wurde fest vorgegeben und eine Temperaturabnahme von unten nach oben berücksichtigt. An der Mantelaußenseite des Sorptionspeichers wurden ein Wärmeübergangskoeffizient von $300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und eine Wassertemperatur von 70 °C angenommen, an der Bodenplatte ein Wärmeübergangskoeffizient von $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und eine Temperatur der Umgebungsluft von 25 °C . Die eintretende Luft hat eine Temperatur von 25 °C . Die Geometrie ist in Abbildung 79 dargestellt und zeigt auch die Positionen der Temperatursensoren aus dem Experiment.

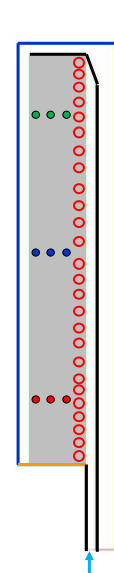


Abbildung 79: Geometrie des Sorptionspeichers für die Simulation

Zunächst wurde der vorhandene Prototypspeicher mit besonderem Augenmerk auf den Wärmeübertrager betrachtet. Da die Wendeln des Desorptionswärmeübertragers bei dem Prototyp aus fertigungstechnischen Gründen in nicht ganz gleichmäßigen Abständen angeordnet sind, wurde dieser auch für die Simulation entsprechend abgebildet. Die Wendel ist in der Darstellung im Schnitt in Abbildung 80 in Form von weißen Kreisen zu erkennen. In Abbildung 80a, b und c sind Temperaturprofile aus der Simulation bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen dargestellt. Da der Bodenbereich analog zum

realen Speicher als ungedämmt betrachtet wurde, treten dort erwartungsgemäß die niedrigsten Temperaturen auf. Insgesamt ergibt sich eine sehr inhomogene Temperaturverteilung im Sorptionsmaterial mit einer maximalen Temperaturdifferenz von etwa 50 K. Die Simulationsergebnisse spiegeln das experimentell gefundene Verhalten qualitativ wieder. Analog zu den experimentellen Ergebnissen zeigt sich auch bei der numerischen Strömungssimulation eine inhomogene Temperaturverteilung in der Zeolithschüttung. Auch hier ergibt sich mit steigendem Luftvolumenstrom eine größere Temperaturspreizung innerhalb der Schüttung und eine geringere mittlere Temperatur. Diese signifikanten Größen werden vom Modell richtig wiedergegeben. Ergänzend dazu geht aus den Simulationsergebnissen hervor, dass die Anordnung der Wärmeübertragerwendeln einen großen Einfluss auf die Temperaturverteilung hat. Insbesondere im mittleren Bereich treten größere Abstände auf, womit sich die in den Experimenten gefundene Temperaturverteilung erklären lässt und das Temperaturminimum in der Mitte des Sorptionswärmespeichers demnach auf den Abstand der Wärmeübertragerwendeln zurückzuführen ist.

Die stationären Simulationen entsprechen dem Zustand am Ende der experimentellen Untersuchungen. Ein Vergleich ist in Abbildung 82 dargestellt und zeigt, dass nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation besteht. Das erarbeitete Simulationsmodell stellt ein praktikables Werkzeug dar, um gezielt und zeiteffizient Optimierungsmöglichkeiten zu erarbeiten. Als naheliegender erster Schritt wurde eine Wärmeübertragerwendel mit regelmäßiger Wicklung untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 81 gezeigt. Es stellt sich eine deutlich homogenere Temperatur im Speichermaterial mit einer Temperaturdifferenz kleiner 10 K ein.

Um das noch vorhandene geringe Temperaturgefälle abzubauen, kann der Wärmeübertrager im oberen Bereich gezielt dichter gewickelt werden. Tritt die Luft vorgewärmt in den Sorptionsspeicher ein, wird das Temperaturniveau insgesamt angehoben. Eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse ist in Abbildung 83 gegeben. Die Untersuchungen zeigen, dass mit den entsprechenden Maßnahmen eine einheitliche Temperatur auf hohem Niveau erreichbar ist.

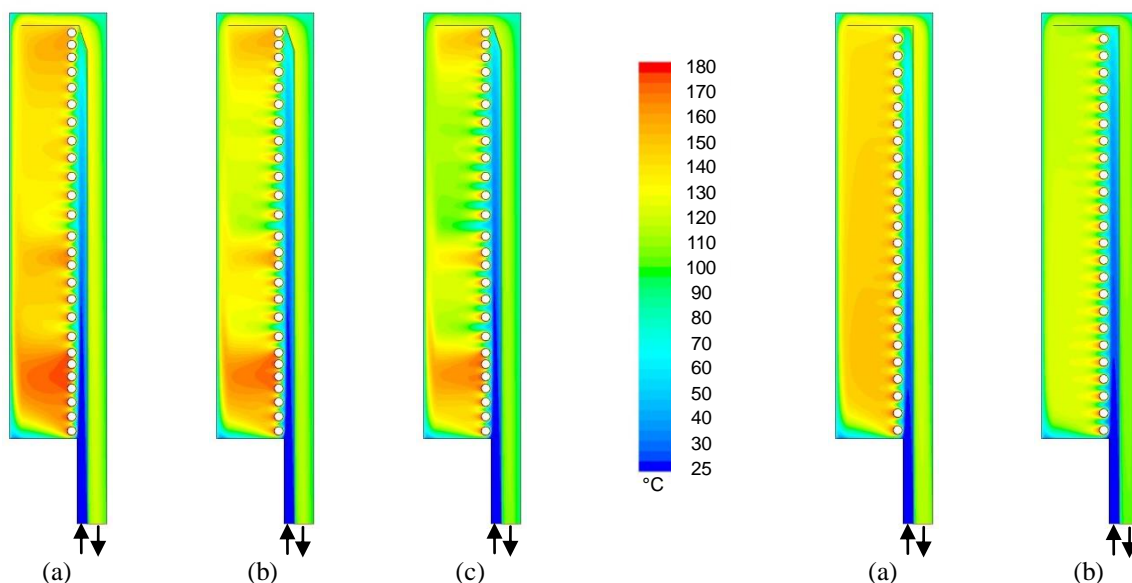


Abbildung 80: Temperaturprofil des Sorptionswärmespeichers aus Simulation, Luftvolumenstrom (a) $40 \text{ m}^3/\text{h}$, (b) $60 \text{ m}^3/\text{h}$, (c) $80 \text{ m}^3/\text{h}$

Abbildung 81: Temperaturprofil eines Speichers mit gleichmäßiger Anordnung des Wärmeübertragers aus Simulation, Luftvolumenstrom (a) $40 \text{ m}^3/\text{h}$, (b) $80 \text{ m}^3/\text{h}$

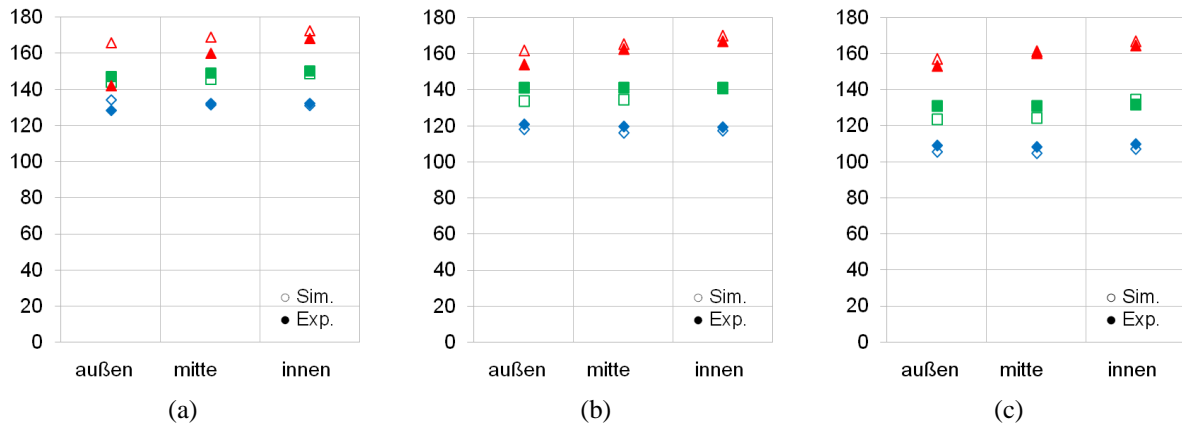
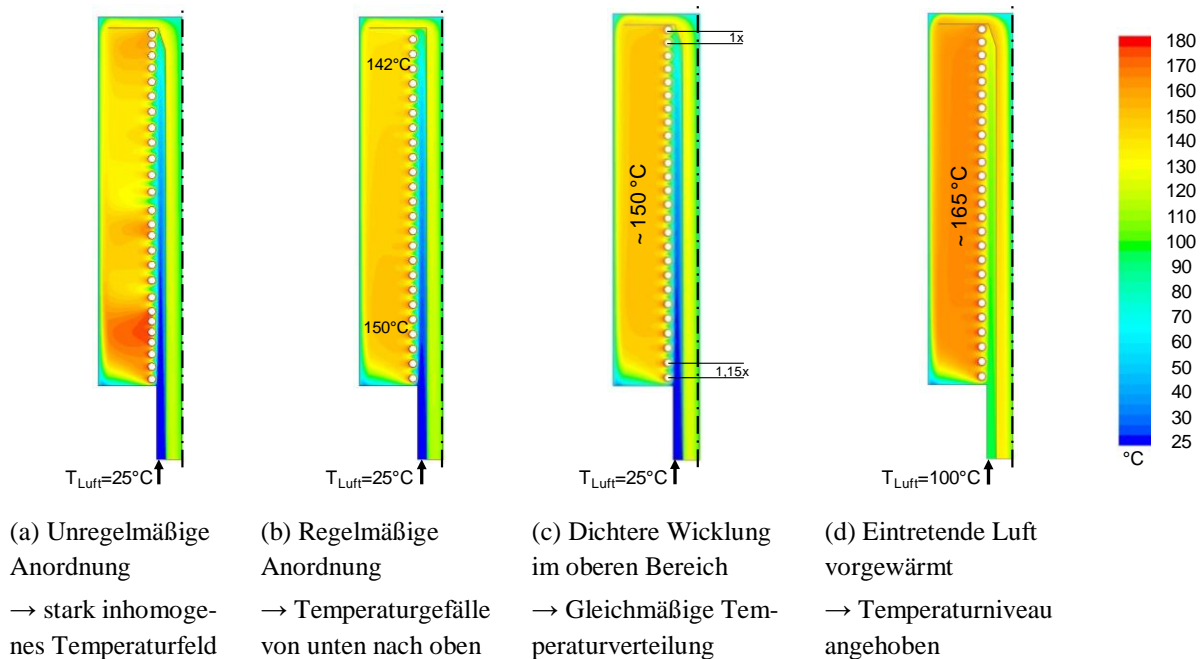


Abbildung 82: Temperaturen im Zeolithbett aus Simulation (○) und Experiment („stationärer Zustand“) (●), Luftvolumenstrom (a) 40 m³/h, (b) 60 m³/h, (c) 80 m³/h, Position der Messstellen vgl. Abbildung 55



(a) Unregelmäßige Anordnung → stark inhomogenes Temperaturfeld
 (b) Regelmäßige Anordnung → Temperaturgefälle von unten nach oben
 (c) Dichtere Wicklung im oberen Bereich → Gleichmäßige Temperaturverteilung
 (d) Eintretende Luft vorgewärmt → Temperaturniveau angehoben

Abbildung 83: Temperaturverteilung im Sorptionswärmespeicher aus Simulation, Luftvolumenstrom 40 m³/h

9.2 Wärmetransport vom Sorptionsspeicher in den Warmwasserspeicher

Der Wärmetransport vom Sorptionsspeicher an den Warmwasserspeicher ist insbesondere bei der Adsorption von Bedeutung. Die Übertragung der Adsorptionswärme an den Warmwasserspeicher erfolgt durch die erwärmte Luft, die durch den ringspaltförmigen Luftkanal strömt, der in Abbildung 84 dargestellt ist. Der luftseitige Wärmeübergang stellt den limitierenden Faktor beim Wärmetransport vom Sorptionsspeicher an den Warmwasserspeicher dar. Durch eine geometrische Veränderung der Sorptionsspeicherwand, etwa durch den Einsatz von Rippen bzw. Turbulenzpromotoren, kann die Wärmeübertragung gesteigert werden, zum einen durch eine Vergrößerung der wärmeübertragenden Oberfläche und zum anderen durch Anregung von Turbulenz.

Die neue Wandgeometrie sollte eine möglichst große Oberfläche besitzen und bessere Eigenschaften im Hinblick auf den Wärmeübergang aufweisen. Um dies zu erreichen bietet es sich an strukturierte Oberflächen zu verwenden, beispielsweise Edelstahlbleche die mit einer Prägung versehen sind. Sol-

che Profilbleche, wie sie beispielhaft in Abbildung 85 abgebildet sind, werden in zahlreichen Formen und Anordnungen standardmäßig hergestellt.

Die Verwendung eines strukturierten, zylinderförmigen Blechs als Sorptionsmanteel anstelle der bisherigen gefalteten Oberfläche, welche für den ersten Prototypen verwendet wurde, bietet zudem eine Vereinfachung für die Fertigung des Sorptionswärmespeichers, da nur ein Zylinder aus Profilblech gebogen werden muss, der aber dennoch eine große Oberfläche besitzt und dessen Strukturen als Turbulenzpromotoren dienen. Darüber hinaus kann auch die Druckstabilität des Sorptionsmanteels bei der Verwendung dieser Bleche erhöht werden.

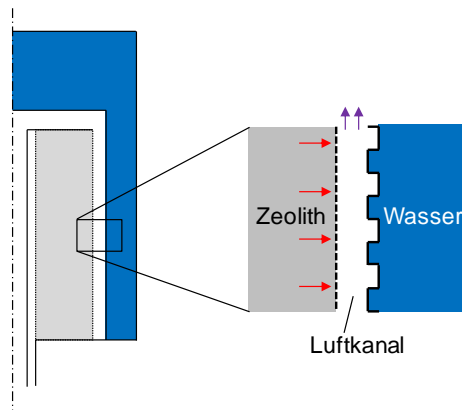


Abbildung 84: Ringspaltförmiger Luftkanal im kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeicher, schematische Darstellung der Sorptionspeicherwand mit Oberflächenstrukturen



Abbildung 85: Beispiele für profilierte Bleche

9.2.1 Voruntersuchungen unter Annahme von laminarer Strömung

Bei der Untersuchung des Wärmeübertragungsverhaltens mit CFD-Methoden wurden zunächst Voruntersuchungen mit vier verschiedenen Geometrien der Sorptionspeicherwand durchgeführt, die in Abbildung 86 dargestellt sind. Die Spaltbreite beträgt 30 mm. Die Berechnungen erfolgten zweidimensional und unter Annahme einer laminaren Strömung.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 87 gezeigt. Die berippte Wand weist einen geringeren Wärmeübergangskoeffizienten auf als die glatte Wand. Die Rippen sind offenbar zu nah beieinander angeordnet, so dass die Zwischenräume nicht durchströmt werden und die Wärmeübertragung infolgedessen sinkt. Eine Erhöhung des Wärmeübergangs wird mit den zackenförmigen Wänden erzielt. Im Vergleich zur glatten Wand wird die größte Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten um den Faktor 2,3 mit der Struktur „enge Zacken“ erreicht.

In Abbildung 88 ist der Einfluss des Volumenstroms beziehungsweise der Eintrittsgeschwindigkeit der Luft auf die Wärmeübertragung gezeigt. Eine Vervierfachung der Luftgeschwindigkeit am Eintritt von 0,01 m/s auf 0,04 m/s bewirkt eine Steigerung des Wärmeübergangskoeffizienten um den Faktor 3,1 von 4,86 W/(m²K) auf 15,1 W/(m²K).

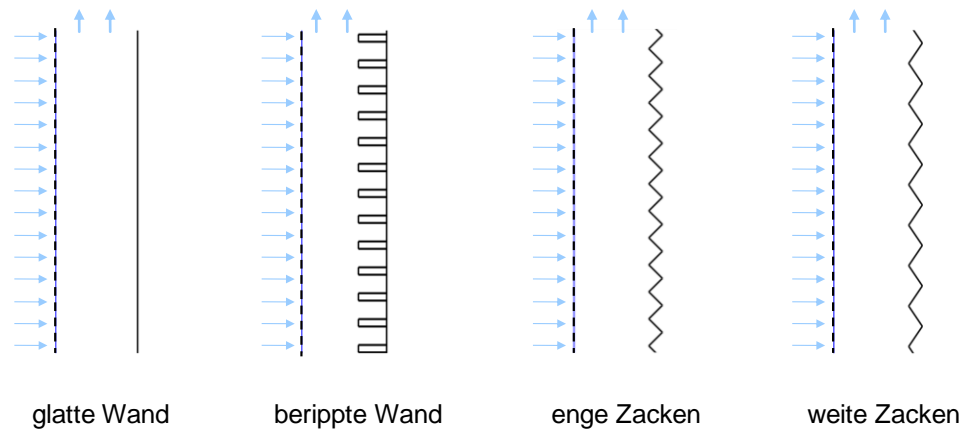


Abbildung 86: Sorptionsspeicherwand mit verschiedenen Oberflächenstrukturen

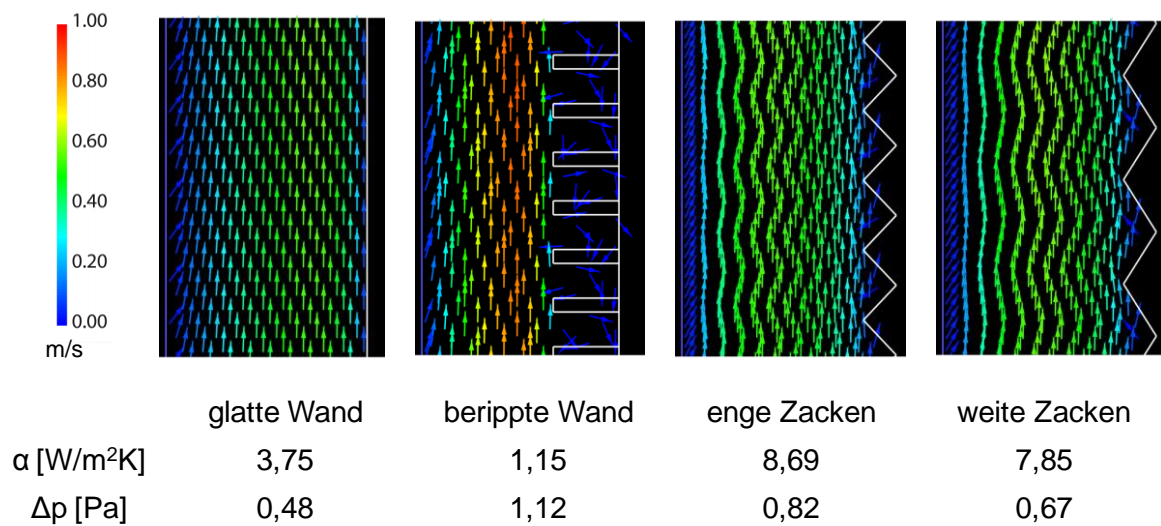


Abbildung 87: Ausschnitte aus dem Luftkanal mit Geschwindigkeitsvektoren, verschiedene Oberflächenstrukturen, Luft: $v_{\text{Eintritt}} = 0,02$ m/s, $T_{\text{Eintritt}} = 60$ °C, Wasser: $T = 40$ °C

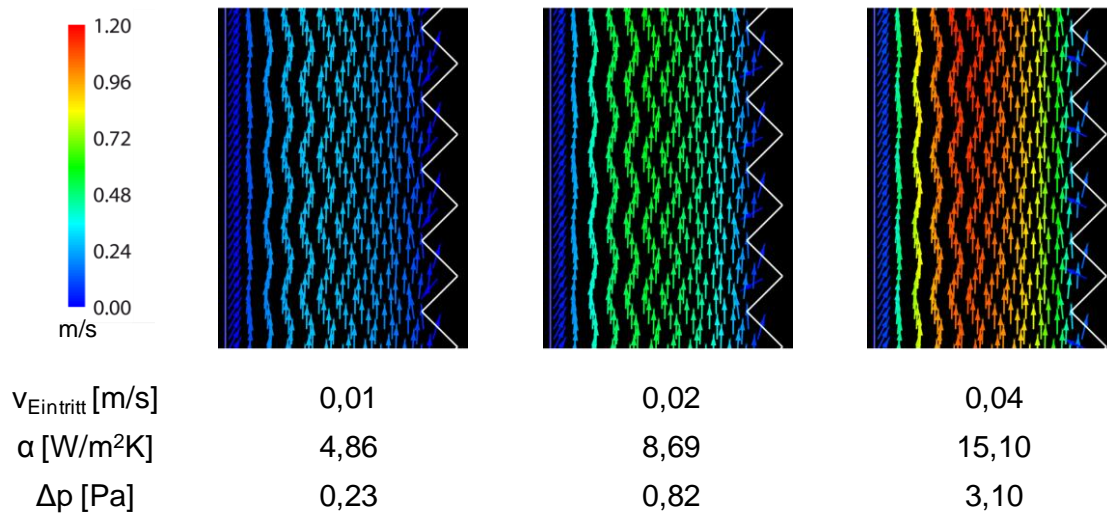


Abbildung 88: Ausschnitte aus dem Luftkanal mit Geschwindigkeitsvektoren, Oberflächenstruktur „enge Zacken“ bei Variation der Lufteintrittsgeschwindigkeit, Luft: $T_{\text{Eintritt}} = 60$ °C, Wasser: $T = 40$ °C

9.2.2 Untersuchungen unter Annahme von laminarer Strömung

Bei dem vorhandenen Prototypspeicher wurde eine Erhöhung der Wärmeübertragung bereits durch eine Oberflächenvergrößerung realisiert, indem der Sorptionsspeichermantel sternförmig gefaltet ausgeführt wurde (vgl. Abbildung 34). Die Wärmeübertragende Oberfläche vergrößert sich dadurch im Vergleich zu einem einfachen Zylinder von etwa $1,4 \text{ m}^2$ auf 2 m^2 .

Um einen Vergleich zwischen Simulation und Experiment vornehmen zu können wurde der Istzustand des Prototyps simuliert. Für die Simulation wurde der Luftspalt zwischen dem Sorptionsmaterial und dem Sorptionsspeichermantel abgebildet und dabei die Symmetrie des Speichers ausgenutzt, d.h. es wurde nur ein „Zackenelement“ (siehe Abbildung 89) betrachtet. Das entsprechende Simulationsgebiet ist in Abbildung 90 blau dargestellt. Als Randbedingungen wurde eine gleichförmige Luftgeschwindigkeit am Eintritt in das Gebiet mit einer Temperatur von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgegeben, für die Außenseite des Mantels eine Wassertemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einem konstanten Wärmeübergangskoeffizient von $300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Bei einem Luftvolumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ wurden in der Simulation 230 W übertragen, was in guter Übereinstimmung mit dem Experiment steht. Dort wurde bei den entsprechenden Bedingungen ein Wärmestrom von etwa 250 W erreicht. Die maximale Reynolds-Zahl, die am oberen Ende des Luftkanals auftritt, beträgt $\text{Re}_{\text{max}} = 1150$ bei einem Volumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Berechnungen unter der Annahme einer laminaren Strömungsform sind daher gerechtfertigt.

Eine Steigerung des Wärmeübergangs kann durch eine Profilierung der Oberfläche erzielt werden. Als profilierte Oberflächen können typische Strukturen, wie sie in Abbildung 85 gezeigt sind, verwendet werden. Die Wärmeübertragung kann zudem durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit verbessert werden, die entweder durch einen höheren Luftvolumenstrom oder durch einen schmaleren Luftspalt zwischen Zeolithschüttung und Sorptionsspeichermantel erreicht wird. Erste CFD-Untersuchungen erfolgten an einer Geometrie mit versetzt angeordneten, quadratischen Noppen mit Abmessungen von $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$. Auch hier wurden Symmetriebedingungen zugrunde gelegt und lediglich ein Ausschnitt von 20 mm Breite aus dem Ringspalt zwischen Zeolith und Sorptionsspeichermantel berechnet, der schematisch in Abbildung 92 dargestellt ist. Die Noppengeometrie ist in Abbildung 91 gezeigt. Die Spaltbreite wurde gegenüber dem Prototyp reduziert und auf 15 mm gesetzt. Bei einem Luftvolumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ werden bereits 490 W übertragen. Die Steigerung im Vergleich zum sternförmig gefalteten Sorptionsspeichermantel ist in erster Linie auf die höhere Strömungsgeschwindigkeit bei gleichem Luftvolumenstrom durch den kleineren Strömungsquerschnitt im Luftspalt zurückzuführen. Bei einer Erhöhung des Volumenstroms auf $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ergeben sich 820 W . Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die maximalen Reynolds-Zahlen am oberen Ende des Kanals betragen bei 60 , 80 und $100 \text{ m}^3/\text{h}$ jeweils $\text{Re}_{\text{max}} = 1325$, 1770 und 2210 . Die kritische Reynolds-Zahl für den Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung beträgt etwa 2300 . Turbulenz kann aber insbesondere bei Vorhandensein von Strömungsstörungen bereits früher auftreten. Für die folgenden Berechnungen wurde daher ein Turbulenzmodell verwendet.

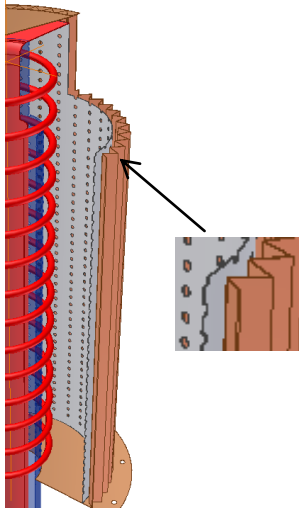


Abbildung 89: Sorptionswärmespeicher mit Mantel aus gefaltetem Blech

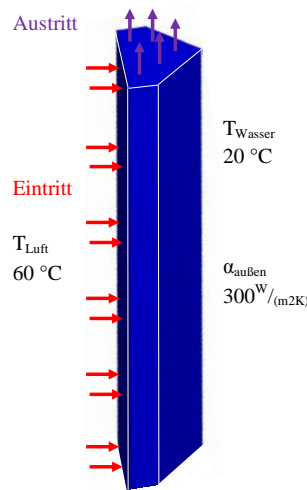


Abbildung 90: Simulationsgebiet des Prototypspeichers (Luftspalt)

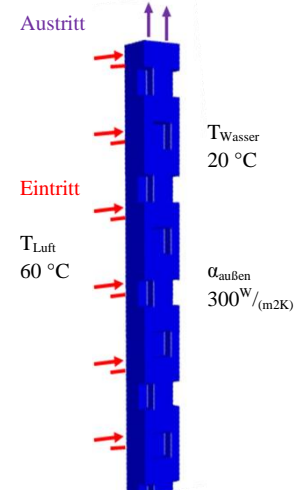


Abbildung 91: Simulationsgebiet der Geometrie mit quadratischen Noppen (10x10x5 mm)

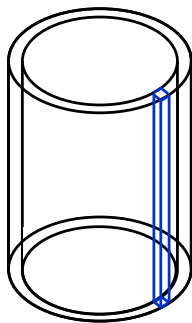


Abbildung 92: Simulationsgebiet als Ausschnitt aus dem ringspaltförmigen Luftkanal

Tabelle 4: Simulationsergebnisse der Geometrie mit quadratischen Noppen

\dot{V} m ³ /h	\dot{Q} W	Δp Pa
60	490	3,0
80	660	5,1
100	820	7,6

9.2.3 Untersuchungen unter Berücksichtigung der Turbulenz

Die mit Ansys Fluent 14.0 verfügbaren Modelle bzw. Möglichkeiten zu Berücksichtigung von Turbulenz [1] wurden auf ihre Eignung für die geplante Anwendung hin geprüft. Nach einer so getroffenen Vorauswahl erfolgte die endgültige Auswahl eines Turbulenzmodells für die Simulation durch Vergleich verschiedener Modelle mit experimentellen Untersuchungen eines längs angeströmten Kanals mit Turbulenzpromotoren aus der Literatur [28], [29], bei denen Reynolds-Zahlen im Bereich des laminar-turbulenten Umschlags betrachtet werden. Wie in Abbildung 93 und Abbildung 94 dargestellt, zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Literaturdaten und Simulationsergebnissen mit dem Transitions-*k-kl-omega*-Modell und dem Reynolds-Spannungs-Modell (RSM) in Bezug auf den Druckverlust und die Wärmeübertragung. Die geringeren relativen Abweichungen zu den experimentellen Daten ergeben sich mit dem Transitions-*k-kl-omega*-Modell. In Abbildung 95 sind beispielhaft die u-Geschwindigkeitskomponenten einer Simulation mit dem Transitions-*k-kl-omega*-Turbulenzmodell und des Experiments aus der Literatur in Ausschnitten des Kanals dargestellt. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Gewisse Abweichungen treten hauptsächlich in den Bereichen hinter den Strömungshindernissen auf, in denen Rückströmung vorkommt. Das Transitions-*k-kl-omega*-Turbulenzmodell wurde für die weiterführenden Untersuchungen verwendet.

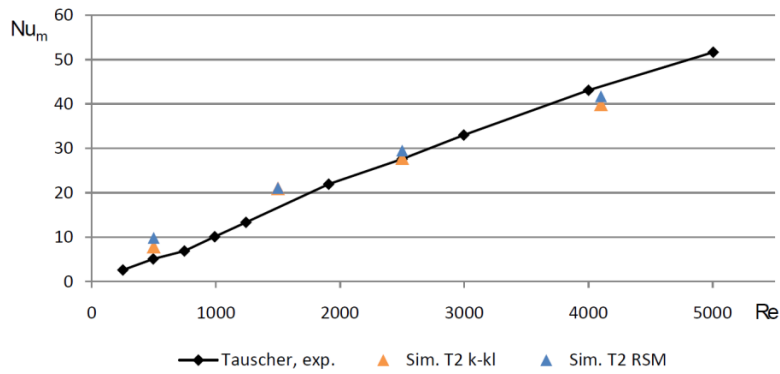


Abbildung 93: Mittlere Nusselt-Zahl in Abhängigkeit von der Reynolds- Zahl, experimentelle Literaturdaten [28] und Simulation mit Transitions- $k-kl-\omega$ -Modell und Reynolds-Spannungs-Modell

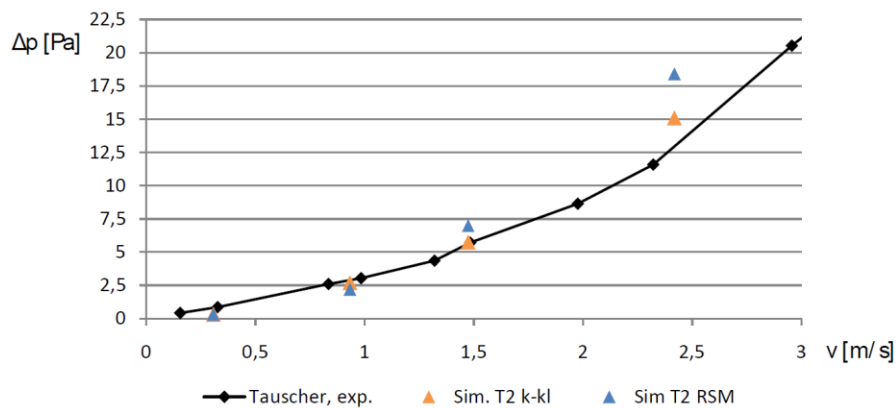


Abbildung 94: Druckverlust in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, experimentelle Literaturdaten [28] und Simulation mit Transitions- $k-kl-\omega$ -Modell und Reynolds-Spannungs-Modell

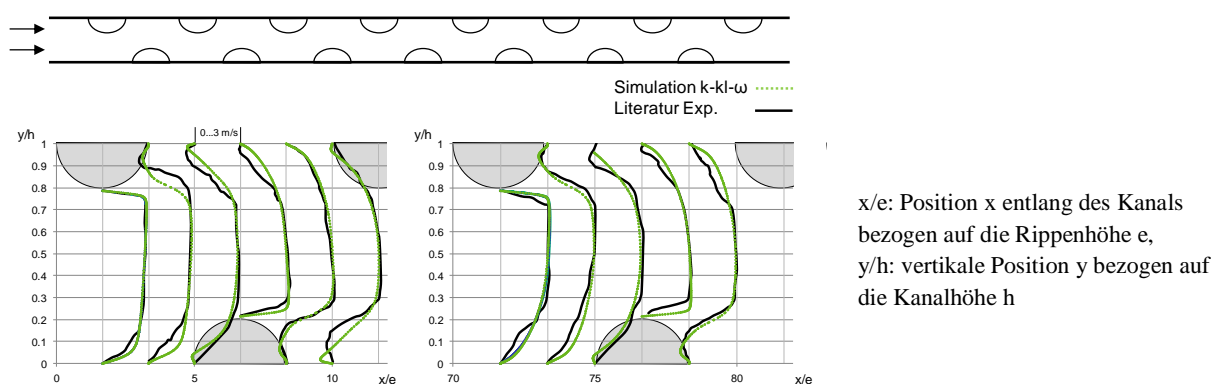


Abbildung 95: u -Geschwindigkeitskomponenten aus Simulation und Experiment, Ausschnitte des längs angeströmten Kanals aus der Literatur [28]

Mit dem Transitions- $k-kl-\omega$ -Turbulenzmodell wurde der Wärmeübergang im quer angeströmten Kanal bzw. Ringspalt (vgl. Abbildung 96) mit verschiedenen Oberflächenstrukturen untersucht. Simuliert wurde ein Segment des Ringspalts in voller Höhe. Das Simulationsgebiet ist in Abbildung 97 angedeutet. Hemisphärische Dellen, flügelartige Profile oder Rippe-Nut Anordnungen in multi-V-Anord-

nung, die in Abbildung 98 dargestellt sind, führen, wie in Tabelle 5 gezeigt, zu einem deutlichen Anstieg des Wärmestroms im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. Die Effektivität ϵ_W ist ein Maß in dem sowohl die Wärmeübertragung als auch der Druckverlustbeiwert berücksichtigt werden. Sie beschreibt die Verbesserung des Wärmeübergangs bei gleicher Pumpen- bzw. Gebläseleistung. Der Druckverlust steigt durch die Strukturen, die Größenordnung bleibt für diese Anwendung aber unkritisch. Der Einsatz dieser Oberflächenstrukturen bewirkt eine bis zu 4,3-fache Erhöhung der Wärmeübertragung vom Sorptionsspeicher an den Warmwasserspeicher. Diese einfache Maßnahme bietet somit das Potential die Effizienz des kombinierten Speichers weiter zu erhöhen.

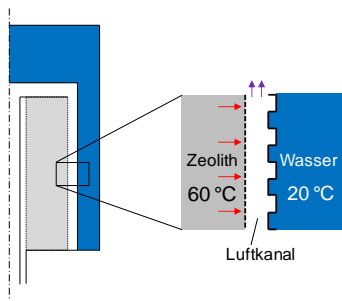


Abbildung 96: Ringspaltförmiger Luftkanal im kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeicher

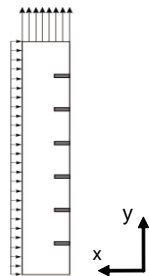


Abbildung 97: Simulationsgebiet

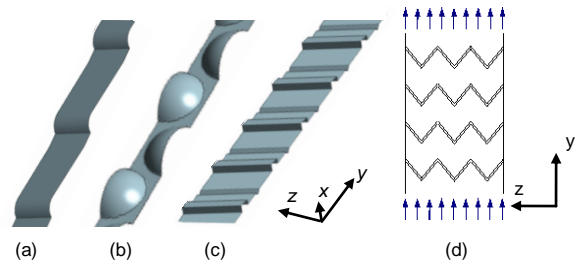


Abbildung 98: (a) flügelartige Turbulenzpromotoren in multi-V-Anordnung, (b) konvexe hemisphärische Dellen und (c) abgeschrägte Rippe-Nut Strukturen in multi-V-Anordnung, (d) multi-V-Anordnung

Tabelle 5: Simulationsergebnisse von Druckverlust, Wärmestrom und Effektivität im Luftkanal mit verschiedenen Oberflächenstrukturen

Anordnung	Δp [Pa]	\dot{Q} [W]	$\epsilon_W = \frac{Nu/Nu_{glatt}}{(f/f_{glatt})^{1/3}}$
Glatt	2,3	202	1
Flügelform (a)	5,2	683	1,96
Rippe-Nut (c)	3,9	829	2,4
Dellen (b)	5,4	875	2,23

9.3 Numerische Untersuchung der Adsorption

Der Wärme- und Stofftransport im Festbett eines Sorptionsspeichers wurde mit der CFD-Software Ansys Fluent abgebildet. Dazu wurde über Schnittstellen von Fluent ein Adsorptionsmodell eingebunden.

9.3.1 Adsorptionsmodell

Die Entwicklung eines Modells zur numerischen Simulation des Prozessverlaufs der Wärmespeicherung durch Adsorption erfolgt auf Basis von Gleichgewichtsbetrachtungen. Zur Berechnung des Gleichgewichts wird das von Gorbach [10] hergeleitete Modell verwendet. Die Gleichgewichtsbeladung berechnet sich nach Gleichung 11. Darin ist X die Adsorbensbeladung in kg/kg und p der Partial-

druck des Wasserdampfs in mbar. Die Parameter $b_{0..4,0}$, $b_{0..4,T}$ und T_0 in den Gleichungen 12 und 13 wurden von Gorbach angepasst.

$$X(b_{0..4}, p_j) = b_0(T) \cdot \frac{b_1(T) \cdot p_j + b_2(T) \cdot p_j^2}{1 + b_3(T) \cdot p_j + b_4(T) \cdot p_j^2} \quad (11)$$

$$b_0(T) = b_{0,0} \cdot e^{b_{0,T}(1-T/T_0)} \quad (12)$$

$$b_{1..4}(T) = b_{1..4,0} \cdot e^{(b_{1..4,T}T_0/T)-1} \quad (13)$$

Zur Beschreibung der Adsorptionskinetik wird ein „linear driving force“ (LDF) Ansatz verwendet. Mit q_j ist die Beladung des Adsorbens in mol/kg bezeichnet, q_j^* ist die Gleichgewichtsbeladung.

$$\frac{\partial q_j}{\partial t} = K^{\text{LDF}} \cdot (q_j^* - q_j) \quad (14)$$

Der Massenübergangskoeffizient K^{LDF} wird nach Gleichung 15 berechnet. Darin ist D_{eff}^0 ein aus den Experimenten zu bestimmender effektiver Diffusionskoeffizient. R_p ist der Partikelradius, ρ_{Sch} die Schüttdichte, ε_B ist die Porosität des Festbetts und ε_G der Gasanteil, d.h. der Hohlraumanteil des Festbetts inklusive des Hohlraumanteils der Partikel.

$$K^{\text{LDF}}(y_j, p, T) = D_{\text{eff}}^0 \frac{15(\varepsilon_G - \varepsilon_B) T^{0,75} p_j}{R_p^2 \rho_{\text{Sch}} R} \frac{1}{p} \frac{1}{q_j^*} \quad (15)$$

9.3.2 Simulationsergebnisse

Die experimentellen Ergebnisse der Versuche an einem axial durchströmten Festbett dienen als Referenz für die Verifizierung des Modells. Das axial durchströmte Festbett aus Zeolith 4A hat eine Länge von 12 cm und einen Durchmesser von 4 cm. Die Geometrie wird zweidimensional mit Achsensymmetrie abgebildet. Die Schüttung wird als poröses Medium modelliert. Für die Materialeigenschaften der Schüttung werden die Stoffwerte für den Zeolith 4A verwendet. Die Randbedingungen aus den Versuchen wie Temperatur, Massenstrom und Wasserdampfpartialdruck der eintretenden Luft, werden für die Simulation übernommen. Die gemessenen und berechneten Temperaturen an 5 Positionen in der Schüttung, sowie an Ein- und Austritt sind in Abbildung 99 dargestellt und weisen eine zufriedenstellende Übereinstimmung auf. Die Abweichungen der Temperaturen sind darauf zurückzuführen, dass im Modell die Kapazität der Reaktorwand und die Wärmeverluste über die Wand nicht mit berücksichtigt wurden. Die im Experiment gemessene Aufnahme von Wasser beträgt 19,7 g, nach den Ergebnissen der Simulation werden 21,2 g Wasser aufgenommen. Der Unterschied ergibt sich daraus, dass zu Beginn der Simulation von einem vollständig desorbierten Sorptionsmaterial ausgegangen wurde, während im Experiment vermutlich einer Restbeladung vorhanden war.

Da sich bereits für das kleine Rechengitter des axialen Festbetts sehr lange Rechenzeiten ergeben, wurde dieser Ansatz für die Abbildung des Sorptionsspeichers nicht weiterverfolgt. Statt der Kopplung des Sorptionsspeicher-CFD-Modells mit einem Modell des Warmwasserspeichers und den weiteren Komponenten des Gesamtsystems, welche mit dem Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS abgebildet werden, wurde der Sorptionsspeicher ebenfalls als TRNSYS-Komponente modelliert und die Systemgleichungen mit dem Softwarepaket PDEXPACK gelöst (siehe Kapitel 10.1).

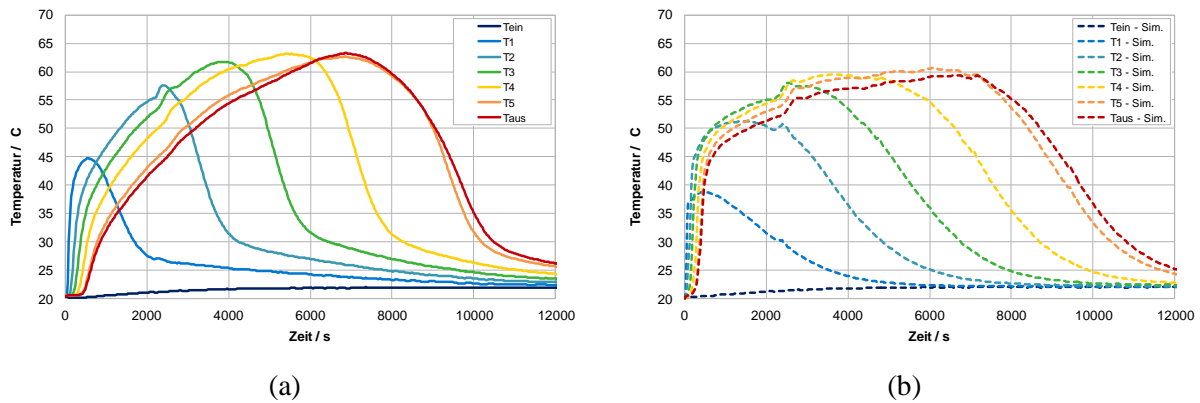


Abbildung 99: Temperaturverläufe im axial durchströmten Festbett aus (a) Experiment und (b) Simulation, Wasserdampfpartialdruck der eintretenden Luft ca. 20 mbar

10. Numerische Systemsimulation

Ein komplexes System, wie das hier behandelte Speicherkonzept, macht eine detaillierte Simulation zur energetischen Bewertung und zur zielgerichteten Verfahrensentwicklung notwendig. Dazu erfolgte die modellmäßige Umsetzung des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für die Berechnung und Bewertung von Jahreserträgen auf Basis von Simulationen mit der Gebäude- und Anlagensimulationssoftware TRNSYS.

10.1 TRNSYS-Modell des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers

Ziel der mit TRNSYS durchgeführten Jahressimulationen ist es, die thermische Leistungsfähigkeit und damit die Verbesserungen des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers im Vergleich mit einem konventionellen Solarsystem aufzuzeigen. Weiterhin sind die Systemsimulationen notwendig um eine Regelstrategie für das Gesamtsystem zu entwickeln.

Während die Simulation des konventionellen solaren Systems keine Schwierigkeit darstellt und am ITW große Erfahrungen auf diesem Gebiet vorliegen, ist die Implementierung des integrierten Sorptionsspeichers ein beachtlicher numerischer Aufwand.

Zur Lösung dieser Aufgabe wurde eine neue TRNSYS-Komponente programmiert, die die physikalischen Vorgänge im Sorptionsspeicher abbildet. Diese nutzt das Software Paket PDEXPACK zur Lösung der Systemgleichungen. Die thermische Kopplung zwischen dem Sorptionsspeicher und dem Warmwasserspeicher erfolgt über eine ebenfalls entwickelte Schnittstelle.

10.1.1 Modellierung des Adsorptions- und Desorptionsprozesses mit PDEXPACK

Die Modellbildung der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge erfolgt in eindimensionaler Form mit homogener Energiebilanz für die Gas- und Feststoffphase und einer separaten Massenbilanz jeweils für die Gas- und Feststoffphase. Die Bilanzen werden ergänzt um eine Gleichung zur Berechnung des Adsorptionsgleichgewichts. Zur Lösung des resultierenden Systems parabolischer Differentialgleichungen der allgemeinen Form

$$\bar{B} \cdot \frac{\partial \vec{y}}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \frac{\partial \vec{y}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\bar{D} \cdot \frac{\partial \vec{y}}{\partial z} \right) + \vec{Q} \quad (16)$$

wird das Programmpaket PDEX eingesetzt.

Die zugrunde liegende Numerik wurde am Konrad-Zuse-Zentrum unter dem Namen PDEXIM entwickelt und ist ein adaptives numerisches Verfahren zur Lösung von Systemen gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen (PDG) in einer Raumdimension [24], [25]. Die örtliche Diskretisierung beruht auf einem Finite Differenzen-Verfahren mit variabler Orts- und Zeitschrittweitensteuerung. Durch eine Fehlerschätzung in Ort und Zeit in Verbindung mit dem adaptiven Gitter wird eine hohe Genauigkeit bei gleichzeitig großer Stabilität und Robustheit des Verfahrens erreicht. Am Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart wurde das Paket für eine benutzerfreundliche Anwendung auf typische verfahrenstechnische Problemstellungen weiterentwickelt. Am ITW liegt umfangreiche Erfahrung mit der Simulation von Adsorptionsvorgängen unter Verwendung von PDEXPACK vor. In zahlreichen Untersuchungen konnte die Genauigkeit der Lösung mit Hilfe von Messergebnissen validiert werden [16]. In dieser Arbeit wurde das komplette Softwarepaket PDEXPACK in TRNSYS implementiert, um so zu einer geschlossenen Darstellung der solarthermischen Anlage inklusive Sorptionsspeicher zu kommen und gleichzeitig auf eine validierte Software zur detaillierten Beschreibung der Sorptionsvorgänge zurückgreifen zu können.

Es resultiert ein System partieller Differentialgleichungen in parabolischer Form, mit der die mathematische Beschreibung der thermischen und physikalischen Abläufe des durchströmten Sorptionsbetts möglich ist.

Homogene Energiebilanz für Gas- und Feststoffphase:

$$\left(\varepsilon \cdot \rho_g \cdot c_{p,g} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_{p,s}\right) \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} = -G_z \cdot c_{p,g} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} + \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial z^2} + \dot{m}_{\text{ads},V} \cdot \Delta H_{\text{ads}} \quad (17)$$

Massebilanz der Komponente H₂O in der Gasphase:

$$\varepsilon \cdot \rho_g \frac{\partial x_g}{\partial t} = -G_z \frac{\partial x_g}{\partial z} + \varepsilon \cdot D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 x_g}{\partial z^2} - \dot{m}_{\text{ads},V} \quad (18)$$

Massebilanz der Komponente H₂O in der Feststoffphase:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \frac{\partial X_s}{\partial t} = \dot{m}_{\text{ads},V} \quad (19)$$

mit dem übergehenden Stoffstrom:

$$\dot{m}_{\text{ads},V} = f(X_{GG} - X_s) \quad (20)$$

10.1.1.1 Bestimmung des Adsorptionsgleichgewichts X_{GG}

Neben der Beschreibung des Wärme- und Stofftransports hängt die Güte des Simulationsergebnisses von der korrekten Beschreibung des Adsorptionsgleichgewichts ab.

Die Adsorptionsisothermen des Zeolith 4A lassen sich durch einen einfachen Langmuir-Ansatz mit ausreichender Genauigkeit darstellen. Eine genauere Abbildung wird mit dem in Kapitel 9.3.1 angegebenen Ansatz von Gorbach erreicht [10]. Die Adsorptionsisothermen des Zeolith 13XBF werden ebenfalls durch den Ansatz von Gorbach beschrieben. Für diesen Zeolithyp wurden Sorptionsisothermen am ITW in einem Sorptionsanalysator der Firma Hiden Isochema vom Typ IGA002 gemessen. Basierend auf diesen Messwerten wurden die Parameter des Ansatzes von Gorbach für das Adsorptionsgleichgewicht angepasst. Die resultierenden Sorptionsisothermen sind zusammen mit den gemessenen Sorptionsisothermen in Abbildung 100 dargestellt. In dem Bereich zwischen 1 und 20 mbar, der für die hier betrachtete Anwendung relevant ist, zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

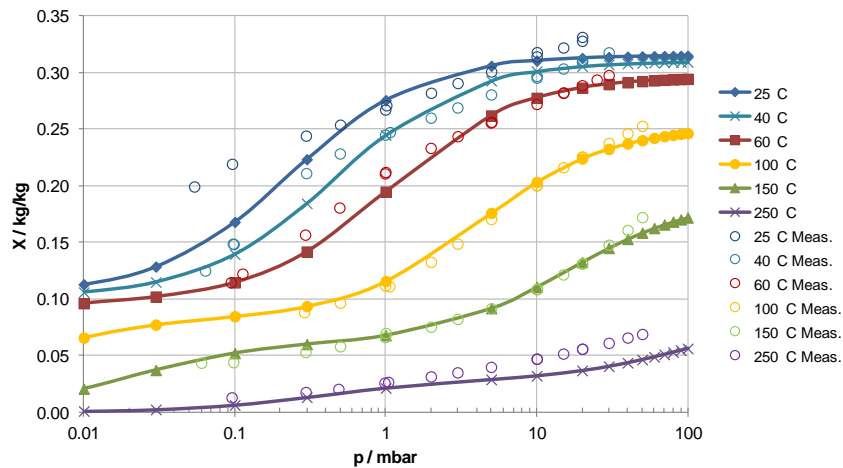


Abbildung 100: Am ITW gemessene Sorptionsisothermen des Zeolith 13XBF (o) und angepasste Isothermen nach dem Ansatz von Gorbach (—)

10.1.2 Kopplung zwischen Sorptionspeicher und Warmwasserspeicher

Nachfolgend wird auf die wesentlichen Elemente der Kopplung zwischen Sorptionswärmespeicher und Warmwasserspeicher in der Simulationsumgebung TRNSYS eingegangen. Das Modell des kombinierten Speichers ist in Abbildung 101 dargestellt. Für den Warmwasserspeicher wird das TRNSYS-Modell „Type 340“ verwendet, welches einen Schichtenspeicher mit bis zu vier internen Wärmeübertragern, 10 Anschlüssen für die direkte Be- und Entladung sowie einen internen elektrischen Heizstab beschreibt. Für weitere Informationen sei auf [6] verwiesen.

Das grundlegende Modell des Sorptionspeichers wurde bereits in Kapitel 10.1.1 beschrieben. Die Wärmeübertragung vom Sorptionspeicher an den Warmwasserspeicher erfolgt über den warmen

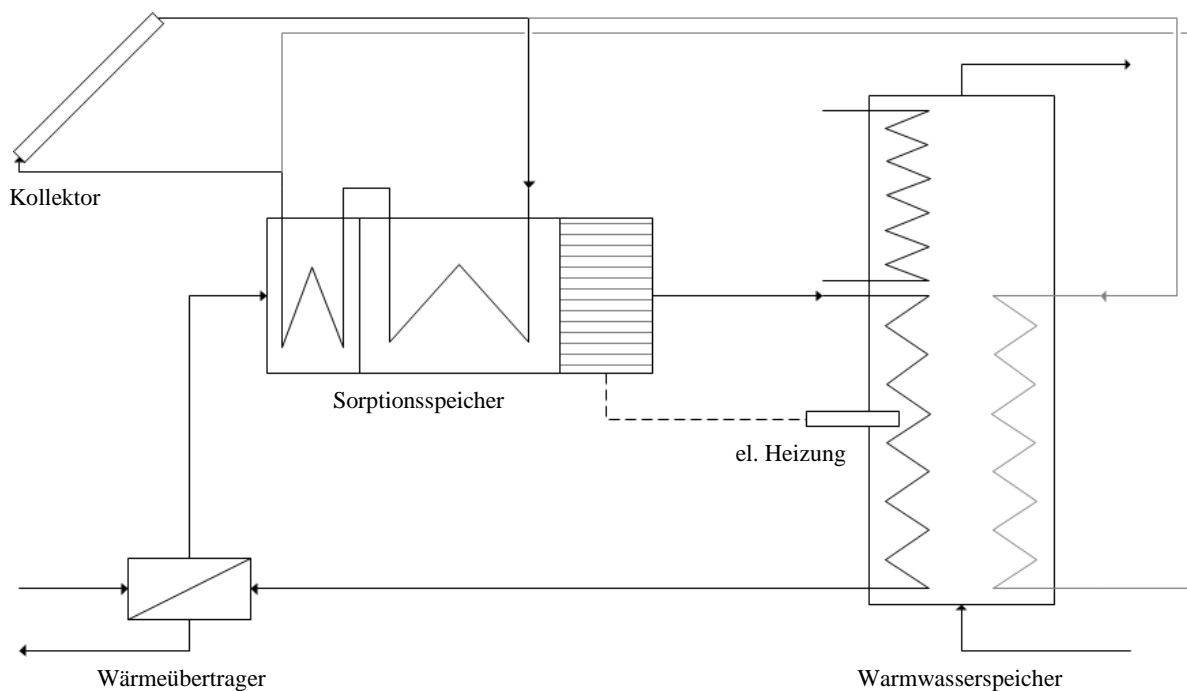


Abbildung 101: Modell des kombinierten Speichers

Luftstrom in einem internen Wärmeübertrager des Warmwasserspeichermodells. Dabei wird die Kondensationsenthalpie berücksichtigt, falls es bei der Desorption zu Kondensation des desorbierten Wasserdampfs im Wärmeübertrager kommt. Im Modell wird diese Wärme dem Wasserspeicher über einen elektrischen Heizstab zugeführt. Wenn weder eine Adsorption noch eine Desorption abläuft, wird die sogenannte Standby-Wärmeübertragung vom Sorptionspeicher an den Warmwasserspeicher im Modell ebenfalls über den elektrischen Heizstab realisiert. Um die numerische Stabilität zu verbessern ist der Desorptionswärmeübertrager so geschaltet, dass die Luft vorgewärmt in die eigentliche Sorptionseinheit eintritt.

10.1.3 Erste qualitative Überprüfung der Systemsimulationen

Zunächst wurde das thermische Verhalten des Sorptionsmodells ohne Anbindung an den Warmwasserspeicher überprüft, indem Adsorptions-/Desorptionszyklen in einem axial durchströmten Laborreaktor nachgerechnet wurden. Hierbei zeigte sich die bereits in anderen Untersuchungen [16] erzielte gute Übereinstimmung zwischen experimentellen Daten und Simulationsrechnungen.

Anschließend wurde die thermische Ankopplung des Sorptionsmodells an den Warmwasserspeicher getestet. Hier konnte ein qualitativ korrektes Verhalten aufgezeigt werden. Beispielhaft ist in Abbildung 102 ein numerisches Experiment dargestellt, das den Wärmetransport zwischen Wasserspeicher und Sorptionspeicher demonstriert. Nach einer kurzen Stillstandsphase (0,5 h) beginnt die Adsorption. Dazu wird der Sorptionspeicher mit feuchter Raumlucht ($\vartheta_{\text{ein}} = 20\text{ °C}$, $x_{\text{ein}} = 10\text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr.L.}}$) durchströmt. Die Temperaturen T1 bis T6 zeigen den zeitlichen Verlauf der Temperaturen im Adsorbens, radial von innen nach außen (vgl. Abbildung 102 rechts). Deutlich ist die wandernde Temperaturfront zu erkennen. Das untere Diagramm zeigt die Aufheizung des Warmwasserteils ($T_w - T_{w3}$) während der Adsorptionsphase. Zum Zeitpunkt 10,5 h wird die Adsorption beendet und es erfolgt eine Warmwasserzapfung. Aufgrund des eintretenden Kaltwassers sinkt die Speichertemperatur auf 10 °C ab. Durch das umgebende Kaltwasser kühlt sich nun auch der Sorptionspeicher ab. Umgekehrt steigt durch die Wärmeabgabe des Sorptionspeichers die Wassertemperatur entsprechend des Kapazitätsverhältnisses um ca. $1,5\text{ K}$ an.

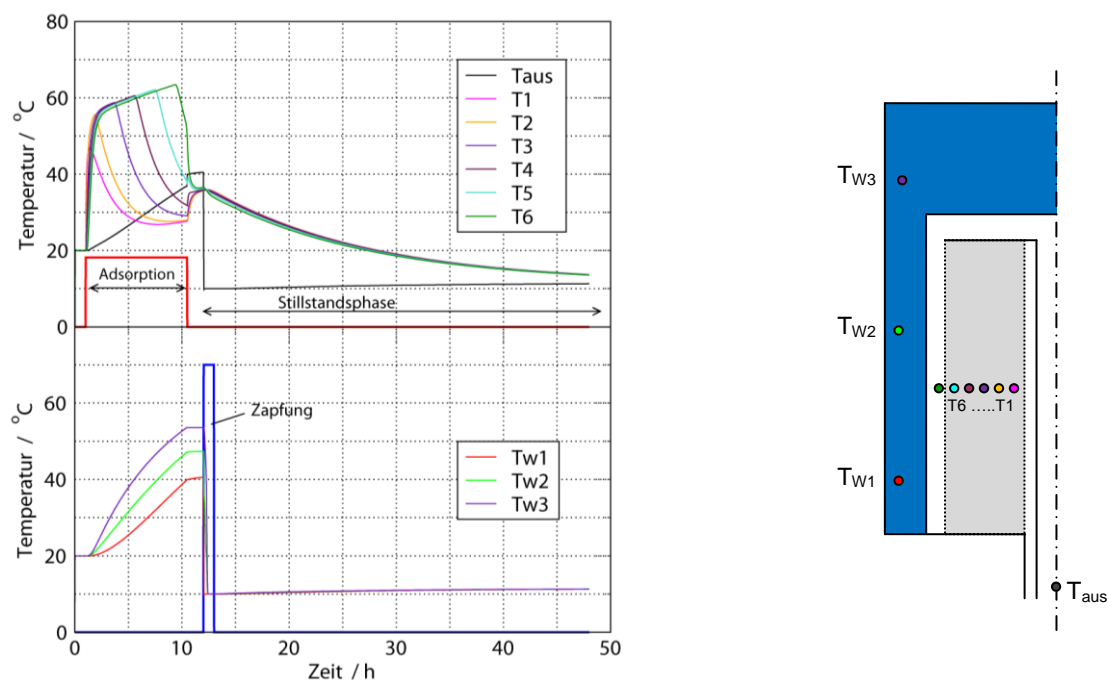


Abbildung 102: Temperaturverläufe im Sorptionspeicher (oberes Diagramm) und im Wasserspeicher (unteres Diagramm) während einer Adsorption mit anschließender Warmwasserzapfung und Stillstandsphase

10.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten

Durch die in Kapitel 8.2.3 beschriebenen Untersuchungen stehen experimentelle Daten zur Verfügung, die für einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen verwendet werden. Die dort aufgeführten Versuche wurden mit Zeolith 13XBF durchgeführt.

Die gleichen Randbedingungen und Eintrittsgrößen aus dem Experiment wurden für die Simulation vorgegeben und es zeigte sich, dass das qualitative Verhalten trotz des sehr komplexen Modells mit vielen überlagerten Mechanismen gut wiedergegeben werden kann. Die Abweichungen zwischen dem Experiment und der Simulation liegen in einem akzeptablen Bereich. Exemplarisch ist in Abbildung 103 und Abbildung 104 ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten gezeigt. Dort ist beispielhaft der zeitliche Temperaturverlauf aus Experiment und Simulation an drei radialen Positionen im Sorptionsspeicher dargestellt. Zwischen den Ergebnissen des Experiments und der Simulation zeigt sich eine gute qualitative Übereinstimmung. Bei dem Experiment wurde dem Warmwasserspeicher durch die fünfmalige Entnahme von Warmwasser und die Endkonditionierung insgesamt eine Energiemenge von 4,086 kWh entnommen. In der Simulation betrug die Summe der entnommenen Energiemenge aus Warmwasserzapfungen und Endkonditionierung 4,105 kWh. Der relative Fehler beträgt 0,45 %.

Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, um mit der Gesamtanlage Jahressimulationen durchzuführen, die eine Bewertung des Ertrags im Vergleich zu einem System mit herkömmlichem Warmwasserspeicher ermöglichen.

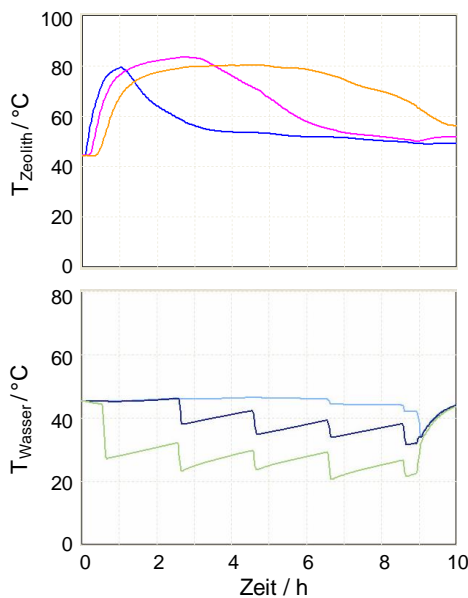


Abbildung 103: Temperaturverlauf im Sorptionsspeicher (oben) und im Warmwasserspeicher (unten), Experiment

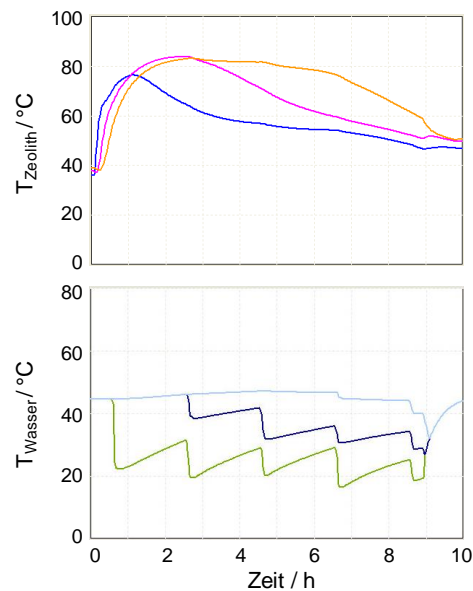
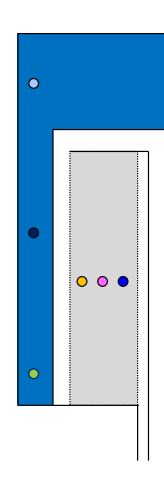


Abbildung 104: Temperaturverlauf im Sorptionsspeicher (oben) und im Warmwasserspeicher (unten), Simulation



10.3 Jahressimulationen

Mit dem entwickelten Modell werden Jahressimulationen durchgeführt, um den kombinierten Warmwasser-Sorptionsspeicher im Hinblick auf seine thermische Leistungsfähigkeit zu bewerten und einen Vergleich mit Standardspeichern, d.h. reinen Warmwasserspeichern, vornehmen zu können.

10.3.1 Vorgaben und Modellparameter

Für die Jahressimulationen mit dem kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeicher und für die entsprechenden Simulationen mit den Referenzspeichern verschiedener Größe werden in Bezug auf Wetterdaten, Trinkwasserlast, Kollektor- und Speicherdaten die gleichen Bedingungen vorgegeben.

10.3.1.1 Wetterdaten

Für die Jahressimulation werden reale Wetterdaten herangezogen. Es wird der Wetterdatensatz Testreferenzjahr (TRY) für den Standort Würzburg verwendet.

10.3.1.2 Trinkwasserlast

Für den jährlichen Wärmebedarf an Warmwasser werden 2945 kWh zugrunde gelegt. Dies entspricht einer täglichen Entnahme von 200 Litern Wasser mit einer Temperatur von 45 °C. Die 200 Liter werden auf drei Warmwasserentnahmen – mit 80, 40 und 80 Litern – aufgeteilt.

10.3.1.3 Kollektordaten

Als Kollektor wurden CPC-Vakuumröhrenkollektoren mit 4 und 6 m² Kollektorfläche verwendet. Die Wirkungsgradkennlinie in Abbildung 105 zeigt eindrucksvoll, dass auch bei einer Temperaturdifferenz von 160 K zwischen Kollektor und Umgebung immer noch 50 % Wirkungsgrad erreicht werden und damit die benötigten hohen Temperaturen für die Desorption erreicht werden können. Die Ausrichtung der Kollektoren erfolgt nach Süden, die Neigung beträgt 45°. Der Volumenstrom im Solarstromkreis beträgt 40 l/(m²h) [26].

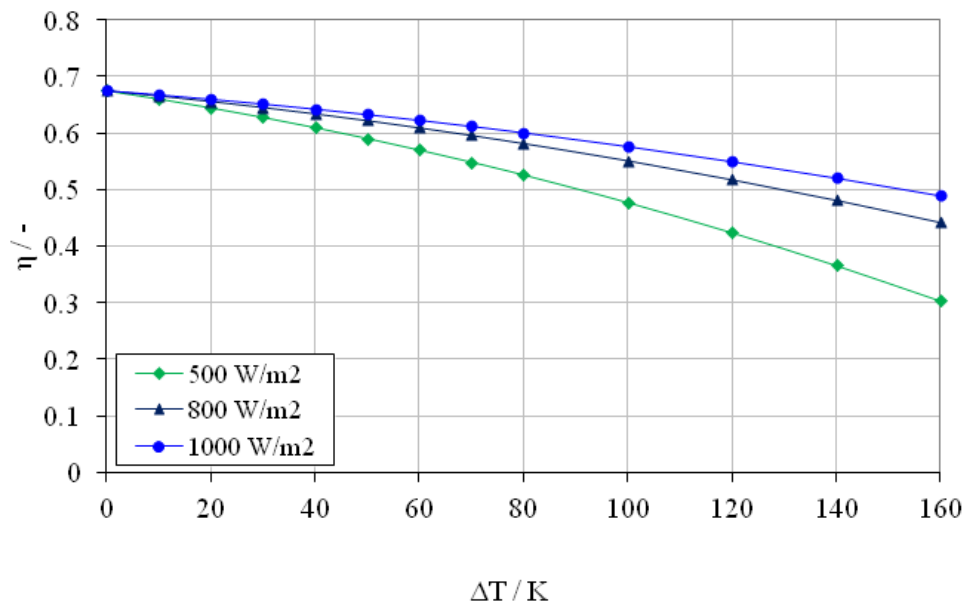


Abbildung 105: Wirkungsgradkennlinie CPC-Vakuumröhrenkollektor bei unterschiedlichen hemisphärischen Bestrahlungsstärken, Prüfbericht ITW 01col235

10.3.1.4 Speicherdaten

Das Nachheizvolumen der Speicher beträgt jeweils 40 % des Wasservolumens. Die Wärmeverlustrate der Warmwasserspeicher wird nach [27] mit $WVR = 0,13 \cdot \sqrt{\frac{V_{Sto}}{\text{Liter}}}$ in $\frac{W}{K}$ angesetzt, was einem sehr gut gedämmten Wärmespeicher entspricht. Für den kombinierten Speicher wird für diese Berechnung das Gesamtvolumen von 370 l zugrunde gelegt. Der aufgebaute Prototyp besitzt ein Gesamtvolumen von

400 l, die sich auf 230 l Wasser und 100 l Sorptionsmaterial aufteilen. Das übrige Volumen wird von Luftkanälen, Wärmeübertragern etc. eingenommen. Dieses lässt sich durch Optimierung der Geometrie noch reduzieren, beispielsweise durch den Einsatz der in Kapitel 9.2 beschriebenen Profilbleche, so dass das Gesamtvolumen auf 370 l gesenkt werden kann. Dieser Wert wird im Modell für die Berechnung der Wärmeverlustrate verwendet.

Die Speicherkapazität eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers ist höher als die eines reinen Warmwasserspeichers mit gleichem Volumen. Je nach Größe des Sorptionsspeichers ergeben sich unterschiedliche Speicherkapazitäten. Dabei muss unterschieden werden zwischen dem theoretisch möglichen Wert, wenn die Beladungsdifferenz des Sorptionsmaterials komplett ausgeschöpft werden kann, und dem tatsächlich nutzbaren Energieinhalt, der geringer ausfällt wenn die Desorptionstemperatur nicht für eine vollständige Desorption ausreicht und der Zeolith folglich noch mit einem Rest Wasserdampf beladen bleibt. Der in Tabelle 6 angegebene nutzbare Energieinhalt ergibt sich unter der Annahme, dass bei den gegebenen Betriebsbedingungen 70 % der Beladungsdifferenz genutzt werden können.

Tabelle 6: Energieinhalt des Sorptionsmaterials (Zeolith 13XBF)

	theoretisch vorhanden	tatsächlich nutzbar
100 l	25,3 kWh	17,7 kWh
130 l	32,9 kWh	23,0 kWh
150 l	38,0 kWh	26,6 kWh
180 l	45,5 kWh	31,9 kWh

Pro Tag werden etwa 8 kWh an Trinkwarmwasser benötigt. Mit Zeolith 13XBF in den oben angegebenen Volumina ist es möglich, den Bedarf an Trinkwarmwasser für 2 bis 4 Tage ohne solare Einstrahlung zu decken. Hinzu kommt der Energieinhalt des Warmwasserspeichers, der beispielsweise bei 230 l Wasservolumen 13,3 kWh beträgt, wenn von einer Temperaturdifferenz von 50 K ausgegangen wird. Ein Speicher mit 100 l Sorptionsmaterial und 230 l Wasser ist damit ausreichend für die Deckung des Wärmebedarfs für knapp 4 Tage.

Der Speicherinhalt eines 400 l Warmwasserspeichers beträgt zum Vergleich etwa 23,2 kWh bei einer Temperaturdifferenz von 50 K. Der Energieinhalt eines reinen Warmwasserspeichers mit 400 l könnte so theoretisch für etwa 3 Tage ohne solare Einstrahlung ausreichen. Aufgrund der Wärmeverluste ist diese Zeit jedoch kürzer.

Bei den Jahressimulationen wird ein Speicher mit 100 l Sorptionsmaterial und 230 l Warmwasser bzw. mit 130 l Sorptionsmaterial und 200 l Warmwasser untersucht.

10.3.1.5 Weitere Randbedingungen

Die Umgebungstemperatur des Speichers wird für die Berechnungen mit 15 °C vorgegeben. Die Berechnung der anteiligen Energieeinsparung f_{sav} erfolgt nach Gleichung 21 [8].

$$f_{sav} = \frac{Q_{konv} - Q_{aux}}{Q_{konv}} \quad (21)$$

Darin ist Q_{aux} die Nachheizenergie und Q_{konv} der Gesamtwärmebedarf einer konventionellen, nicht solarthermischen Anlage zur Deckung der Trinkwasserlast.

10.3.2 Systemregelung

Im Unterschied zur Regelung konventioneller solarthermischer Anlagen verfügt das hier betrachtete System sowohl über eine zusätzliche Wärmequelle (Adsorption) als auch über eine zusätzliche Wärmesenke (Desorption). Insbesondere unterscheiden diese sich in Leistung (Adsorption ca. 1 kW) bzw. im Temperaturniveau (Desorption 100–180 °C). Um diese erweiterte Funktionalität effizient in das Gesamtsystem zu integrieren, wird eine angepasste Regelstrategie benötigt. Insbesondere wurden Regelgrößen und -kriterien für die Zu- bzw. Abschaltung sowie den Betrieb der verfügbaren Quellen und Senken erarbeitet, beispielsweise Bedingungen und Systemzustände für den Start der Adsorptions- oder Desorptionsvorgänge.

Mit dem vorhandenen System stehen grundsätzlich drei Möglichkeiten für die Wärmezufuhr in den Warmwasserspeicher zur Auswahl, um die Temperatur im Bereitschaftsteil des Warmwasserspeichers auf Nutztemperatur zu halten: Priorität 1 hat dabei die solare Beladung, Priorität 2 die Adsorption, erst danach folgt die Nachheizung durch den Heizkessel. Eine Wärmezufuhr in den Warmwasserspeicher erfolgt außerdem auch „passiv“ während der Desorption.

Die Regelfunktionen sowie Ein- und Ausschaltkriterien verschiedener Komponenten und Vorgänge werden im Folgenden erläutert.

Auswahl zwischen solarer Beladung des Wasserspeicher oder Desorption

Mit dem Kollektorfeld kann wahlweise der Warmwasserspeicher über den Solarkreiswärmeübertrager beladen werden oder über den Desorptionswärmeübertrager eine Desorption durchgeführt werden. Jeder Vorgang wird extern von einem Regler überwacht (Differenzregler und/oder PID). Für die Auswahl des Lademodus, d.h. ob der Warmwasserspeicher solar beladen wird oder eine Desorption durchgeführt wird, gelten die im Folgenden aufgeführten Bedingungen.

Zuerst wird der Warmwasserspeicher solar beladen bis am Temperatursensor im Bereitschaftsteil 65 °C erreicht sind. Für Temperaturen größer als 65 °C wird auf die Desorption umgeschaltet, sofern die Voraussetzungen dazu gegeben sind. Dabei wird zwischen Lademodus und Wartemodus unterschieden.

Lademodus: Falls die Temperatur im Bereitschaftsteil 65 °C übersteigt und die Kollektoraustrittstemperatur größer als 90 °C ist geht der Speicher in den Lademodus. Dabei wird eine Mindesthaltezeit von 0,2 Stunden aktiviert, d.h. die Desorption läuft für mindestens 0,2 Stunden.

Wartemodus: Falls die Kollektoraustrittstemperatur weniger als 90 °C aufweist beginnt der Wartemodus. Nach einer Mindestwartezeit von 0,1 Stunden wird die Zeit geschätzt, die der Kollektor zum Aufheizen auf über 90 °C voraussichtlich benötigt. Wenn diese Zeit kleiner als die maximal zulässige Wartezeit von 0,5 Stunden ist, dann wird im Wartemodus verblieben bis 90 °C erreicht sind und in den Lademodus gewechselt werden kann. Falls die geschätzte Einschalt-Wartezeit größer ist gilt der Einschaltvorgang als fehlgeschlagen und es wird auf die solare Beladung umgeschaltet und der Sorptionspeicher 1 Stunde lang für die Desorption gesperrt.

Werden am Temperatursensor im Bereitschaftsteil wieder 60 °C unterschritten, wird auf die solare Beladung zurückgeschaltet.

Desorption

Eine Desorption beginnt, wenn der Desorptionsmodus ausgewählt wurde und der Speicherstatus auf Laden steht. Zudem muss die Kollektoraustrittstemperatur 20 K über der Sorptionspeichertemperatur

liegen. Die Desorption endet und wird für eine Stunde gesperrt, wenn die Kollektoraustrittstemperatur weniger als 11 K über der Temperatur im Sorptionsspeicher liegt.

Wenn die Kollektoraustrittstemperatur im Lademodus unter 90 °C fällt, wird die Desorption ebenfalls beendet, vorausgesetzt die Mindesthaltezeit von 0,2 Stunden ist abgelaufen. Der Sorptionsspeicher wird dann für eine Sperrzeit von 1 Stunde gesperrt, während der keine Desorption möglich ist.

Die Desorption kann für bestimmte Zeiten oder Bedingungen deaktiviert werden, beispielsweise in den Wintermonaten. Eine Deaktivierung erfolgt auch wenn eine maximale Temperatur im Sorptionsspeicher überschritten wird oder wenn die Temperatur im Bereitschaftsteil 60 °C unterschreitet.

Wenn die Desorption aus den oben genannten Gründen nicht mehr verfügbar ist wird, falls möglich, auf die solare Beladung zurückgeschaltet, auch dann wenn die Bereitschaftsteiltemperatur größer als 65 °C ist.

Der Sollwert für die Temperatur der Desorption wird als Sollwert für den PID-Regler des Luftmassenstroms bei der Desorption verwendet. Die Desorptionssolltemperatur wird ausgehend von 90 °C stufenweise erhöht. Sie bleibt entweder bei 90 °C oder erhält den Wert aus dem vorangegangenen Zeitschritt oder wird auf 20 K über der Lufttemperatur am Sorptionsspeicheraustritt erhöht, je nachdem welcher Wert der größte ist. Der Luftmassenstrom während der Desorption beträgt zwischen 10 und 100 kg/h.

Der Massenstrom im Kollektorkreis beträgt bei der Desorption abhängig von der Kollektorfläche $\dot{m}_{\text{Koll}} = A_{\text{Koll,ges}} \cdot 50 \text{ kg/h}$.

Solare Beladung Wasserspeicher

Die Pumpe im Kollektorkreis erhält eine Einschaltfreigabe, wenn die Temperatur am Kollektoraustritt die Temperatur des entsprechenden Temperaturfühlers im Warmwasserspeicher um 6 K übersteigt. Der Betrieb endet, wenn die Kollektoraustrittstemperatur die Temperatur am Warmwasserspeichersensor wieder unterschreitet.

Die solare Beladung des Warmwasserspeichers erfolgt, wenn der Wasserspeicher ausgewählt wurde und der Kollektorkreis freigegeben ist und sofern die Überhitzungssperre, zur Vermeidung von Überhitzung im Warmwasserspeicher, nicht aktiviert ist.

Der Massenstrom im Kollektorkreis beträgt bei solarer Beladung abhängig von der Kollektorfläche $\dot{m}_{\text{Koll}} = A_{\text{Koll,ges}} \cdot 40 \text{ kg/h}$.

Adsorption

Einschaltkriterium: Die Adsorption geht in Betrieb, wenn der Warmwasserspeicher eine Temperatur von 53 °C unterschreitet. Die Bedingungen für das Einschalten sind, dass das Sorptionsmaterial zu höchstens 80 % mit Wasserdampf beladen ist und die Feuchte der eintretenden Luft den Wert $0,0035 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$ übersteigt (entspricht 5,5 mbar oder 23 % rH bei 20 °C).

Ausschaltkriterium: Die Adsorption wird beendet, wenn die Temperatur im Bereitschaftsteil des Warmwasserspeichers über 54 °C steigt oder die Temperatur der aus dem Sorptionsspeicher austretenden Luft kleiner ist als die Temperatur im Bereitschaftsteil des Speichers. Die Adsorption kann erst ausgeschaltet werden, wenn eine Mindesthaltezeit von 0,5 Stunden abgelaufen ist.

Wenn die Adsorption im vorhergehenden Zeitschritt aktiviert war, bleibt sie aktiviert sofern das Ausschaltkriterium nicht erfüllt wird. War die Adsorption im vorangehenden Zeitschritt nicht aktiviert, so wird sie aktiviert wenn das Einschaltkriterium erfüllt ist und zudem die Nachheizung ausgeschaltet ist. Der Luftmassenstrom für die Adsorption beträgt 150 kg/h.

Nachheizung

Die Nachheizung durch den Heizkessel wird aktiviert wenn die Temperatur im Bereitschaftsteil auf 45 °C fällt und heizt solange bis 50 °C erreicht sind.

10.3.3 Simulationsergebnisse

Jahressimulationen wurden mit den in Kapitel 10.3.1 aufgeführten Vorgaben sowohl für den kombinierten Speicher als auch für reine Wasserspeicher als Referenz durchgeführt. Eine Gegenüberstellung der anteiligen Energieeinsparung, der Stagnationszeiten und der Nachheiztage in den Sommermonaten ist in Tabelle 7 gezeigt.

Mit dem kombinierten Speicher, der sich aus einem 230 l Warmwasserspeicher und 100 l Sorptionspeicher zusammensetzt, ergibt sich eine anteilige Energieeinsparung von 72,9 %. Mit den Referenzspeichern mit 230, 330 oder 400 Litern Wasser ergeben sich hier geringere Werte zwischen 70,5 % und 72,2 %. Der kombinierte Speicher schneidet besser ab als die reinen Warmwasserspeicher, der Unterschied zu den Referenzspeichern ist allerdings nicht so groß wie erhofft.

Die Stagnationszeit fällt im Vergleich zu den Referenzspeichern deutlich kleiner aus, was daraus resultiert, dass die sogenannte „überschüssige Energie“ vom Kollektor zur Desorption verwendet wird.

Ein Anspruch für die solare Trinkwassererwärmung besteht darin, die Versorgungssicherheit in den Sommermonaten auf solarer Basis sicherzustellen, d.h. die Nachheiztage in den Sommermonaten zu minimieren, um etwa den Heizkessel ausschalten zu können. Inwieweit dies gelungen ist, ist in Tabelle 7 gezeigt, in der die Nachheiztage von Juni bis August dargestellt sind. Die Referenzspeicher weisen während dieser Zeit 7 bis 11 Tage auf in denen nachgeheizt werden muss. Mit dem kombinierten Speicher konnte diese Anzahl auf 4 Tage reduziert werden. Eine weitere Reduzierung auf 0 Tage konnte nicht erreicht werden, da während der Sommermonate auch 4-5 Tage ohne solare Einstrahlung hintereinander folgen können, der Energieinhalt des betrachteten Sorptionspeichers aber nur für gut 2,2 Tage ausreicht beziehungsweise inklusive des Warmwasserspeicher für knapp 4 Tage.

Eine Vergrößerung des Sorptionsteils, bei gleichbleibendem Gesamtvolumen, bewirkt in diesem Fall keine Verbesserung, da sich die damit einhergehende Verkleinerung des Warmwasservolumens ungünstig auswirkt. Die größere fühlbare Wärmekapazität des Wassers gegenüber dem Sorptionsmaterial führt in Zeiten mit geringem solaren Angebot zu etwas höheren Deckungsanteilen, weil die solaren Gewinne auf niedrigerem Temperaturniveau und damit bei höherem Kollektorwirkungsgrad im Wasser gespeichert werden können. In diesen Zeiten kann die höhere Speicherkapazität des Sorptionsmaterials nicht optimal genutzt werden, weil das benötigte Temperaturniveau vom Kollektor nicht effizient bereitgestellt werden kann. Dies zeigt sich in besonderem Maße bei Anlagen mit kleiner Kollektorfläche, wie aus den Ergebnissen der Simulationen mit einer Kollektorfläche von 4 m² in Tabelle 8 ersichtlich wird. Hier ergeben sich in Bezug auf die anteilige Energieeinsparung und die Anzahl der Nachheiztage in den Sommermonaten ähnliche Werte wie bei den Referenzspeichern. Die Stagnationszeit ist mit 2 bis 3 Tagen gegenüber den Referenzspeichern deutlich kleiner.

Tabelle 7: Ergebnisse der Jahressimulationen, Wetterdaten Standort Würzburg, 6 m² CPC-Vakuumröhrenkollektoren, Bedarf an Trinkwarmwasser 2945 kWh/Jahr, WWS... Warmwasserspeicher, SWS... Sorptionswärmespeicher

Speicher	anteilige Energieeinsparung	Nachheiztage Juni–August	Stagnationszeit
	%		h
Referenz 230 I _{WWS}	70,5	11	592
Referenz 330 I _{WWS}	71,9	8	484
Referenz 400 I _{WWS}	72,2	7	426
230 I _{WWS} + 100 I _{SWS}	72,9	4	174
200 I _{WWS} + 130 I _{SWS}	72,7	5	211

Tabelle 8: Ergebnisse der Jahressimulationen, Wetterdaten Standort Würzburg, 4 m² CPC-Vakuumröhrenkollektoren, Bedarf an Trinkwarmwasser 2945 kWh/Jahr, WWS... Warmwasserspeicher, SWS... Sorptionswärmespeicher

Speicher	anteilige Energieeinsparung	Nachheiztage Juni–August	Stagnationszeit
	%		h
Referenz 230 I _{WWS}	64,7	17	175
Referenz 330 I _{WWS}	65,0	15	87
Referenz 400 I _{WWS}	64,9	14	50
230 I _{WWS} + 100 I _{SWS}	65,1	15	2
200 I _{WWS} + 130 I _{SWS}	64,9	13	3

11. Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts ist es gelungen ein Konzept für die Kombination eines Sorptionspeichers mit einem Warmwasserspeicher zu entwickeln und einen Speicher im Originalmaßstab zu realisieren, mit dem die Funktionsfähigkeit des Verfahrens am Beispiel einer solaren Trinkwassererwärmung demonstriert wurde.

Der zu Beginn des Projekts geplante Feldtest konnte durch Verzögerungen im Projektfortschritt aus Zeitgründen nicht realisiert werden. Stattdessen wurden zahlreiche Laboruntersuchungen durchgeführt bei denen auch reale Bedingungen wie etwa ein Trinkwasserlastprofil untersucht worden sind.

Bei diesen Untersuchungen wurden die wesentlichen Limitierungen erkannt und bearbeitet und konnten zum Großteil verbessert werden, wie zum Beispiel im Hinblick auf die Aufheizung des Sorptionsmaterials für die Desorption oder bezüglich der Wärmeverluste durch den Luftstrom. Die Funktionsfähigkeit des Konzepts konnte gezeigt werden, die maßgeblichen Effekte wurden sichtbar und die grundlegenden Erwartungen, die zu Beginn des Projekts an das Konzept gestellt wurden, wurden er-

füllt. Beispielsweise wurde demonstriert, dass die Adsorptionsenthalpie trotz der für Feststoffspeicher typischen geringen Leistungsfreisetzung auch für hohe Leistungsentnahmen nutzbar gemacht werden kann, wenn ein Warmwasserspeicher als Pufferspeicher zur Verfügung steht.

Ökonomische Betrachtungen bezüglich des kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers führen in erster Linie zu den Kosten für das Sorptionsmaterial. Bei dem derzeitigen Preis in der Größenordnung von 3,20 € pro Kilogramm Zeolith 13XBF ergeben sich für das Sorptionsmaterial eines Speichers Kosten von etwa 240 €. Zukünftig ist davon auszugehen dass sich diese Kosten noch reduzieren lassen. Aufgrund der Einzelteilfertigung lassen sich aus den Kosten des Prototypspeichers keine direkten Rückschlüsse auf die Kosten eines kombinierten Speichers aus einer Serienproduktion ziehen.

Neben der grundsätzlich erfolgreichen Entwicklung und Umsetzung des Verfahrens, die zahlreiche Erkenntnisgewinne und Fortschritte für die Forschung auf dem Gebiet der sorptiven Wärmespeicherung gebracht hat soll an dieser Stelle auch festgehalten werden, dass die Anwendung des Konzepts auf die solare Trinkwassererwärmung nicht in vollem Umfang zum angestrebten Ergebnis geführt hat. Im Laufe des Projekts haben sich durch die anwendungsbedingten Vorgaben und Beschränkungen mehr Herausforderungen aufgetan als zu Beginn angenommen, so dass der apparative Aufwand für eine solare Trinkwassererwärmung doch recht hoch wurde und sich schlussendlich die thermischen Vorteile bei dieser Anwendung, im Vergleich zu einem konventionellen System zur solaren Trinkwassererwärmung, nur in geringem Maße gezeigt haben. Zum jetzigen Zeitpunkt steht daher der Aufwand speziell für diese Anwendung noch nicht im richtigen Verhältnis zum Nutzen. Diese Tatsache ist aber ausdrücklich nicht dem Verfahren an sich geschuldet ist, da dieses wie oben beschrieben grundsätzlich funktioniert. Es soll hervorgehoben werden, dass sich ein Nutzen auch für diese Anwendung sehr schnell ergeben kann, wenn man berücksichtigt, dass die Materialforschung mit großen Schritten vorankommt und Sorptionsmaterialien mit verbesserten Eigenschaften wie höheren Speicherdichten entwickelt. Da das Verfahren nicht auf ein bestimmtes Sorptionsmaterial beschränkt ist, kann mit einem verbesserten Material bei gleichem Volumen der Sorptionseinheit eine größere Speicherkapazität erreicht werden und damit zum einen die anteilige Energieeinsparung erhöht werden sowie strahlungsfreie Perioden von mehreren Tagen überbrückt werden und die Warmwasserversorgung im Sommer ohne fossile Nachheizung sichergestellt werden.

Um den apparativen Aufwand zu vermeiden, könnte grundsätzlich in Erwägung gezogen werden, anstelle des kombinierten Speichers einen größeren Warmwasserspeicher zu verwenden, um den gleichen Nutzen zu erzielen. Da sich bei größeren Speichern aber das Oberflächen- zu Volumen-Verhältnis ungünstig auf die Wärmeverluste auswirkt, lässt sich bei Warmwasserspeichern die anteilige Energieeinsparung allein durch Vergrößerung des Speichervolumens nicht unbegrenzt erhöhen (vergleiche auch Tabelle 7 und Tabelle 8). Im Laufe des Projekts tauchte zudem die Frage auf, ob eine Vergrößerung des Volumens des Warmwasserspeichers in Verbindung mit einer besseren Dämmung, etwa einer Vakuumdämmung, bei gleichem Nutzen nicht rentabler wäre. Hierzu soll zum einen angemerkt werden, dass auch die Kosten einer Vakuumdämmung nicht zu vernachlässigen sind, insbesondere aber, dass dieses Projekt ganz klar einen Fortschritt auf dem Gebiet der sorptiven Wärmespeicherung zum Ziel hat. Die Weiterentwicklung von Dämmung hat zweifelsfrei ebenfalls eine Daseinsberechtigung und sollte in anderen Projekten untersucht werden.

Zur Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit des neuen Speicherverfahrens sind normierte Prüfbedingungen eine wichtige Basis. Die europäische Norm ENV 12977 „Kundenspezifisch gefertigte Anlagen, Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen“ [9] könnte grundsätzlich zur Prüfung des kombinierten Speichers erweitert werden. Von einer solchen Erweiterung wurde zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der oben vorgestellten Ergebnisse Abstand genommen, da

eine Markteinführung des Speichers für die solare Trinkwassererwärmung in der derzeitigen Form noch nicht zweckmäßig ist.

Obwohl die Ergebnisse aus den Jahressimulationen auf den ersten Blick nur geringe Verbesserungen im Vergleich zu Referenzspeichern erkennen lassen, schmälert dies nicht die dahinterstehende Forschungsarbeit. Das Projekt kann aus wissenschaftlicher Sicht in jedem Fall als erfolgreich bewertet werden, da es in vielen Bereichen zu einem Verständnisgewinn geführt und Erkenntnisse für die weitere Forschungsarbeit auf dem Gebiet der sorptiven Wärmespeicherung gebracht hat.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung: Als übergeordnetes Projektziel galt es die Technologie der sorptiven Wärmespeicherung weiterzuentwickeln und die Leistungsmerkmale wie hohe Energiespeicherdichte und geringe Wärmeverluste von Sorptionsspeichern auf Anwendungen mit temporär hohen Wärmeentladeleistungen zu erweitern und damit den Nachteil der für Feststoffspeicher typischen geringen Entladeleistung auszuräumen. Es wurde das Konzept einer Kombination eines Warmwasserspeichers mit einem Sorptionswärmespeicher verfolgt. Die Entwicklung eines Verfahrens zur Kombination der beiden Speichertechnologien wurde am Beispiel einer thermischen Solaranlage für die Trinkwassererwärmung vorgenommen.

Der Warmwasserspeicher kann wie bei einer herkömmlichen Solaranlage über den Kollektor beladen werden. Folgen in den Sommermonaten oder in der Übergangszeit mehrere Tage mit geringer solarer Einstrahlung, so dass der Wärmebedarf aus dem Wasserspeicher nicht mehr gedeckt werden kann, wird der Adsorptionsprozess im Sorptionsspeicher aktiviert und Wärme vom Sorptionsteil an den Warmwasserspeicher übertragen. Eine Regeneration des Sorptionsmaterials erfolgt durch Wärmeeintrag vom Solarkollektor, wenn solare Einstrahlung „im Überschuss“ vorhanden ist.

Sorptionsmaterial: Für die Konzeptentwicklung wurde, aufgrund seiner gut bekannten Eigenschaften und Stoffdaten, zunächst der Zeolith 4A als Sorptionsmaterial verwendet. Für spätere Untersuchungen wurde der derzeit am besten geeignete, kommerziell erhältliche Zeolith 13XBF eingesetzt. Grundsätzlich ist das Verfahren nicht auf ein bestimmtes Sorptionsmaterial festgelegt. Sorptionsmaterialien mit verbesserten Eigenschaften können ebenso verwendet werden. Die Leistungsfähigkeit eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers steigt mit verbessertem Material.

Anlagenkonzept: Ein geschlossenes Verfahren wurde als apparativ aufwendiger und weniger flexibel identifiziert als eine offene Prozessführung. Eine direkte Integration des Sorptionsteils in den Warmwasserspeicher hat gegenüber einer hydraulischen Trennung wesentliche Vorteile, da Wärme während und nach der Desorption vom Sorptionsspeicher an den Wasserraum abgegeben wird und somit im System verbleibt. Eine Dämmung für den Sorptionsteil entfällt und es wird eine weitere Annäherung an eine verlustfreie Wärmespeicherung erreicht. Die Integration führt zu einer kompakten und platzsparenden Einheit. Der Sorptionsteil ist als Radialstromadsorber ausgeführt. Durch die radiale Durchströmung des Festbetts mit Luft verringert sich der Strömungsweg und damit der Druckverlust.

Voruntersuchungen: Anhand von Voruntersuchungen an einem Sorptionsspeicher im Miniaturmaßstab wurde die Funktionsfähigkeit des Konzepts geprüft und das grundsätzliche Verhalten der Ad- und Desorption in einem Radialstromadsorber untersucht. Ein wichtiges Ergebnis bestand darin, dass der Wärmeeintrag bei der Desorption durch einen geringen Luftstrom konvektiv unterstützt werden muss. Ein gewendelter Desorptionswärmeübertrager wird dazu am Lufteintritt des Festbetts, d.h. auf dem kleinsten Radius im Sorptionsmaterial, angebracht und so von der Luft beim Eintritt in das Sorptionsmaterial passiert.

Aufbau Prototyp und Versuchsanlage: Basierend auf den theoretischen Überlegungen, Simulationen und Voruntersuchungen wurde das Konzept des kombinierten Speichers umgesetzt und ein Prototyp im Originalmaßstab aufgebaut. Der Warmwasserspeicher ist für den Einbau des Sorptionspeichers um eine horizontale Achse um 360° drehbar. Nach den Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten wurde die Verrohrung für den Solarkreis geschweißt, um die Dichtheit zu gewährleisten. CPC-Vakuumröhrenkollektoren mit hohem Wirkungsgrad auch bei großer Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung ermöglichen eine hohe Desorptionstemperatur. Eine elektrische Heizung im Solarkreis dient zur Vorgabe definierter Randbedingungen. Mit dem Prototypspeicher steht eine Versuchsanlage zur Verfügung, mit der die Voraussetzungen zur Durchführung von Adsorptions- und Desorptionsexperimenten in einem realen Speicher unter realitätsnahen Betriebsbedingungen geschaffen sind.

Experimentelle Untersuchungen: Die Experimente an dem Prototypspeicher demonstrieren die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Verfahrens. Anhand der Versuchsergebnisse ließen sich kritische Aspekte identifizieren, die einem effizienten Betrieb zunächst entgegenstanden. Die sichtbar gewordenen Schwachstellen wurden mithilfe von CFD-Methoden analysiert. Anhand der Simulationsergebnisse und der Erfahrungen aus dem Betrieb des ersten Prototypspeichers wurden Maßnahmen zur Verbesserung des Speichers abgeleitet. Diese Verbesserungsmaßnahmen wurden umgesetzt und die Wirksamkeit konnte im Experiment bestätigt werden. Die Rückgewinnung der Wärme aus dem austretenden Luftstrom reduziert die Wärmeverluste und bewirkt eine Vorwärmung der eintretenden Luft. Dadurch wird eine höhere Temperatur im Sorptionspeicher bei der Adsorption erreicht. Es ergibt sich ein größeres treibendes Temperaturgefälle zum Wasserraum hin und damit ein größerer Wärmestrom. Bei der Desorption wurde im Sorptionspeicher durch den neuen Desorptionswärmeübertrager eine einheitlichere Temperatur erreicht. Eine gleichmäßige Regeneration des Sorptionsmaterials ist demnach mit dem Ansatz des konvektiv unterstützten Wärmeeintrags machbar. Die Durchführung eines Leistungstests veranschaulicht das Verhalten des Speichers unter Trinkwasserlast und stellt heraus, dass die mit kleiner Leistung freiwerdende Adsorptionenthalpie für hohe Leistungsentnahmen nutzbar gemacht werden kann. Bei dem Leistungstest wurden Daten mit großer Dynamik generiert, die für einen Vergleich mit Simulationsergebnissen herangezogen wurden.

Detailuntersuchungen des Sorptionspeichers: In den experimentellen Untersuchungen wurden entscheidende Faktoren für einen effizienten Speicherbetrieb erkannt. Der Sorptionspeicher wurde im Detail mithilfe von CFD-Methoden untersucht um ein besseres Verständnis für die Vorgänge im Speicher zu erlangen und um Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten und zu überprüfen. Eine Herausforderung ist etwa die Wärmezufuhr in das Sorptionsmaterial während der Desorption. Die Simulationen haben gezeigt, dass eine gleichmäßige Temperatur auf hohem Niveau im Sorptionsmaterial, durch Anpassung der Wärmeübertragergeometrie, möglich ist. Eine Limitierung für die Wärmeübertragung vom Sorptionspeicher an den Warmwasserspeicher stellt der luftseitige Wärmeübergang zwischen Sorptionspeicher und Warmwasserspeicher dar. Dieser wurde theoretisch untersucht und es hat sich gezeigt, dass eine weitere Steigerung des Wärmestroms durch den Einsatz von Oberflächenstrukturen am Sorptionspeichermantel möglich ist.

Systemsimulation und Bewertung: Für den kombinierten Speicher wurde ein Modell entwickelt, das die physikalischen Effekte im Sorptionspeicher wiedergibt. Trotz der überlagerten physikalischen Mechanismen und der getroffenen Vereinfachungen zeigte sich eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Für die Jahressimulation wurde eine Regelstrategie erarbeitet, die sich von der Regelung konventioneller solarthermischer Anlagen unterscheidet, da Kriterien für die Zu- und Abschaltung der Ad- und Desorption für den kombinierten Speicher benötigt werden. Die Ergebnisse der Jahressimulationen haben schließlich gezeigt, dass der kombinierte Speicher in Bezug auf die thermische Leistungsfähigkeit leichte Vorteile gegenüber den Referenzspeichern bringt, dass die Ergebnisse in Bezug

auf die anteilige Energieeinsparung und die Nachheiztage aber etwas hinter den Erwartungen zurück bleiben. Mit einer Verbesserung der Materialeigenschaften geht aber ein leistungsfähigerer kombinierter Speicher einher, der dann auch für die Anwendung zur solaren Trinkwassererwärmung in weitaus höherem Maße nutzbringend wäre als dies mit dem aktuellen Forschungsstand gegeben ist.

Alternative Anwendungen: Das Verfahren wurde am Beispiel einer solaren Trinkwassererwärmung für ein Einfamilienhaus untersucht, kann aber grundsätzlich auch für andere Gebäudearten angewendet werden oder auf ganz andere Bereiche übertragen werden. Bei einer Hochskalierung für eine Anwendung in Mehrfamilienhäusern fällt der apparative Aufwand weniger ins Gewicht. Ebenfalls von Vorteil ist es, wenn sich Synergieeffekte nutzen lassen, wenn etwa ein Luft/Luft-Wärmeübertrager bereits vorhanden ist weil im Gebäude eine Wärmerückgewinnung existiert. Eine weitere Vergrößerung des Speichers führt zum Einsatz als saisonaler Wärmespeicher, um Überschusswärme vom Sommer für die Übergangszeit und den Winter zu bevorraten. Auch für industrielle Prozesse ist die Anwendung des Verfahrens vorstellbar. Generell ist es überall dort gut einsetzbar, wo kleine Energiemengen über längere Zeit annähernd verlustfrei bei niedriger Temperatur bevorratet werden sollen. In [23] wird beschrieben, wie bei der Desorption durch eine Vortrocknung der Luft die Desorptionstemperatur gesenkt werden kann. Die Vortrocknung wäre auch für das Verfahren der vorliegenden Arbeit eine Option, um die Desorptionstemperatur zu senken. Darüber hinaus könnte in den Randbereichen des Sorptionsspeichers die weniger stark oder weniger schnell erwärmt werden ein Sorptionsmaterial, welches geringere Desorptionstemperaturen benötigt, eingesetzt werden, um auch in diesen Randbereichen eine gute Ausnutzung erzielen zu können. Eine andere Anwendungsmöglichkeit stellt die thermische Speicherung von elektrischer Überschussenergie dar, die derzeit mehr und mehr an Bedeutung gewinnt.

Mit diesem Projekt und der Entwicklung des Verfahrens zur Kombination eines Sorptionsspeichers mit einem Warmwasserspeicher ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg in Richtung kompakter und effizienter Wärmespeicher getan und die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten zu radial durchströmten Sorptionsspeichern, in Kombination mit Warmwasserspeichern, gelegt.

Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „KoWaSS“ wurde mit Mitteln des Umweltministeriums Baden-Württemberg innerhalb des Förderprogramms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)“ (Förderkennzeichen BWE27008) gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Autoren danken für die Unterstützung.



Dank geht ebenfalls an Frau Bugislaus, Herrn Heintz und Herrn Noll vom Projektträger Karlsruhe für die Zusammenarbeit und an die Gutachter für die konstruktive Kritik.

Literatur

- [1] ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide. Ansys Inc., 2012.
- [2] F. BERTSCH, S. ASENBECK, B. METTE, H. KERSKES. CWS – Verbundvorhaben chemische Wärmespeicherung mittels reversibler Feststoff-Gasreaktionen – Teilvorhaben Niedertemperatur-Wärmespeicherung –, Abschlussbericht. 2012.
- [3] F. BERTSCH, H. KERSKES, H. DRÜCK. Materialuntersuchungen für chemische Langzeitwärmespeicher. 20. Symposium Thermische Solarenergie. Regensburg, OTTI, 2010. – ISBN 9783941785298
- [4] F. BERTSCH, B. METTE, S. ASENBECK, H. KERSKES, H. MÜLLER-STEINHAGEN. Low temperature chemical heat storage - an investigation of hydration reactions. Effstock, 2009, Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability, Stockholm, Energi- och Miljötekniska Föreningen / EMTF Förlag, 2009. – ISBN 9197627135
- [5] CWK - BAD KÖSTRITZ. Molecular Sieve KÖSTROLITH® 13XBFK, Molecular Sieve KÖSTROLITH® 4AK, Datenblätter.
- [6] H. DRÜCK. MULTIPORT Store-Model for TRNSYS, Stratified fluid storage tank with four internal heat exchangers, ten connections for direct charge and discharge and an internal electrical heater, Type 340, Version 1.99F, 2006. www.trnsys.de/download/en/ts_type_340_en.pdf
- [7] ENV 12977-1:2001, Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile, Kundenspezifisch gefertigte Anlagen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Beuth Verlag GmbH, 2001, Berlin
- [8] ENV 12977-2:2001, Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile, Kundenspezifisch gefertigte Anlagen, Teil 2: Prüfverfahren für solar betriebene Warmwasserbereiter und Kombinationssysteme, Beuth Verlag GmbH, 2001, Berlin
- [9] ENV 12977-3:2001, Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile, Kundenspezifisch gefertigte Anlagen, Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen, Beuth Verlag GmbH, 2001, Berlin
- [10] A. GORBACH, M. STEGMAIER, G. EIGENBERGER. Measurement and Modeling of Water Vapor Adsorption on Zeolite 4A - Equilibria and Kinetics. *Adsorption* 10 (2004) 29 – 46.
- [11] S. HENNINGER, F. JEREMIAS, H. KUMMER, P. SCHOSSIG, H.-M. HENNING. Novel sorption materials for solar heating and cooling. *Energy Procedia* 30 (2012) 279 – 288
- [12] International Standard (Veranst.): ISO 9459-5:2007(e): Solar heating – Domestic water heating systems; Part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation
- [13] Internationale Energieagentur (IEA), Task 42, Compact Thermal Energy Storage - Material Development and System Integration”, <http://www.iea-shc.org/task42/index.html>, Stand: Januar 2010.
- [14] J. JÄNCHEN, D. ACKERMANN, E. WEILER, H. STACH, W. BRÖSICKE. Microporous aluminophosphates – Materials for thermochemical storage between zeolites and silica gel. Third Workshop of IEA/ECES Annex 17, 1-2 October 2002, Tokyo, Japan
- [15] J. JÄNCHEN, H. STACH. Adsorption properties of porous materials for solar thermal energy storage and heat pump applications. *Energy Procedia* 30 (2012) 289 – 293.

- [16] H. KERSKES, K. SOMMER, H. MÜLLER-STEINHAGEN. MonoSorp – Integrales Konzept zur solarthermischen Gebäudeheizung mit Sorptionswärmespeicher. *Technischer Bericht*, BWPlus Abschlussbericht, <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BWK25006SBer.pdf> (2007).
- [17] H. KERSKES, R. WEBER, H. MÜLLER-STEINHAGEN. KoWaSS – Entwicklung eines Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen. *Technischer Bericht*, BWPlus Zwischenbericht, <http://bwplus.fzk.de/berichte/ZBer/2009/ZBerBWE27008.pdf> (2009).
- [18] H. KERSKES, R. WEBER, H. MÜLLER-STEINHAGEN. KoWaSS – Entwicklung eines Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen - Konzept, experimentelle Untersuchungen und Modellbildung -. *Technischer Bericht*, BWPlus Zwischenbericht, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/96054/BWE27008.pdf?command=downloadContent&filename=BWE27008.pdf&FIS=203> (2010).
- [19] H. KERSKES, R. WEBER, H. MÜLLER-STEINHAGEN. KoWaSS – Entwicklung eines Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen. *Technischer Bericht*, BWPlus Zwischenbericht, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/100118/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=100118&MODE=METADATA&highlight=KoWaSS> (2011)
- [20] H. KERSKES, R. WEBER. KoWaSS – Entwicklung eines Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen. *Technischer Bericht*, BWPlus Zwischenbericht, http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/104199/bwe27008_kerskes.pdf?command=downloadContent&filename=bwe27008_kerskes.pdf&FIS=203 (2012)
- [21] H. KERSKES, F. BERTSCH, B. METTE, A. WÖRNER, F. SCHAUBE. Thermochemische Energiespeicher. *Chemie Ingenieur Technik* 83 (2011), Nr. 11, S. 2014-2026. – ISSN 0009286X
- [22] B. METTE. Messung der Temperaturverläufe bei der Adsorption von Wasserdampf an verschiedenen Zeolithen. Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Interne Mitteilung, 2011.
- [23] B. METTE, H. KERSKES, H. DRÜCK, H. MÜLLER-STEINHAGEN. New highly efficient regeneration process for thermochemical energy storage. *Applied Energy*, (2013), in Veröffentlichung. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.087>
- [24] U. NOWAK. Adaptive Linienmethoden für parabolische Systeme in einer Raumdimension, TR 93-14. *Technischer Bericht*, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin, 1993.
- [25] U. NOWAK, J. FRAUHAMMER, U. NIEKEN. A Fully Adaptive Algorithm for Parabolic Differential Equations in One Space Dimension. *Computers and Chemical Engineering*, 20(5):547–561, 1996.
- [26] Paradigma, Solarwärme-, Holzpellets-, Gasbrennwert-Systeme, Planungshandbuch 2009/2010, PL-2092 V1.0 03/09
- [27] RAL UZ 124, „Blauer. Engel“ für energiesparende Warmwasserspeicher, Ausgabe Mai 2008
- [28] R. TAUSCHER. Wärmeübergang mit Turbulenzanregung bei niedrigen Reynoldszahlen Dissertation, Universität München, 2000. <http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/mw/2000/tauscher.pdf>.
- [29] R. TAUSCHER, F. MAYINGER. Enhancement of heat transfer in a plate heat exchanger by turbulence promoters. *Proceedings of the International Conference on Compact Heat Exchangers for the Process Industries*, Begell House, New York, NY (1997) 243–260.

- [30] V. VUČELIĆ, D. VUČELIĆ. The heat capacity of water near solid surfaces. *Chemical Physics Letters*, 102 (1983) 371-374.
- [31] W. WAGNER, D. JÄHNIG. Modularer Energiespeicher nach dem Sorptionsprinzip mit hoher Energiedichte (MODESTORE). *Berichte aus Energie- und Umweltforschung* 81/2006.

Anhang

A Sorptionsmaterialien

A.1 Synthetischer Zeolith vs. natürlicher Zeolith

Umfangreiche und gute Erfahrungen stehen aus dem MonoSorp-Projekt bezüglich des kommerziellen 4A-Zeolith zur Verfügung. Vergleichend wurden hier die Adsorptionseigenschaften eines natürlich vorkommenden Zeolithen untersucht. Im Gegensatz zum thermochemischen Verhalten synthetisch hergestellter Zeolithe ist das von natürlich vorkommenden Zeolithen weniger gut dokumentiert. Die prinzipielle Eignung dieser Zeolithe zur Wärmespeicherung wurde an der Versuchsanlage am ITW untersucht und mit Messungen des 4A-Zeolithen verglichen. Beide Materialien sind in Abbildung 4 dargestellt. Der natürlich vorkommende Zeolith stammt von der Partley Perlite Mining Co. und wird in Südafrika im Tagebau gewonnen. Der Zeolithgehalt ist aufgrund von Verunreinigungen im Gegensatz zum synthetisch hergestellten deutlich niedriger. Außerdem ist der kristalline Aufbau des natürlichen Zeoliths weniger gleichmäßig. Aus diesen Gründen ist die maximale Wasseraufnahme entsprechend niedriger. Laut Herstellerangaben können 14 g Wasser pro 100 g Zeolith aufgenommen werden. Für synthetisch hergestellte Zeolithe vom Typ 4A werden in der Regel ca. 21 g pro 100 g angegeben.

In den durchgeführten Adsorptions-/Desorptions-Experimenten zeigte der natürliche Zeolith ein sehr ähnliches Verhalten wie der 4A Typ. Bei diesen Experimenten wurden 190 g Zeolith in einem einfachen Rohrreaktor von feuchter Luft durchströmt. Wie beim 4A-Zeolithe ergeben sich ausgeprägte Adsorptionsfronten, die eine schnelle Adsorptionskinetik widerspiegeln. Die resultierende Temperaturerhöhung in Abhängigkeit des Feuchtegehalts der Zuluft ist ebenfalls vergleichbar. Die Wärmetönung bei einer Zulufttemperatur von 20 °C und einer relativen Feuchte von 40 % beträgt beim natürlichen Zeolith ca. 26 K, bei den 4A-Zeolithkugeln wurde bei gleichen Bedingungen eine Temperaturerhöhung von ca. 30 K gemessen. Dieses Ergebnis lässt auf eine ähnlich hohe Adsorptionseenthalpie schließen. Für die Desorption wird der Reaktor mit heißer trockener Luft durchströmt. Auch hier zeigt sich ein vergleichbares Verhalten. Der natürliche Zeolith benötigt Desorptionstemperaturen von ca. 180 °C für eine weitgehende Trocknung.

Der natürliche Zeolith nimmt bei einem vollständigen Adsorptionsvorgang ca. 22,8 g Wasser auf, was ca. 12 % Gewichtszunahme entspricht. Die Herstellerangaben von 14 % konnte nicht ganz erreicht werden. Bei synthetisch hergestellten Zeolithkugeln, wie sie in [16] untersucht wurden, ist die Wasseraufnahmekapazität mit 18–19 %Gew. deutlich größer, aber auch hier wurde der mit 21 % angegebene Herstellerwert nicht erreicht. Dies weist darauf hin, dass bei 180 °C eine weitgehende jedoch nicht vollständige Trocknung der Zeolithe gelingt. Es verbleibt jeweils eine Restbeladung von ca. 2 % Gew. Insgesamt zeigt der natürliche Zeolith als Speichermaterial für thermische Energiespeicher gute Eigenschaften. Nachteilig ist die gegenüber dem 4A-Zeolith um ca. 1/3 geringere Energiespeicherkapazität. Vorteilhaft ist dagegen der vergleichsweise geringe Preis. Mit ca. 0,4 Euro pro Kilogramm kostet er nur ca. 1/4 des 4A-Typs. Außerdem wirkt sich der entfallende, energetisch aufwändige Syntheseprozess günstig auf die Gesamtenergiebilanz bzw. energetische Amortisation des Speichers aus.



Abbildung 106: Synthetisch hergestellter Zeolith (a) und natürlich vorkommender Zeolith (b)

A.2 Kompositmaterialien

Ergänzend zu den reinen Adsorbentien werden derzeit sogenannte Kompositmaterialien untersucht. Hierbei handelt es sich beispielsweise um kugelförmige Zeolithpellets (wie in Abbildung 4 (a) dargestellt) die zusätzlich mit einer Salzlösung getränkt sind. Hierzu wurde das Vitriol des Magnesiumsalzes verwendet. Die Summenformel des hydratisierten Magnesiumsulfats lautet $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. 6 der Wassermoleküle sind direkt an das Magnesium gebunden, das siebte mit einer Wasserstoffbrückenbindung relativ fest an das Sulfat. Beim Erwärmen auf Temperaturen zwischen 40 °C und 150 °C lösen sich die 6 koordinativ an das Magnesium-Ion gebundenen Wassermoleküle ab. Zum Ablösen des siebten Wassermoleküls werden Temperaturen über 200 °C benötigt. Aus diesem Grund ist unter hier betrachteten solarthermischen Bedingungen davon auszugehen, dass das letzte Wassermolekül nicht abgespalten werden kann und die Reaktion $\text{MgSO}_4 \cdot 1\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ abläuft. Die Reaktionsenthalpie beträgt -320,43 kJ/mol. Bei der Aufnahme von 6 Mol Wasser ist damit die Energiespeicherdichte sehr viel höher als die durch die Adsorption von Wasser an Zeolithen erreichbare. Durch die Behandlung konnten ca. 12 %*Gew.* Salz in die Meso-Poren des Zeolith-Pellets eingebracht werden. Nach einer Ofentrocknung bei 180 °C wurden Adsorptionsexperimente mit feuchter gesättigter Luft durchgeführt. Zusätzlich zur Adsorption des Wasserdampfes an den Zeolith-Kristallen findet die Reaktion des Salzes mit dem Wasserdampf statt, welches exotherm zum Heptahydrat reagiert. Erste Experimente waren sehr vielversprechend. Im Vergleich zu den reinen Zeolithen wurde während der Adsorption neben geringfügig höheren Temperaturen, eine um 38 % höhere Wärmefreisetzung gemessen. Das heißt durch die Zugabe von 12 %*Gew.* Salz konnte die thermische Kapazität bei gleichem Volumen des Speichermaterials um 38 % erhöht werden.