

Abschlussbericht

**Stratisorp-Systementwicklung:
Schichtspeicher-Adsorptionswärmepumpe
für Heiz- und Kühlanwendungen in Gebäuden**

von

Chirag Joshi, Aditya Desai,
Ferdinand Schmidt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fachgebiet Strömungsmaschinen
Professur Technische Energiesysteme

Förderkennzeichen: ZO3E 11001

Laufzeit: 16.08.2011 - 31.03.2015

Die Arbeiten der Projekte der Zukunftsoffensive III werden mit Mitteln des Landes
Baden-Württemberg gefördert.

Juli 2015



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	4
2	Ablauf	5
3	Ausgangslage und Einbettung des Vorhabens	8
3.1	Stand von Wissenschaft und Technik	8
3.1.1	Stratisorp-Konzept	8
3.1.2	Schichtwärmespeicher	8
3.1.3	Adsorberentwicklung	9
3.1.4	Erweiterte Adsorptionszyklen	9
4	Experimentelle Ergebnisse	10
4.1	Vorversuche	10
4.1.1	Visualisierung mittels BOS-Methode	10
4.1.2	Aufbau des Versuchsstandes zur Fluidverteilung und BOS-Visualisierung (AP 1.3)	11
4.2	Versuche zur Durchströmung poröser Medien (AP 1.4)	17
4.2.1	Stationäre Strömungsbedingungen	17
4.2.2	Instationäre Strömungsbedingungen	18
4.3	Konzeption und Aufbau der Speichereinbauten (AP 1.5)	20
4.4	Aufbau des Stratisorp-Versuchsstandes	21
4.5	Hauptversuche zum Stratisorp-Zyklus	24
4.5.1	Emulierter Zyklus	24
4.5.2	Modultest-Messungen am Silikagelmodul	29
4.5.3	Versuche mit dem geschlossenen Tank mit Solvis-Beladelanze	30
4.5.4	Versuche mit dem geschlossenen Tank mit Schichtbeladungen	33
5	Modellierung und Simulation	42
5.1	Überblick über das Modell	42
5.2	Validierung	44
5.2.1	Einführung	44
5.2.2	Modultests	44
5.2.2.1	Gleichgewichtsmessung	45
5.2.2.2	Modultest – KIT	45
5.2.2.3	Modultest – Hersteller	46
5.2.3	Simulationen zu Stratisorp-Messungen	47
5.3	Idealisierte Fälle	50
6	Nutzen und Verwertbarkeit der Vorhabensergebnisse	52
6.1	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms	53

7 Kurzfassung der Arbeitsergebnisse	55
8 Anhang	58
Literaturverzeichnis	59

1 Motivation

Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen werden bisher überwiegend nach Verfahren betrieben, die thermodynamisch noch ein großes Verbesserungspotenzial aufweisen. Die Arbeitszahlen der Wärme- und Kälteerzeugung könnten also (je nach eingesetztem Arbeitstoffpaar und Temperaturbedingungen der Anwendung) signifikant gesteigert werden, wenn Prozessführungen mit verringerten thermodynamischen Irreversibilitäten entwickelt werden. Hier setzte das Vorhaben “Stratisorp-Systementwicklung” an. In einem Vorläufer-Projekt (“Stratisorp”, BWPlus-Vorhaben BWE 27005) konnte bereits in numerischen Simulationsstudien gezeigt werden, dass durch die Integration eines thermischen geschichteten Speichers in den Adsorptionszyklus die Entropieerzeugung infolge der Kopplung des Adsorbers an die Wärmequelle und -senke deutlich verringert werden kann und in bestimmten Fällen eine deutliche Steigerung des COP (Coefficient of Performance) gegenüber Standardzyklen möglich ist.

Der Schichtspeicher dient dabei der internen Wärmerückgewinnung im Adsorptionszyklus: Während der Adsorption freiwerdende Wärme aus dem Adsorber wird im Schichtspeicher “temperaturrichtig” gespeichert (zunächst bei hoher, im Verlauf des Adsorptionshalbzyklus dann bei immer niedrigerer Temperatur). Der für die folgende Desorption nutzbare Anteil dieser Wärme wird dem Speicher wiederum “temperaturrichtig” entnommen (zunächst bei niedriger, im Verlauf des Desorptionshalbzyklus dann bei immer höherer Temperatur). Der für die Desorption nicht nutzbare Anteil der Adsorptionswärme wird an eine Mitteltemperatur-Wärmesenke abgegeben (im Heizfall ist dies Nutzwärme, im Kühlfall Rückkühlwärme). Die für die Desorption zusätzlich benötigte Wärme im höheren Temperaturbereich wird durch eine externe Wärmequelle zur Verfügung gestellt (die ebenfalls den Schichtspeicher zur zeitlichen Pufferung ihrer bereitgestellten Wärme nutzen kann).

Im Vorläuferprojekt “Stratisorp” war ebenfalls bereits gezeigt worden, dass Adsorber auf Basis neuester Technologie (Adsorbens-Metall-Komposite), die sich aktuell noch in Entwicklung befinden, besonders stark vom Stratisorp-Zyklus profitieren können: Solche Adsorber mit extrem hohem spezifischen Wärmeübertragungsvermögen ($U \cdot A/V$) können besonders gut mit kleinen treibenden Temperaturdifferenzen (Fluid - Adsorbens) betrieben werden und trotzdem noch hohe Nutzleistungen liefern. Dementsprechend zeigen diese Adsorber mit dem Stratisorp-Zyklus die größte Effizienzsteigerung gegenüber dem Standardzyklus.

Im Nachfolgeprojekt “Stratisorp-Systementwicklung” sollte nun ein experimenteller Nachweis der Effizienzsteigerung durch den Stratisorp-Zyklus erbracht werden und zugleich untersucht werden, inwieweit aktuell marktverfügbare Adsorber ebenfalls vom Stratisorp-Zyklus profitieren können. Simulationsmodelle sollten validiert werden und für eine Analyse der Anwendungspotenziale des Zyklus in verschiedenen Fällen wie Solares Kühlen, Gaswärmepumpe oder KWKK genutzt werden.

2 Ablauf

Am Ablauf des Vorhabens mussten gegenüber der ursprünglichen Planung mehrfach deutliche Anpassungen vorgenommen werden. Der ursprünglich geplante Ablauf ist als Balkendiagramm in Abbildung 2.1 dargestellt.

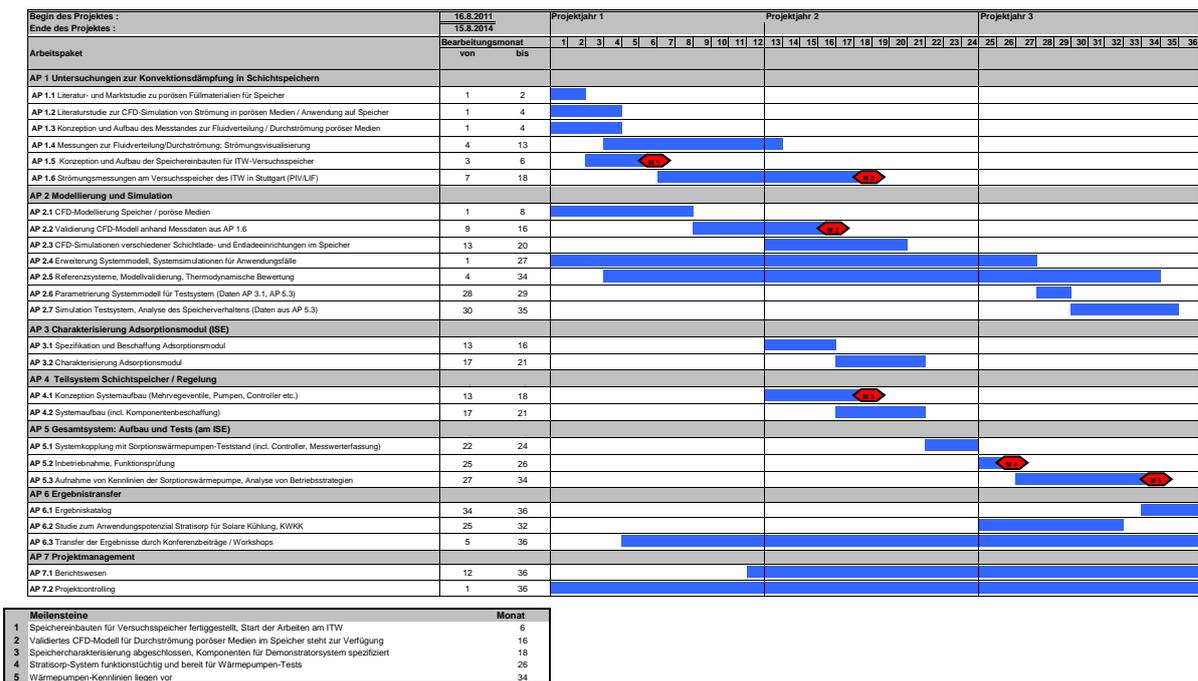


Abbildung 2.1: Balkenplan des Vorhabens gemäß ursprünglicher Projektplanung

Die erste große Änderung ergab sich unmittelbar nach Vorhabensbeginn: Ursprünglich war geplant gewesen, in AP 1.6 laseroptische Strömungsmessungen (PIV, LIF) an einem 500 L-Versuchsspeicher an der Universität Stuttgart durchzuführen. Es stellte sich heraus, dass diese Option aufgrund von Ressourcenengpässen in Stuttgart nicht mehr bestand. Dadurch entstand eine Verzögerung des Beginns der Arbeiten in AP 1.6. Schließlich wurde die Lösung gefunden, dass die Universität Stuttgart den optisch zugänglichen Versuchsspeicher und zwei Temperiermodule für Versuche am Fachgebiet Strömungsmaschinen des KIT (FSM) leihweise zur Verfügung gestellt hat, so dass die Arbeiten an AP 1.6 im Dezember 2012 (Monat 16) begonnen werden konnten.

Da sich auch die Vorversuche zur Strömungsvisualisierung und die notwendigen Arbeiten zum Erreichen einer radialsymmetrischen Einströmung in den Messstand zur Fluidverteilung (AP 1.3 und 1.4) als aufwendiger erwiesen als geplant, entstand eine Differenz zwischen Buchungs- und Bearbeitungsstand in Höhe von etwa 5 PM, die Kürzungen im Simulations-Arbeitspaket 2 und eine Neuorganisation von AP 3 notwendig machte. In AP 3 wurde statt einer externen Charakterisierung des Adsorptionsmoduls an einem Sorptionswärmepumpen-Prüfstand eine vereinfachte Charakterisierung innerhalb des Laboraufbaus am FSM vorgesehen.

Im Berichtsjahr 2013 ergaben sich deutliche Verzögerungen in der Projektbearbeitung aufgrund der in AP 1.6 auftretenden Schwierigkeiten, mit dem offenen, drucklos betriebenen Speichersystem stabile und reproduzierbare Messbedingungen bei genügend hohen Volumenströmen zu erreichen. Mit großem Zeitaufwand wurde eine Vielzahl kleiner Undichtigkeiten am Laborsystem gefunden und behoben, ohne dass die Problematik grundsätzlich gelöst werden konnte. Bis zum Frühjahr 2014 wurde versucht, den Versuchsstand zu verbessern, um einen stabilen Betrieb auch bei höheren Volumenströmen und Temperaturen zu erreichen. Es mussten jedoch immer wieder Messungen abgebrochen werden, bevor ein eingeschwungener Zyklus (sowohl für das emulierte Adsorptionsmodul als auch später für das reale) erreicht werden konnte, da die Volumenströme nach einiger Zeit einbrachen oder zu stark schwankten. Durch den hohen Personalaufwand im Labor entstand erneut eine deutliche Differenz zwischen Bearbeitungs- und Buchungsstand, so dass nun Aufbau und Betrieb des Gesamtsystems (AP 5) grundlegend ungeplant werden mussten, um die Chance zur Erreichung der wichtigsten Projektziele zu wahren. Die neue Planung sah vor, in AP 5 kein separates Demonstrationssystem mehr aufzubauen und dieses extern vermessen zu lassen, sondern den Laboraufbau am FSM weiterzuverwenden und daran den "Proof of Concept" für das Stratisorp-System zu erbringen. Ab November 2013 (Monat 27) war das im Rahmen des Vorhabens beschaffte Silikagel-Adsorptionsmodul in das Laborsystem integriert und bereit für die Charakterisierung (AP 3.2). Bei den ersten Messungen an diesem Modul stellte sich heraus, dass das für den Verdampfer / Kondensator des Sorptionsmoduls verwendete Temperiermodul zu träge war, um den Temperaturwechsel beim Umschalten des Halbzyklus schnell genug zu vollziehen (d. h. die neuen Solltemperaturen innerhalb von ca. 2 min zu erreichen). Das Laborsystem musste daher hydraulisch erweitert werden, um Verdampfer- und Kondensatorbetrieb mit zwei verschiedenen Temperiermodulen zu realisieren und eine schnelle Umschaltung zwischen den Halbzyklen zu erreichen. Diese Erweiterung wurde im Februar 2014 abgeschlossen. Nach wie vor konnten jedoch Adsorber-Volumenströme von mindestens 800 L/h nicht stabil über mehrere Zyklen gehalten werden.

Laborumrüstung auf geschlossenes System Letztlich wurden im Frühjahr 2014 die Pumpenwellen an den Temperiermodulen als entscheidende Undichtigkeiten (an denen Luft ins System gesaugt wurde) identifiziert. Offenbar bestand auf der Saugseite der Pumpen ein Unterdruck gegenüber dem Luftdruck im Labor (d.h. die Druckverluste beim Betrieb der Temperiermodule waren größer als der durch die Wassersäule des Speichers aufgebaute hydrostatische Druck), und die verwendeten Wellendichtungen waren nur nach außen abdichtend. Da diese Problematik mit den vorhandenen (ausgeliehenen) Temperiermodulen und dem optisch zugänglichen Versuchsspeicher nicht behebbar war, musste die Arbeitspla-

nung erneut geändert werden und das Laborsystem auf ein geschlossenes, druckbeaufschlagt betriebenes System umgerüstet werden.

Da hierfür ein neuer (druckfester) Speicherbehälter benötigt wurde und kein Budget aus dem Vorhaben mehr vorhanden war, konnte kein genau nach den Anforderungen dieses Vorhabens spezifizierter Speicher (mit den im Rahmen des Vorhabens entwickelten Schichtbeladungen) beschafft werden. Im Rahmen einer Kooperation konnte aber für das Vorhaben ein 750 L-Speicher zur Verfügung gestellt werden, der die wichtigsten Anforderungen für einen Stratisorp-Betrieb erfüllte (nämlich sechs Entnahmehöhen, eine Schichtbeladelanze und einen Flansch für eine vertikale Temperaturmesslanze aufwies).

Verlängerung und Aufstockung des Vorhabens Die ersten Stratisorp-Messergebnisse an diesem Versuchssystem waren recht enttäuschend (vgl. Unterabschnitt 4.5.3), und als Hauptursache hierfür wurden Vermischungseffekte im Speicher vermutet. Im Sommer 2014 wurde daher versucht, doch noch einen druckbelastbaren Tank mit den im Vorhaben entwickelten Einbauten zu bekommen. Das Vorhaben war inzwischen durch den Projektträger kostenneutral bis zum Jahresende 2014 verlängert worden. Ende Oktober konnte der gewünschte Tank ohne Mehrkosten für das Vorhaben zur Verfügung gestellt werden. Um diesen Speicher ins Laborsystem integrieren zu können und zugleich die maximal erreichbaren Volumenströme deutlich zu erhöhen, waren erneute Umbauten an der Hydraulik (u. a. Aufbau zweier neuer Ventilbänke zur Ansteuerung der Schichtladeringe) erforderlich. Dank einer erneuten Projektverlängerung und -aufstockung durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft konnten die benötigten Komponenten beschafft und im Frühjahr 2015 Messungen am System mit neuem Tank durchgeführt werden. Überraschenderweise waren die Ergebnisse für den Stratisorp-Zyklus zunächst nicht besser als mit dem alten Tank (vgl. Unterabschnitt 4.5.4). Durch Variationen an der Regelung des Zyklus konnte schließlich ein COP von 0.55 (bei sehr geringer Leistung) erreicht werden. Im Nachhinein stellte sich im Zuge einer Überprüfung des verwendeten Moduls beim Hersteller heraus, dass bei allen am FSM durchgeführten Versuchen signifikante Mengen von Inertgas im Modul vorhanden gewesen waren. Der Vergleich mit der Systemsimulation (vgl. Kapitel 5) bestätigte, dass das Modul im Regime einer sehr deutlichen Stofftransportlimitierung betrieben wurde. Somit erlauben die in diesem Vorhaben erzielten experimentellen Ergebnisse noch keine allgemeine Aussage über das Potenzial des Stratisorp-Zyklus, sondern sind als sehr spezifisch für das verwendete Adsorptionsmodul zu betrachten.

3 Ausgangslage und Einbettung des Vorhabens

3.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Hier soll kurz der Stand von Wissenschaft und Technik beschrieben werden, an den mit dem laufenden Vorhaben angeknüpft wurde, und es sollen Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen während der Laufzeit des Vorhabens aufgezeigt werden.

3.1.1 Stratisorp-Konzept

Der Stand der Forschung zum Stratisorp-Konzept im engeren Sinne war zu Vorhabensbeginn fast ausschließlich durch die eigenen Vorarbeiten aus dem Vorläuferprojekt (BWE 27005) gegeben, da es sich um einen selbst entwickelten, zum Patent angemeldeten Zyklus handelt, an dem bisher keine weiteren Arbeitsgruppen forschen.

3.1.2 Schichtwärmespeicher

Auf dem Gebiet der Schichtwärmespeicher und Schichtladekonzepte hat es in den letzten Jahren eine Reihe experimenteller und theoretischer Arbeiten gegeben. Die theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Schichtungseffizienz werden in einem Review-Artikel von Haller et al. [2009] gegenübergestellt und diskutiert.

Eine vorwiegend experimentelle Untersuchung zum Schichtungsverhalten in Solarspeichern (unter Verwendung von Schlierenverfahren) wurde von Cruickshank [2009] vorgelegt. Schichtbeladeeinrichtungen mit porösen Medien wurden von Brown and Lai [2011] betrachtet.

Viele numerische Untersuchungen von Schichtspeichern setzen CFD-Verfahren ein (z.B. Hampel [2008], Andersen et al. [2008]), die jedoch einen großen Rechenzeitbedarf verursachen und daher für Berechnungen zum Stratisorp-Zyklus problematisch sind (da hier eine instationäre Berechnung über lange Zeiten durchgeführt werden muss, bis ein eingeschwungener Adsorptionszyklus und Speicherzustand erreicht sind).

Ein vereinfachtes Modell zur Abbildung von Vermischungsvorgängen bei der Be- und Entladung von Schichtspeichern wurde in den letzten Jahren am Institut für Technische Thermodynamik der TU Chemnitz entwickelt und kürzlich in einer erweiterten Fassung von Steinert et al. [2013] vorgestellt. Das Modell bietet eine vergleichbare Genauigkeit wie CFD-Berechnungen bei deutlich geringerem Berechnungsaufwand und ist in MATLAB implementiert, insofern könnte es gut geeignet sein, die bisher für den Stratisorp-Zyklus verwendeten Speichermodelle zu verbessern.

3.1.3 Adsorberentwicklung

In den letzten Jahren hat eine sehr aktive Entwicklung auf dem Gebiet der Adsorber für Wärmepumpen und Kältemaschinen stattgefunden. Ziel ist fast immer eine deutliche Erhöhung der Leistungsdichte durch eine Intensivierung des Wärme- und Stofftransports im Adsorber. Besonderes Interesse galt dabei dem Adsorbens SAPO-34 (einem mikroporösen Silico-Aluminophosphat mit der Kristallstruktur des Chabasit). Für dieses Material stellten Bauer et al. [2009] ein Syntheseverfahren der konsumptiven Aufkristallisation auf Aluminium-Substraten vor, das von der SorTech AG, Halle, patentiert und weiterentwickelt wurde. Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zur Herstellung von Adsorbens-Träger-Kompositen mit porösen Metallschwämmen als Träger, wie in Wittstadt et al. [2015] dargestellt. Auch eine sehr schnelle, mikrowellenunterstützte Synthese von SAPO-34 auf Aluminiumschwämmen wurde bereits beschrieben [Bonaccorsi et al., 2013]. Aber auch mit klassischen Beschichtungsverfahren wie dem Tauchverfahren lassen sich mit SAPO-34 inzwischen stabile Schichten herstellen, die eine hohe Leistungsdichte ermöglichen [Frazzica et al., 2014, Freni et al., 2015].

Auch für eine ganze Reihe weiterer, teils neuer Materialien, wurden neue Syntheserouten und Beschichtungsverfahren für die Anwendung in Adsorbentien entwickelt. Einen Überblick über die neueren Entwicklungen bietet Aristov [2013].

Für die meisten dieser neu entwickelten Adsorber wäre der Stratisorp-Zyklus sehr gut geeignet, da sie sehr gute Wärme- und Stofftransporteigenschaften aufweisen, aber zugleich ein ungünstigeres Massenverhältnis von Adsorbens zu "Totmasse" des Wärmeübertragers aufweisen als klassische Adsorber, die auf Schüttungen granularer Adsorbentien beruhen.

3.1.4 Erweiterte Adsorptionszyklen

Einige neue *advanced adsorption cycles* sind in den vergangenen Jahren vorgeschlagen worden. Als alternative Prozessführungen zum Stratisorp-Zyklus sind hier v.a. Zyklen von Interesse, die eine höhere Effizienz anstreben als die Standardzyklen – es gibt auch Entwicklungen, die mehr auf die Nutzung besonders niedriger Antriebstemperaturen mittels *multiple lift* Zyklen abzielen, wie z. B. von Rahman et al. [2015] beschrieben.

Einen neuen Doppeleffekt-Zyklus stellt Marlinda et al. [2010] vor. Der Zyklus erfordert vier Adsorber in einer recht speziellen Konfiguration und wirkt daher im Vergleich zum Stratisorp-Zyklus relativ aufwendig. Einen Überblick über weitere aktuelle Entwicklungen bieten Choudhury et al. [2013] und Li et al. [2015]. Die meisten Entwicklungen basieren jedoch auf Zyklenkonzepten wie der *thermal wave*, der *mass recovery* oder der Wärmerückgewinnung zwischen zyklisch permutierenden Adsorbentien, die bereits in älteren Arbeiten diskutiert wurden (siehe z. B. den Review von Pons and Poyelle [1999]).

Insgesamt besteht bei den Bearbeitern des Vorhabens der Eindruck, dass der Stratisorp-Zyklus aufgrund seiner Einfachheit, insbesondere aufgrund der Realisierbarkeit mit nur einem Adsorber, Vorteile gegenüber komplexeren Zyklen aufweisen könnte.

4 Experimentelle Ergebnisse

Die Abbildungen in diesem Kapitel sind sämtlich (soweit nicht anders angegeben) dem aktuellen Entwurf der Dissertationsschrift von Joshi [2015] entnommen.

4.1 Vorversuche

Eine Schlüsselfrage bei Vorhabensbeginn war, ob eine vermischungsarme Ein- und Ausschichtung von Fluid in den Speicher bzw. aus dem Speicher bei den benötigten hohen spezifischen Volumenströmen (typischerweise im Bereich von ein bis zwei Umwälzungen des Speichervolumens pro Stunde) erreicht werden kann und welcher Aufwand bei den Schichtladeeinrichtungen dafür getrieben werden muss. Methodisch wurde für die Untersuchung dieser Fragestellungen eine enge Verzahnung zwischen experimentellen Arbeiten und CFD-Simulationen angestrebt.

4.1.1 Visualisierung mittels BOS-Methode

Am Fachgebiet Strömungsmaschinen war viel Erfahrung mit der Anwendung von PIV-Verfahren (particle image velocimetry) vorhanden, es erschien daher naheliegend, zur Strömungsvisualisierung eine Methode einzusetzen, bei deren Anwendung diese Erfahrung genutzt werden konnte. Das Schlierenverfahren BOS (Background Oriented Schlieren, Richard and Raffel [2001]) erschien hier besonders interessant, da für die Bildauswertung dieselben Algorithmen zum Einsatz kommen wie für die PIV-Bildauswertung.

Vorversuch mit Wasser Zu Beginn des Vorhabens lagen keine Erfahrungen zur Anwendung der BOS-Methode zur Visualisierung von Dichtegradienten in Flüssigkeiten vor. Mit Unterstützung von Kollegen aus dem Institut Saint-Louis (ISL), die das BOS-Verfahren v.a. zur Visualisierung von Dichtegradienten in Luft verwenden [Leopold, 2007], wurde ein erster Vorversuch mit Wasser in einem quaderförmigen Plexiglastank durchgeführt. Eine Prinzipskizze dieses Experiments ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Messprinzip Die Kamera nimmt ein von hinten beleuchtetes Punktmuster durch das zu untersuchende Medium hindurch auf. Es wird zunächst ein Referenzbild aufgenommen, bei dem keine Dichtegradienten im Medium vorliegen (hier: homogene Temperatur). Im Experiment werden dann lokale Dichteschwankungen im Medium erzeugt (hier: durch Einströmung von Fluid mit anderer Temperatur), und zu den gewünschten Untersuchungszeitpunkten werden Bilder aufgenommen. Orte auf dem Hintergrund-Punktmuster, für die der Lichtweg zur Kamera durch Regionen mit Dichtegradienten führt, erscheinen nun aufgrund der Ablenkung des Lichts auf dem Bild leicht verschoben. Durch einen Vergleich mit dem zuvor aufgenommenen Referenzbild können diese scheinbaren Verschiebungen (pixel-shift) ausgewertet und anstelle des Rohbildes als Intensitätsplot dargestellt werden.

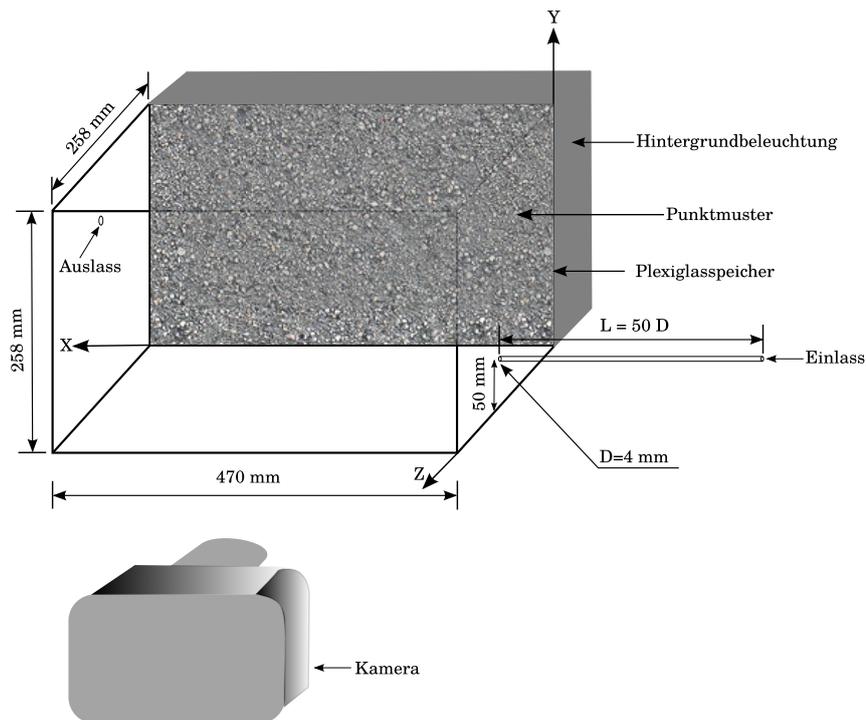


Abbildung 4.1: Schema zum Vorversuch der Visualisierung von Dichtegradienten in Tanks mittels BOS-Methode (Background Oriented Schlieren)

Diese Darstellung ermöglicht eine Visualisierung der Dichtegradienten und erlaubt häufig ein direktes Verfolgen der Strömungsvorgänge.

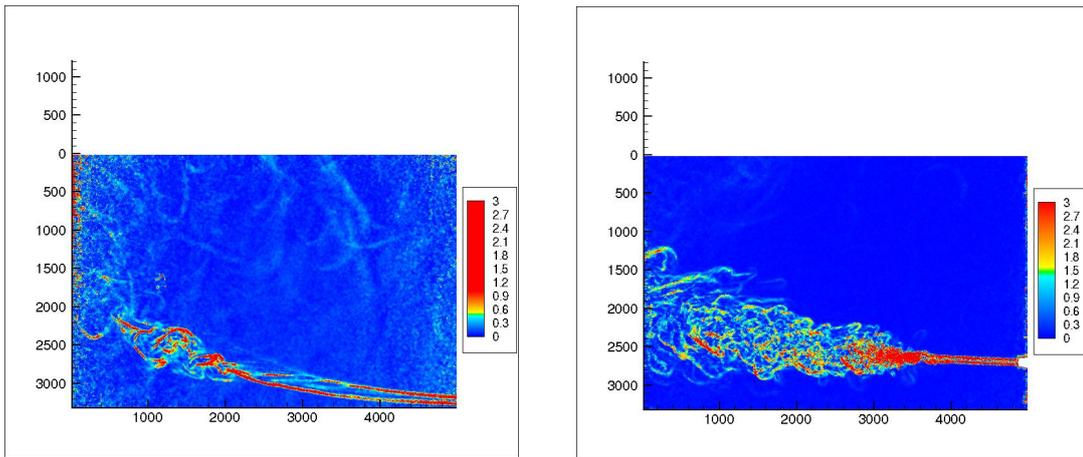
In Abbildung 4.2 sind zwei Momentaufnahmen verschiedener Einstrombedingungen dargestellt. Im linken Bild erfolgt die Einstromung in das 25°C warme Wasser im Tank bei 30°C und bei einer Reynolds-Zahl $Re = 264$ (Einstromgeschwindigkeit ca. 6.6 cm/s). Im rechten Bild erfolgt die Einstromung in das 20°C warme Wasser des Tanks bei 40°C mit $Re = 1624$ (Einstromgeschwindigkeit ca. 26.5 cm/s). Man erkennt in beiden Fällen gut den Verlauf des einströmenden Strahls, der durch die Auftriebskraft, die das einströmende wärmere Wasser im Tank erfährt, nach oben abgelenkt wird. Nach diesem vielversprechenden Test wurde entschieden, die BOS-Methode zur Visualisierung der Einstromungs- und Vermischungsvorgänge im Vorhaben zu nutzen.

4.1.2 Aufbau des Versuchstandes zur Fluidverteilung und BOS-Visualisierung (AP 1.3)

Um die Fluidverteilung an verschiedenen Beladeeinrichtungen visualisieren und weitergehend untersuchen zu können, wurde in AP 1.3 des Vorhabens ein Messstand mit einem kleinen rotationssymmetrischen Plexiglas-Tank aufgebaut (siehe Abbildung 4.3).

Auslegung Plexiglas-Speicher Die Rotationssymmetrie wurde für den Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit CFD-Ergebnissen an einem 2D-rotationssymmetrischen Modell angestrebt (der Berechnungsaufwand für ein 3D-Modell sollte vermieden werden). Der Versuchstank besteht hauptsächlich aus drei polierten Plexiglasblöcken von $300 \times 300 \times 100 \text{ mm}^3$

4 Experimentelle Ergebnisse



(a) Messung 1: $\Delta T = 5 \text{ K}$, $\dot{V} = 3 \text{ dm}^3/\text{h}$,
 $Re = 264$

(b) Messung 2: $\Delta T = 20 \text{ K}$,
 $\dot{V} = 12 \text{ dm}^3/\text{h}$, $Re = 1624$

Abbildung 4.2: BOS-Visualisierung eines in einen kalten Tank einströmenden wärmeren Jets

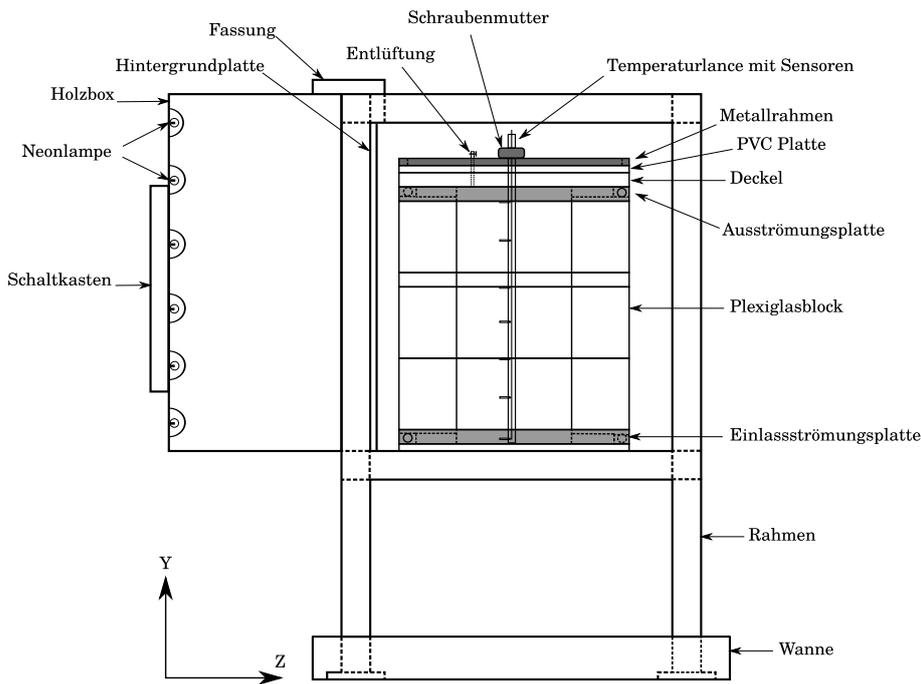


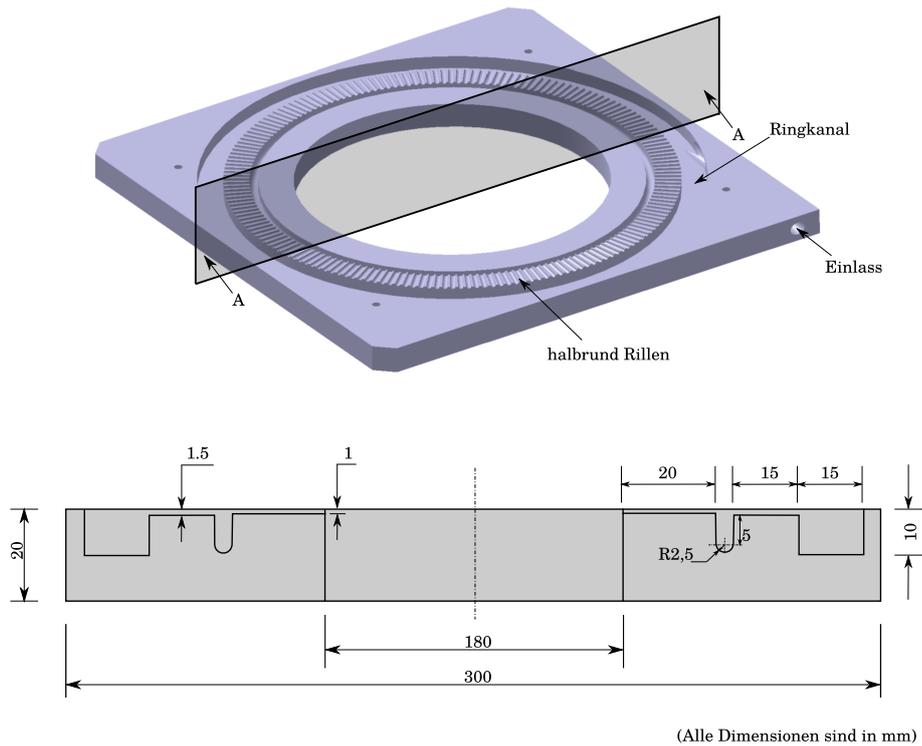
Abbildung 4.3: Schema des Messstandes zur Fluidverteilung / Durchströmung poröser Medien (mit Plexiglas-Tank)

Kantenlänge, in die eine zylindrische Bohrung von 180 mm Durchmesser eingebracht wurde. Die Quaderstruktur wurde gewählt, um plane optische Oberflächen zu haben. Durch einen Plexiglaszylinder wäre das Punktmuster für die BOS-Visualisierung stark verzerrt worden, und dadurch wäre effektiv nur ein kleinerer Teil des Speichervolumens optisch zugänglich gewesen. Eine rechnerische Kompensation der Verzerrung entweder schon bei der Generierung des Hintergrundmusters oder nachträglich bei der Datenauswertung wäre grundsätzlich auch möglich gewesen, wurde aber für dieses Vorhaben nicht weiter verfolgt. Durch zwei Endplatten und zwei zusätzliche Platten zur Fluidzufuhr oder -entnahme von jeweils 20 mm Höhe ergibt sich eine Gesamthöhe des Tanks von 380 mm. Die Platten wurden nicht verklebt, sondern mit Dichtringen aufeinander gepresst, um Variable Anordnungen der Fluidzufuhr und -entnahme untersuchen zu können. In der Mittelachse wurde der Tank mit einer vertikalen Temperaturlanze ausgestattet, die sieben Pt-1000 Temperatursensoren im Abstand von jeweils 5 cm enthält. Der Speicherdurchmesser von 18 cm wurde gewählt, da bereits im Vorgängerprojekt mit der CFD-Untersuchung eines schmalen (1.96 m hohen) 50-liter-Tanks mit diesem Durchmesser begonnen worden war, der in der Systemsimulation für ein Wärmepumpensystem mit Hochleistungsadsorber (auf Basis von Adsorbens-Metall-Verbundstrukturen) als sehr gut geeignet erschienen war. Es sollte so ein direkter Vergleich von Simulation und Messung ermöglicht werden. Die Höhe des Versuchstanks wurde gewählt, um einen vertikalen Ausschnitt des Tanks aus der Simulation experimentell betrachten zu können. Dies wurde als ausreichend erachtet, da die typischen Be- und Entladevorgänge (und somit auch die Vermischungsvorgänge) im Adsorberkreis des Stratisorp-Systems typischerweise bei geringem vertikalem Abstand zwischen Be- und Entladung auftreten. In diesem Vorhaben stand experimentell jedoch noch kein Hochleistungsadsorber zur Verfügung, sondern es musste auf bereits kommerziell verfügbare Komponenten zurückgegriffen werden, so dass die Adsorber-Leistungsdichte etwa um einen Faktor 10 geringer war. Somit mussten Adsorber- und Speichermasse etwa um denselben Faktor vergrößert werden, um vergleichbare Zyklenbedingungen zu erhalten. Eine Prozessintensivierung am Adsorber wirkt sich also im Stratisorp-Zyklus auch sehr günstig auf das benötigte Speichervolumen (und auf die zur Speicher Oberfläche proportionalen Wärmeverluste) aus. Für die Stratisorp-Experimente in diesem Vorhaben wurde also ein Speicher von etwa 0.5 m^3 Volumen benötigt, und hierfür stellte der Plexiglas-Versuchsstand aufgrund der fehlenden Skalierbarkeit der Experimente bzgl. mehrerer dimensionsloser Kennzahlen (insbesondere Reynolds-Zahl und Richardson-Zahl) kein gutes Modell mehr dar. Vom BWPlus-Gutachterkreis wurde dieser Umstand zurecht kritisch angemerkt, aufgrund des knapp kalkulierten Projektbudgets und der bereits eingetretenen zeitlichen Verzögerung wurde jedoch kein größerer Versuchstank für den Vergleich mit 2D CFD-Ergebnissen mehr aufgebaut.

Fluidverteilung Eine rotationssymmetrische Einströmung in dem kleinen Versuchstank zu erreichen, erwies sich als schwieriger als erwartet. Zunächst wurde für die Fluidverteilung die in Abbildung 4.4 gezeigte Geometrie in einen Plexiglasblock gefräst. Die Fertigungstoleranz des Plexiglasses erwies sich jedoch als problematisch, und die Einströmung durch einen einzigen tangentialen Kanal führte zu einer Druckschwankung im Ringkanal, die sich verzerrend auf die Einströmung in den Tank auswirkte.

Nach einigen weiteren Versuchen wurden schließlich gute Ergebnisse mit in eine Aluminiumplatte gefrästen strömungslenkenden Strukturen erreicht (siehe Abbildung 4.5),

4 Experimentelle Ergebnisse



Sicht in A-A

Abbildung 4.4: Querschnitt der getesteten Plexiglasplatte für die Fluidverteilung. Durch die halbkreisförmigen radial verlaufenden Rillen konnte die Umfangskomponente der Fluideinströmung weitgehend eliminiert werden, problematisch war hier die Schwankung der radialen Einströmgeschwindigkeit in Umfangsrichtung.

wobei das Herausfiltern der Umfangskomponente der Fluidbewegung durch zwei Lagen eines feinen Edelstahldrahtnetzes erfolgte und die Einströmung in die Platte nunmehr an jeder der vier Kanten (über gleich lange Zuleitungsschläuche) erfolgte, um die Druckschwankung in Umfangsrichtung zu vermindern. Diese Einströmplatte wurde am Boden des Tanks angebracht, eine identisch ausgeführte Aluminiumplatte wurde für die Ausströmung aus dem Tank unter seinem Deckel angebracht. Die Verwendung des opaken Materials Aluminium stellte hier insofern keinen Nachteil dar, als auch eine Plexiglasplatte aufgrund der vielfachen Lichtbeugung an der komplizierten geometrischen Struktur für BOS (oder PIV) nicht optisch zugänglich gewesen wäre. Lediglich für Tintenversuche wären die Beobachtungsmöglichkeiten in Plexiglas besser gewesen.

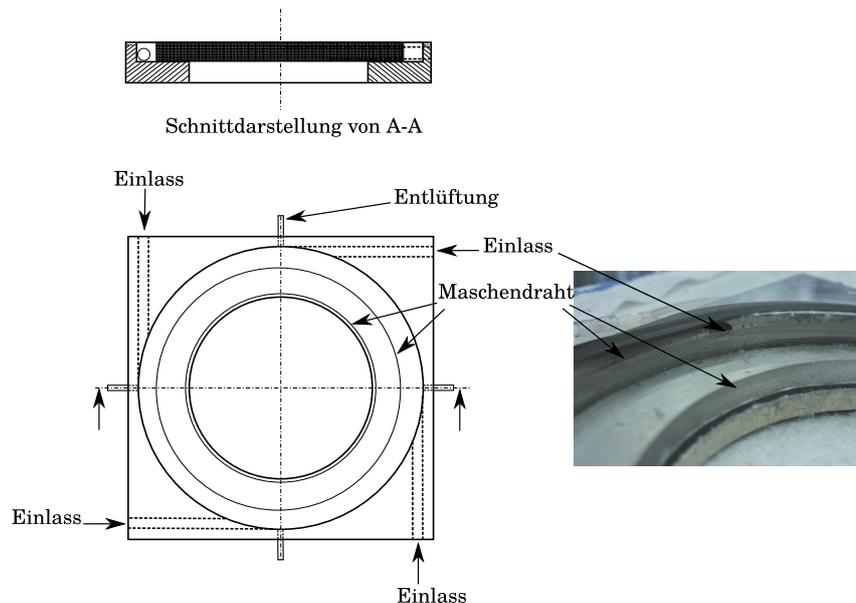


Abbildung 4.5: Aluminiumplatte zur Fluidverteilung mit vier tangentialen Einlässen und Edelstahldrahtnetzen zum Erreichen einer gleichmäßigen und radialen Einströmung

Als wichtig für eine einwandfreie Funktion der Platte erwies sich das Anbringen von Entlüftungsöffnungen (siehe Abbildung 4.6) in der Nähe der Fluideinlässe in den Ringkanal.

Tintenversuche Das Ergebnis von Tintenversuchen zur Einströmung in den Versuchstank (über die Platte am Boden des Tanks) ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die so erreichte Symmetrie der Einströmung wurde als hinreichend für Vergleiche mit CFD-Berechnungen angesehen (Berg [2013], Feuerstein [2013]).

Versuchsstand Der gesamte aufgebaute Versuchsstand ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Zur Untersuchung der Stabilität einer thermischen Schichtung kann die Einströmung in den Tank zwischen den beiden unterschiedlich temperierten Reservoiren umgeschaltet werden. Als Kamera für die BOS-Aufnahmen wurde eine Canon EOS 600D verwendet. Zur Beobachtung instationärer Vorgänge wurde diese im Videomodus betrieben, der eine Auflösung von ca. 2 Megapixel bei verlustbehafteter Kompression bietet. Es wurden Versuche mit verschiedenen Punktdichten des Hintergrundmusters durchgeführt. Durch

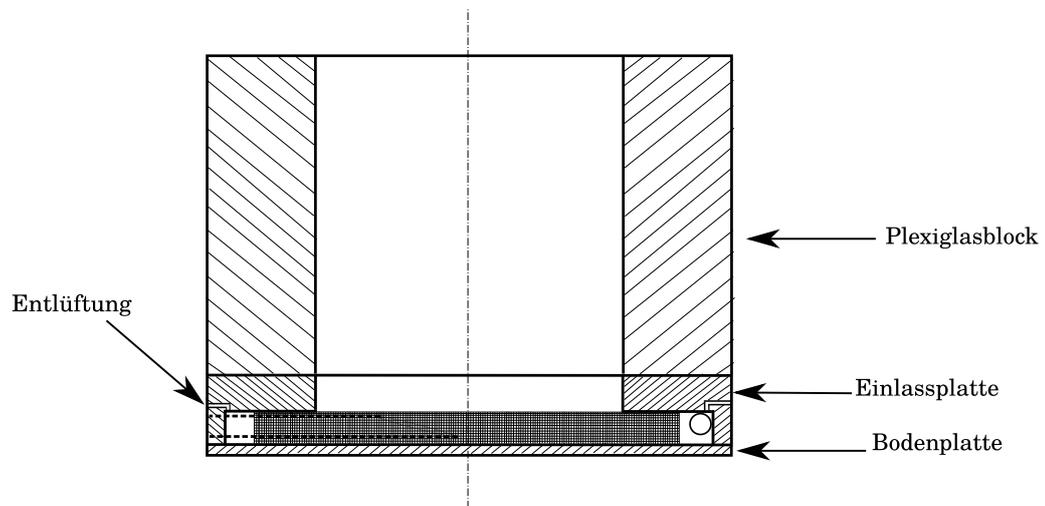


Abbildung 4.6: Verbindung der Aluminiumplatte mit dem ersten Plexiglasblock des Versuchstanks



(a) Strömungsbild 2 s nach Einströmungsbeginn

(b) Strömungsbild 4 s nach Einströmungsbeginn

(c) Strömungsbild 12 s nach Einströmungsbeginn

Abbildung 4.7: Tintenversuch zur Einströmung in Versuchstank nach Fluidverteilung über Aluminiumplatte mit Edelstahldrahtnetzen.

eine Reduzierung des Hintergrundmusters auf 100.000 Punkte (20 Kamerapixel pro Hintergrundpunkt) konnte trotz der verlustbehafteten Videokompression eine gute Auswertung mittels Kreuzkorrelation erreicht werden bei immer noch guter räumlicher Auflösung des Bildes.

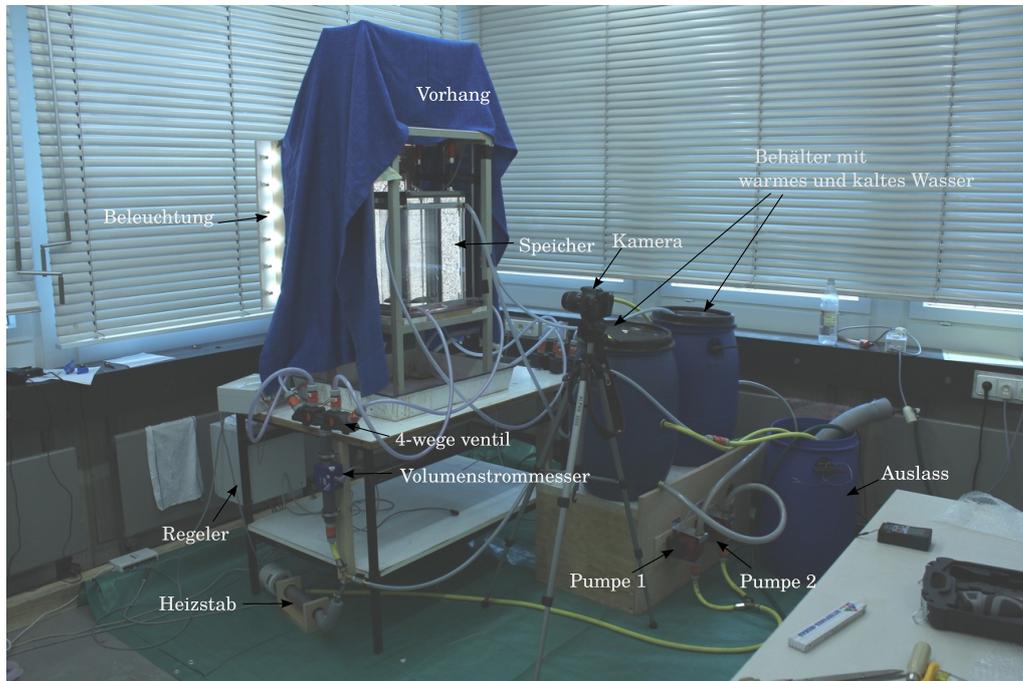


Abbildung 4.8: Aufgebauter Versuchsstand zur Visualisierung von Dichtegradienten und für Durchströmungsexperimente an porösen Strukturen im Tank

4.2 Versuche zur Durchströmung poröser Medien (AP 1.4)

4.2.1 Stationäre Strömungsbedingungen

Eine einfache Schichtbeladelanze mit poröser Außenstruktur wurde realisiert, indem ein Kunststoff/Aluminium-Verbundrohr mit 42 mm Innendurchmesser allseitig durch 5 mm-Bohrungen perforiert wurde und mit einem retikulierten Polyurethanschwamm (Zellengröße 20 ppi) in einer Stärke von ca. 25 mm umwickelt wurde. Diese Lanze wurde vertikal in der Mittelachse des Versuchsspeichers angebracht und von unten mit einer Fluidzuführung versehen. Für einen ersten Vergleich mit CFD-Berechnungen sollte eine stationäre Strömungssituation mit einem Temperaturgradienten im Tank hergestellt werden. Dazu wurde dem Tank Wasser bei drei verschiedenen Temperaturen zugeführt: von oben mit 40°C und 60 dm³/h, von unten mit 20°C und 60 dm³/h und in die Lanze bei einer dazwischenliegenden Temperatur bei größerem Volumenstrom. Ohne Einströmung in die Beladelanze sollte sich eine scharfe Temperaturgradientenschicht in Höhe der Fluidentnahme aus dem Tank einstellen, was auch so beobachtet werden konnte. Der zusätzliche Volumenstrom in die Beladelanze sollte im Idealfall ebenfalls genau in der Höhe der Fluidentnahme aus der Lanze austreten und die Temperaturschichtung im Tank kaum stören. Im realen Fall steigt das Fluid in der Lanze aufgrund des Einströmimpulses bis etwas oberhalb

der “temperaturrichtigen” Einschichthöhe auf und führt in einem gewissen Höhenbereich (oberhalb der Entnahmehöhe) zu einer Störung der Temperaturschichtung im Speicher. In Abbildung 4.9 werden in den einzelnen Zeilen die stationären Zustände für verschiedene Einströmbedingungen in die Lanze dargestellt. In der linken Spalte ist das Ergebnis einer Strömungsvisualisierung mittels in den Vorlauf der Beladelanze injizierter Tinte zu sehen. Die mittlere Spalte zeigt das Ergebnis der BOS-Visualisierung für den jeweiligen stationären Strömungszustand. Die rechte Spalte zeigt die Ergebnisse für den Temperaturverlauf im Tank aus einer CFD-Simulation (Masterarbeit von Berg [2013]) für die einzelnen Fälle, wobei die Außenschicht der Beladelanze als poröses Medium mittels der Ergun-Gleichung behandelt wurde [Wu and Yin, 2009].

Interpretation Man erkennt wie erwartet, dass sowohl höhere Volumenströme wie in Fall d) als auch geringere Temperaturdifferenzen des einströmenden Fluids gegenüber dem Fluid im Tank wie in Fall b) zu einer Ausdehnung der Vermischungszone führen. Qualitativ ist eine Ähnlichkeit zwischen den CFD-Ergebnissen und den Messergebnissen erkennbar, was z.B. die Austrittshöhe des in den Tank einströmenden Fluids aus der Lanze betrifft. Da experimentell keine Temperaturverteilung über den gesamten Tank vorliegt (sondern nur für die diskreten Sensorpositionen), wurde für dieses Beispiel kein weitergehender Vergleich vorgenommen. Eine Rekonstruktion der Dichte- bzw. Temperaturverteilung aus den BOS-Ergebnissen wäre mathematisch extrem aufwendig (schlecht gestelltes inverses Problem) und würde aus vielen verschiedenen Winkeln aufgenommene Bilddaten erfordern [Venkatakrisnan and Meier, 2004]. Für einen weitergehenden Vergleich zwischen BOS-Bilddaten und CFD-Ergebnissen wäre es jedoch möglich, die CFD-Daten bzgl. des Dichtegradienten auszuwerten und diesen darzustellen oder sogar das BOS-Experiment nachzusimulieren und somit den Effekt der Tiefe des Speichers für den Lichtweg zu berücksichtigen. Erste Schritte in diese Richtung werden in der Dissertation von Taheri [2014] vorgestellt.

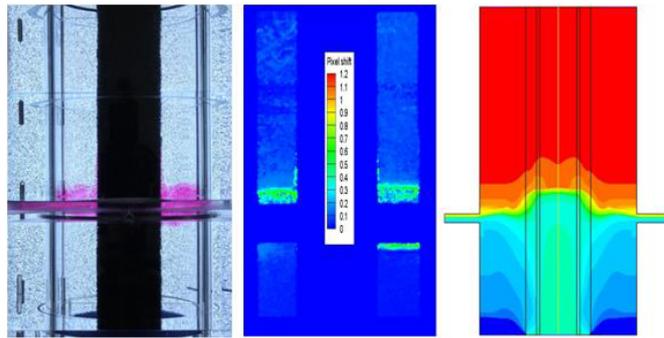
4.2.2 Instationäre Strömungsbedingungen

An dem oben beschriebenen Versuchstank wurden auch einige Versuche unter instationären Strömungsbedingungen durchgeführt. Dazu wurde der Tank ohne die Beladelanze betrieben und zu Beginn des Versuchs auf eine homogene Temperatur von 40 °C temperiert. Dann wurde durch die untere Beladeplatte kühleres Fluid (über mehrere Versuche zwischen 20 °C und 35 °C variiert) mit Volumenströmen zwischen 180 L/h und 360 L/h in den Speicher eingebracht. Bei idealer Schichtung würde man eine Pfropfenströmung mit scharfem durch den Speicher nach oben wanderndem Temperaturgradienten beobachten. Der Grad der Vermischung hängt vor allem von der Richardson-Zahl Ri ab (siehe z.B. Lohse [2009]), die definiert ist als

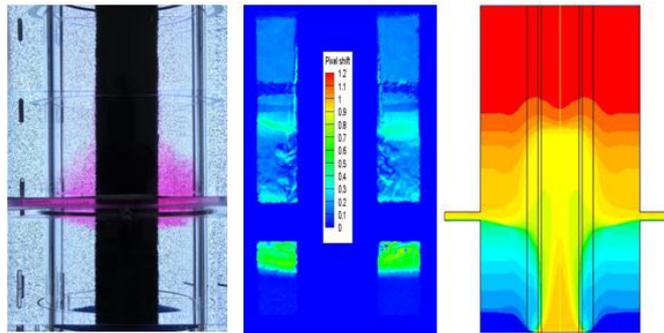
$$Ri = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l_r}{u_r^2}$$

mit Gravitationskonstante g , Temperatureausdehnungskoeffizient β , charakteristischer Temperaturdifferenz ΔT , charakteristischer (vertikaler) Länge l_r (hier: Höhe des Tanks) und charakteristischer (Einström-)Geschwindigkeit u_r . Je größer Ri ist, desto mehr dominieren die Auftriebskräfte das Strömungsgeschehen gegenüber den Impulskräften der Einströmung und desto stabiler ist die sich einstellende Schichtung. Für eine stabile Schichtung in Schichtspeicher ist also ein möglichst großes Ri anzustreben. Da die Einströmgeschwindig-

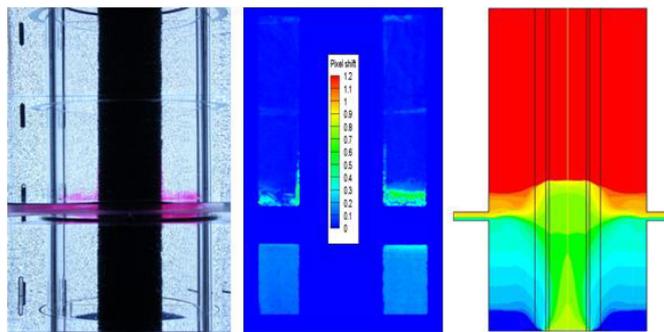
4.2 Versuche zur Durchströmung poröser Medien (AP 1.4)



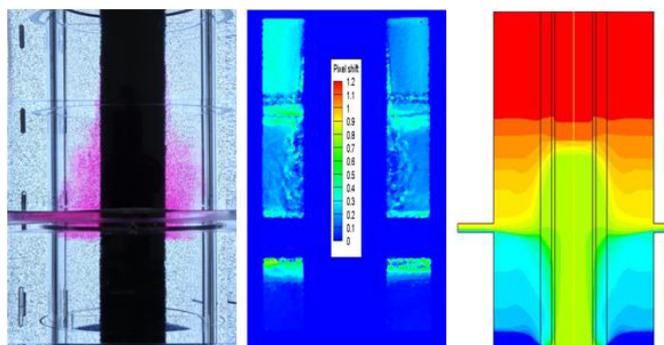
(a) $\dot{V}_{in} = 180$ lph, $T_{in} = 25$ °C



(b) $\dot{V}_{in} = 180$ lph, $T_{in} = 35$ °C



(c) $\dot{V}_{in} = 120$ lph, $T_{in} = 30$ °C



(d) $\dot{V}_{in} = 240$ lph, $T_{in} = 30$ °C

Abbildung 4.9: Effect of variations of the inlet flow temperature and flow rate on the thermal stratification

keit quadratisch eingeht, stellt eine Vergrößerung des Eintrittsquerschnitts die wichtigste Möglichkeit dar, das Schichtungsverhalten eines Speichers zu verbessern.

In den Vermischungsversuchen wurde in allen untersuchten Fällen eine stabile Schichtung mit räumlich eng begrenzter Vermischungszone festgestellt. Es ergaben sich Werte zwischen $Ri = 241$ und $Ri = 3848$. Diese Ergebnisse werden ausführlicher in der demnächst veröffentlichten Dissertationsschrift von Joshi [2015] diskutiert werden.

Insgesamt haben die Vorversuche am kleinen Versuchstank die Tauglichkeit der BOS-Methode zur Visualisierung von Schichtbeladevorgängen in Wassertanks belegt, und sie haben Validierungsdaten für 2D-rotationssymmetrische CFD-Berechnungen geliefert (siehe dazu auch Berg [2013]). Aufgrund der im weiteren Projektverlauf notwendigen Prioritätensetzung konnten die CFD-Berechnungen jedoch nicht durchgängig weitergeführt werden. Bereits im Vorläuferprojekt wurden CFD-Untersuchungen zu einer Schichtbeladelanze aus "hütchenförmigen Elementen" durchgeführt. Eine genauere Analyse dieser Ergebnisse zeigte, dass diese Art der Schichtbeladelanze starke Ansaugeffekte im Bodenbereich des Speichers aufweist, die zu einer erheblichen Vermischung führen (vgl. Zwischenbericht 2011 zu diesem Vorhaben). Aus diesem Grund wurde diese Art der Schichtbeladelanze als ungeeignet für das Vorhaben verworfen und statt dessen ein Konzept verfolgt, bei dem die Auswahl der Beladehöhe über externe Ventile erfolgt und die Beladeeinrichtungen als horizontal im Tank liegende Ringe mit großem Fluidaustrittsquerschnitt ausgeführt sind.

4.3 Konzeption und Aufbau der Speichereinbauten (AP 1.5)

Zur Auslegung dieser Beladeringe wurden wiederum Vorversuche durchgeführt (vgl. hierzu auch den Zwischenbericht 2012 zu diesem Vorhaben). Aufgrund der positiven Ergebnisse mit retikulierten Schwammstrukturen in AP 1.4 (am kleinen Versuchsspeicher) wurde auch für die Be- und Entladeringe eine Umhüllung mit einer Schwammschicht vorgesehen. Zum Test verschiedener Konfigurationen wurde eine planare Geometrie mit zwei parallelen Rohrstücken (à 20 cm Länge) in dem bereits im BOS-Vorversuch eingesetzten planparallelen Plexiglastank („Aquarium“) gewählt. Für das Innenrohr der Beladeringe wurde aufgrund der guten Biegsamkeit und Bearbeitbarkeit ein Alpex-Verbundrohr ausgewählt (Innendurchmesser 42 mm). Der Stratisorp-Systemvolumenstrom wurde auf die Rohrlänge der Testgeometrie heruntergerechnet, was zu einem Test-Volumenstrom von 600 L/h führte. Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse der Design-Variation der Beladerohre im Tintenversuch für den Fall ohne Temperaturgradienten. In der oberen Bildreihe wurde nur das Alpex-Rohr mit einer oder mehreren Reihen 5 mm großer Löcher (auf der Innenseite, dem anderen Rohr zugewandt) verwendet. In der mittleren Bildreihe war das Rohr mit einem 3 cm starken Schwammstreifen (20 ppi) umwickelt. In der unteren Bildreihe war außen zusätzlich ein feines Edelstahl Drahtnetz um den Schwamm gewickelt. In der linken Bildspalte war eine Lochreihe in die Alpex-Rohre gebohrt, in der mittleren Bildspalte waren es drei Lochreihen, und in der rechten Bildspalte waren die Alpex-Rohre rundum mit Löchern versehen worden.

Im Fall ohne poröses Medium (obere Zeile) bildete sich aus jedem Loch ein Strahl aus, was für alle betrachteten Loch-Anordnungen zu einer großräumigen Vermischung führte. Mit dem Schwamm (mittlere Zeile) bildeten sich keine einzelnen Jets mehr aus, und im Fall einer Lochreihe (Mitte links) konnte bereits eine erhebliche vertikale Aufweitung der Ausströmzone festgestellt werden. Das zusätzliche Edelstahl-Drahtnetz (untere Reihe) brachte keine wesentliche Verbesserung mehr, so dass für die Beladeringe die Varianten mit

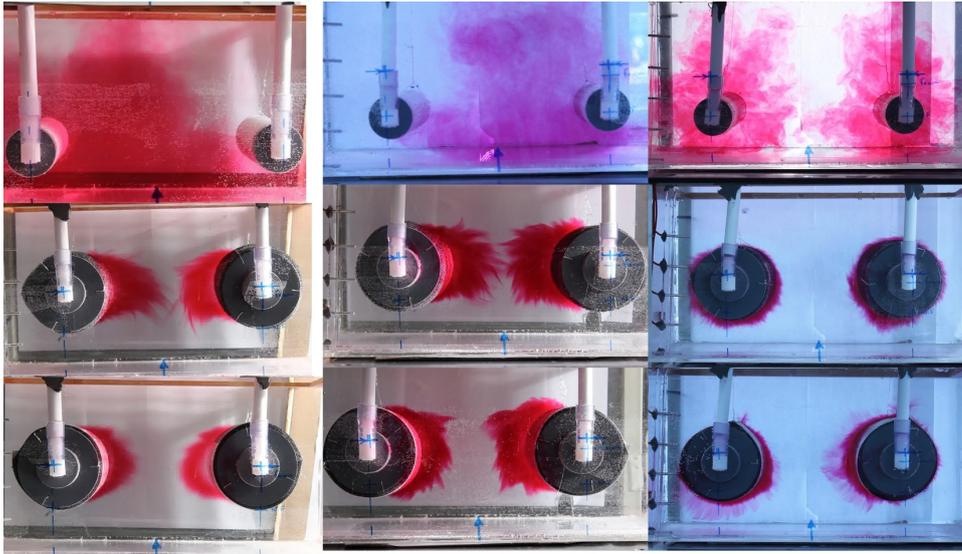


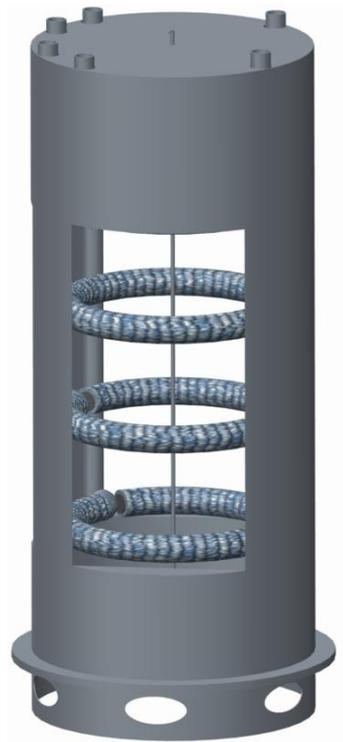
Abbildung 4.10: Vergleich verschiedener Designvarianten für die Schichtbeladeeinheiten im Tintenversuch

Schwamm und mindestens drei Lochreihen ausgewählt wurden. Die Beladeringe sollten sowohl für die Einschichtung als auch für die Fluidentnahme verwendet werden, so dass jeder der Ringe ein zum Adsorbervorlauf öffnendes Ventil und ein zum Adsorberrücklauf öffnendes benötigte. Für eine Serienentwicklung eines Geräts mit Stratisorp-Zyklus sollten diese Ventile durch zwei angepasste Mehrwegeventile ersetzt werden (je eines für Vor- und Rücklauf des Adsorbers). Hierdurch könnte die thermisch mitschwingende sensible Masse deutlich reduziert werden.

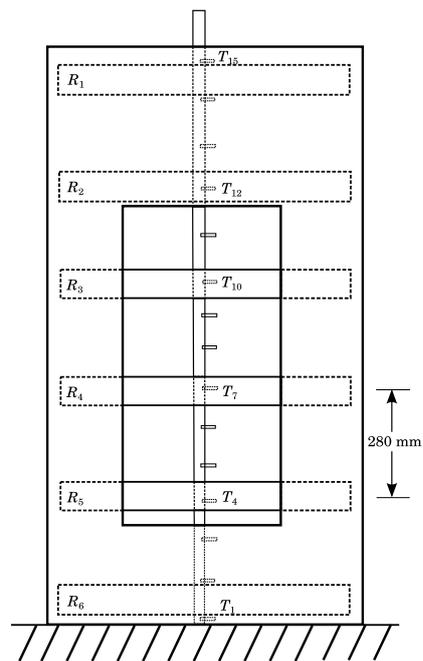
4.4 Aufbau des Stratisorp-Versuchsstandes

Offenes System Zur Untersuchung des Schichtungsverhaltens eines Speichers im Stratisorp-Zyklus wurde am FSM ein Versuchsstand mit einem vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart ausgeliehenen Edelstahl-Versuchstank aufgebaut. Dieser Tank (s. auch CAD-Skizze in Abbildung 4.11) fasst ein Volumen von ca. 500 L und ist mit drei Fenstern ausgestattet für die Durchführung von PIV- und LIF-Messungen (vgl. Hampel [2008]). In diesem Vorhaben wurde der Tank offen, d.h. ohne dicht schließenden Deckel betrieben, da Platz für die Rohrdurchführungen zu den einzelnen Beladungen benötigt wurde und die Abdichtungen der Fenster im Tank ohnehin nicht für einen Betrieb bei typischen Drücken eines geschlossenen Systems ausgelegt waren. Somit wurde der Tank nur bis ca. 5 cm unter der Oberkante mit Wasser befüllt, ein Ausgleichsgefäß für die Volumenausdehnung des Speicherwassers wurde in diesem offenen Betrieb nicht benötigt.

Temperiermodule Zum Betrieb einer Adsorptionswärmepumpe an einem Versuchsstand werden drei Temperiermodule benötigt: Eine Hochtemperatur-Wärmequelle für die Desorption (HT-Heizmodul), eine Niedertemperatur-Wärmequelle für den Verdampfer (NT-Heizmodul) und eine Mitteltemperatur-Wärmesenke für intern nicht weiter nutzbare



(a) CAD-Modell des Tanks



(b) Anordnung der Ringe und Temperatursensoren

Abbildung 4.11: Anordnung der Komponenten beim für die Strömungsvisualisierung verwendeten Tank (ITW-Versuchsspeicher)

Adsorptions- und Kondensationswärme (Kühlmodul). Die beiden Heizmodule konnten am ITW der Universität Stuttgart ausgeliehen werden, das Kühlmodul wurde im Rahmen des Vorhabens bei einer auf solche Mess- und Prüfstände spezialisierten Firma beauftragt (SWT Technologie, Stuttgart). Ein vereinfachtes Hydraulikschema des Gesamtaufbaus ist in Abbildung 4.12 dargestellt, das NT-Heizmodul wird darin als Emulator bezeichnet.

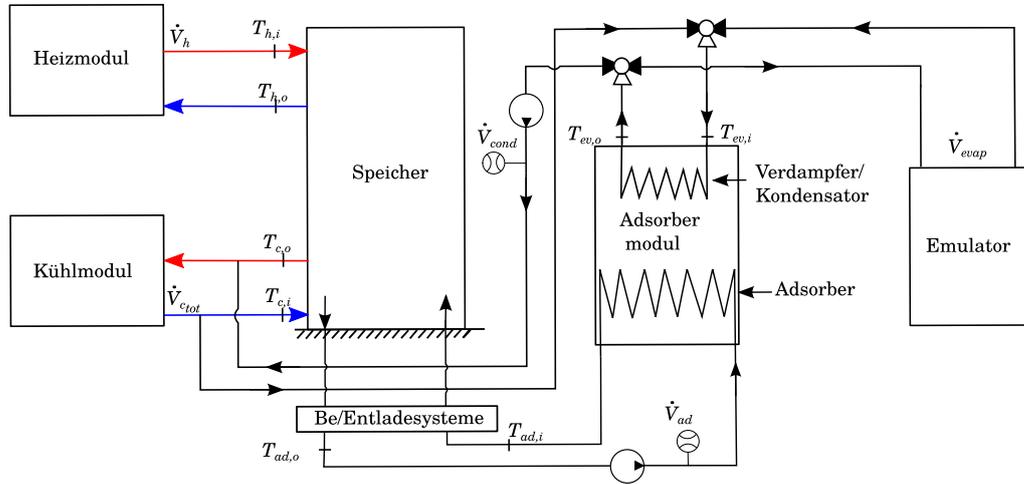


Abbildung 4.12: Schema des Laboraufbaus zur Untersuchung des Stratisorp-Zyklus

Emulator Zunächst stand noch kein Adsorptionsmodul zur Verfügung, daher wurde das NT-Heizmodul (das hardwareseitig auch über eine Kühlfunktion verfügt) als Emulator einer Adsorptionswärmepumpe betrieben. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den verschiedenen Konfigurationen des Messstandes sind im nächsten Unterkapitel dargestellt. Später wurde ein Silikagelmodul des Herstellers SorTech, das Baugleich zu den in der eCoo-Baureihe von Adsorptionskältemaschinen verwendeten Modulen ist, im Rahmen dieses Vorhabens beschafft und in den Versuchsstand integriert. Eine Besonderheit dieses Moduls ist der kombinierte Verdampfer/Kondensator-Wärmeübertrager und der Verzicht auf Dampfventile innerhalb des Moduls. Bei diesem Modultyp muss die Umschaltung dieser kombinierten Komponente zwischen Nieder- und Mitteltemperaturkreis (beim Wechsel von Adsorption zu Desorption) über externe Ventile erfolgen, wie auch in Abbildung 4.12 zu erkennen ist.

Geschlossenes System Wie in Kapitel 2 dargestellt, konnten mit diesem ursprünglichen Aufbau die gewünschten hohen Volumenströme nicht stabil erreicht werden, so dass der Messstand im Laufe des Vorhabens zu einem geschlossenen System umgerüstet werden musste. Dazu wurde auch ein geschlossener, druckfester Tank benötigt. Im Rahmen einer Industriekooperation konnte für dieses Vorhaben ein geeigneter Tank zur Verfügung gestellt werden. Es handelte sich um einen 750-Liter Tank mit sechs Entnahmehöhen und einer Schichtladelanze der Fa. Solvis (vom Typ SL96 für Volumenströme bis zu 1900 L/h in Solarthermie-Anlagen), siehe Abbildung 4.13.

Da die in dieser Systemkonfiguration erreichte Effizienz des Stratisorp-Zyklus weit hinter den Erwartungen zurückblieb, wurde ein weiterer Wechsel des Tanks vorgenommen. Es bestand die Vermutung, dass in dem ersten geschlossenen Tank starke Vermischungseffekte

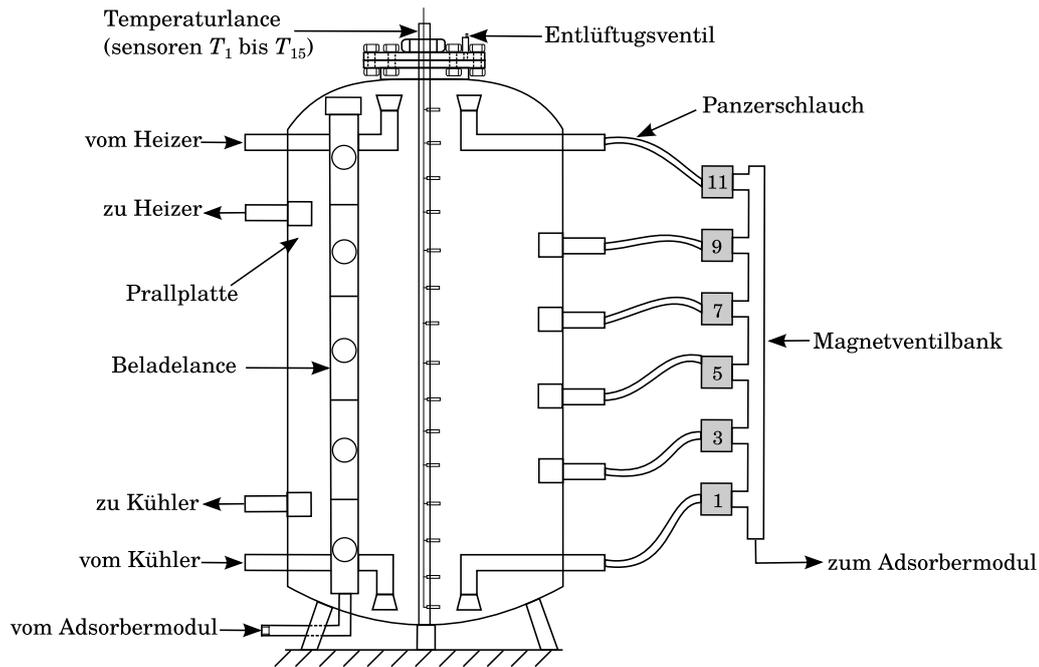


Abbildung 4.13: Skizze des Tanks mit der Solvis-Schichtladelanze und sechs Entnahmehöhen

durch die nur mit einfachen Prallplatten versehenen sechs Anschlüsse zur Fluidentnahme verursacht würden (durch Ausbildung von Einström-Jets in die Auslässe), und dass möglicherweise auch die Solvis-Lanze unter den Bedingungen des Stratisorp-Betriebs mit einem viel flacheren Temperaturgradienten als in typischen Solarthermie-Anwendungen nicht wie erwünscht funktionieren würde.

Dieser zweite geschlossene Versuchsspeicher, der ebenfalls für dieses Vorhaben kostenneutral zur Verfügung gestellt werden konnte, verfügt über einen Rundumflansch unterhalb des Deckels, so dass beliebige Änderungen an den Einbauten vorgenommen werden können. In diesen Tank wurden die im Rahmen des Vorhabens konstruierten Schichtbeladeringe integriert (Abbildung 4.14). Da für den ersten Tank nur sechs Ringe (mit großem Fertigungsaufwand) hergestellt worden waren, konnten von den acht Entnahme-Anschlüssen des neuen Tanks nur sechs mit Ringen bestückt werden, die anderen beiden wurden mit Blindflanschen verschlossen.

4.5 Hauptversuche zum Stratisorp-Zyklus

4.5.1 Emulierter Zyklus

Nach Fertigstellung des Laboraufbaus mit den drei Temperiermodulen und dem Versuchstank sollte zunächst die Funktion der Module und des Speichers getestet werden. Dazu diente ein Stratisorp-ähnlicher Zyklus, bei dem das Adsorptionsmodul durch das NT-Heizmodul emuliert wurde. Dieser Zyklus hatte den Vorteil, dass noch keine Wechselwirkung zwischen einem noch unbekanntem Adsorptionsmodul und dem noch unbekanntem Speicher auftreten konnte. Bei den ersten Tests stellte sich schnell heraus, dass nur deut-

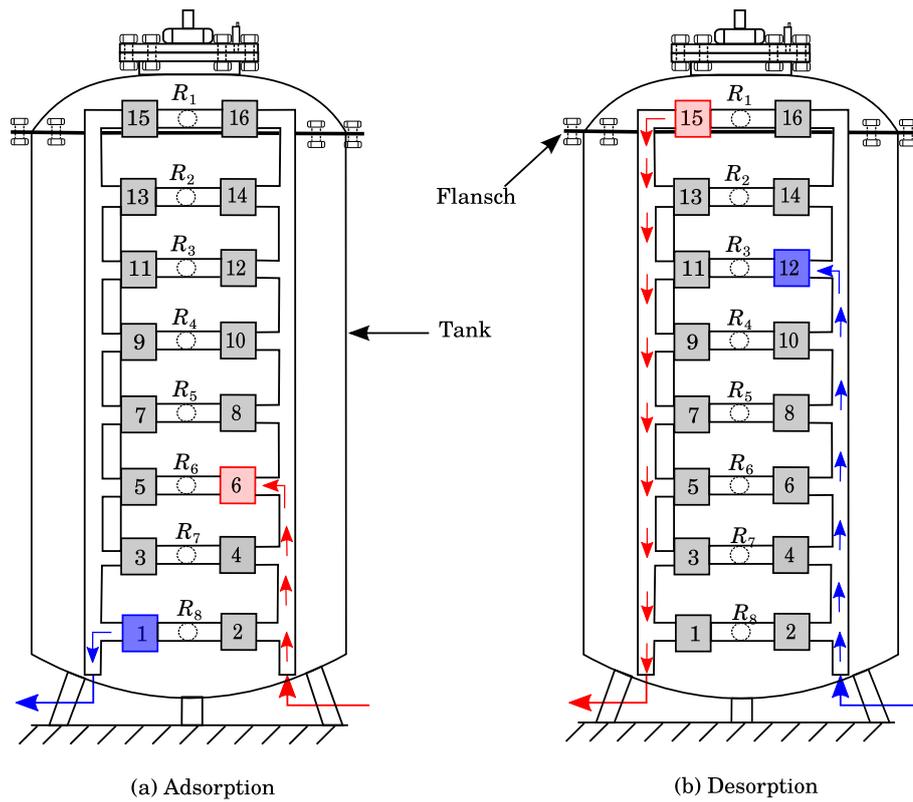


Abbildung 4.14: Skizze des Tanks mit den Schichtbeladungen und Funktionsprinzip bei Ad- und Desorption

lich geringere Volumenströme als geplant (bis etwa 300 L/h statt 1000 L/h) stabil, d.h. ohne große Schwankung der Volumenströme durchgeführt werden konnten, und dass eine Erhöhung der maximalen Speichertemperaturen zu einer Abnahme des höchsten stabil betreibbaren Volumenstroms führte.

Leckageprobleme Schnell war klar, dass sich Luft im System ansammelte und bei Erreichen bestimmter kritischer Mengen in die Pumpen gezogen wurde und so zu starken Schwankungen in den Volumenströmen führte. Es wurde in einem zeitaufwendigen Verfahren der Fehlersuche auch eine Vielzahl kleiner Leckagen an den Temperiermodulen gefunden und abgedichtet. Erst viel später im Projektverlauf stellte sich heraus, dass es die Pumpen in den beiden älteren Temperiermodulen selbst waren, an deren Achsen Außenluft ins System gesaugt wurde. Offenbar waren die Pumpendichtungen nur auf einen Überdruck des Systems ausgelegt und dichteten nur in eine Richtung zuverlässig ab. Aufgrund des offenen, drucklosen Systems sank der Druck auf der Saugseite der Pumpe auf unterhalb des Atmosphärendrucks ab. Eine erhöhte Fluidtemperatur führte wahrscheinlich wegen der Temperaturabhängigkeit des Dichtungsverhaltens zu größeren Leckagen.

Erweiterung Emulator Ein weiteres Problem betraf den Betrieb des Emulatormoduls: Der Kühlbetrieb mit diesem Modul (für die Emulation der Desorptionsphase) erfolgt über einen Plattenwärmetauscher, der an einem mit ca. 16 °C betriebenen Gebäude-Kühlnetz hängt. Plattenwärmetauscher und Heizer werden in diesem Modul seriell durchströmt. Bei der Emulation eines gesamten Sorptionszyklus trat nun zunächst der Fall auf, dass für eine ausreichende Kühlung im niedrigen Temperaturbereich der Desorption ein großer Volumenstrom aus dem Gebäudekühlnetz durch den Plattenwärmeübertrager benötigt wurde, bei diesem Volumenstrom die Kühlleistung bei höheren Temperaturen aus dem Speicher (insbesondere am Anfang der emulierten Adsorptionsphase) jedoch zu groß wurde, so dass der Heizer die Solltemperatur für den Rücklauf zum Speicher nicht erreichen konnte. Dieses Problem konnte schließlich gelöst werden durch die Integration eines motorischen Stellventils in den äußeren Kreis (Gebäudekühlnetz) des Plattenwärmeübertragers, das in die LabVIEW-Regelung des Messstandes eingebunden wurde und bei hohen Temperaturen im Emulatorkreis den äußeren Volumenstrom verminderte, um die benötigte Heizleistung zu reduzieren.

Aufgrund der beschriebenen Leckageproblematik wurden für die Emulator-Experimente die Temperaturen gegenüber dem realen Adsorptionsfall um etwa 10 K abgesenkt. Die Maximaltemperatur im Tank wurde auf 60 °C festgelegt. Das HT-Heizmodul extrahierte dabei 100 L/h am zweithöchsten Ring, heizte sie auf eine Solltemperatur von 60 °C auf und schichtete sie in den höchsten Ring wieder ein. Analog dazu extrahierte der Kühler mit 100 L/h aus dem zweituntersten Ring, kühlte dieses Fluid auf eine Solltemperatur von 20 °C ab und schichtete es am untersten Ring wieder ein. Der Emulator wurde mit einem Volumenstrom von 300 L/h betrieben, wobei immer eine feste Höhendifferenz von einem Ring zwischen Entnahme und Einschichtung lag und die Entnahmehöhe alle 15 Minuten von einem Ring zum nächst tieferen (“Adsorption”) bzw. nächst höheren (“Desorption”) geschaltet wurde. Den einzelnen Stufen waren dabei feste Solltemperaturen des Emulators zugeordnet. Weitere Details zu diesem Experiment sind im Zwischenbericht für 2013 zu diesem Vorhaben zu finden sowie (ab Veröffentlichungsdatum) in der Dissertationsschrift von Joshi [2015]. Typisch auch für alle weiteren am Stratisorp-Zyklus durchgeführten

Experimente ist hier die Superposition der Volumenströme von Heizer und Adsorber an den obersten Ringen bzw. Kühler und Adsorber an den untersten Ringen in den entsprechenden Teilschritten des Zyklus.

Zusätzliche zur Aufnahme der Temperaturen und Volumenströme wurde hier auch eine BOS-Videoaufnahme des Schichtungsverhaltens im Bereich des Fensters im ITW-Versuchstank aufgenommen. Abbildung 4.15 zeigt die Versuchsanordnung.

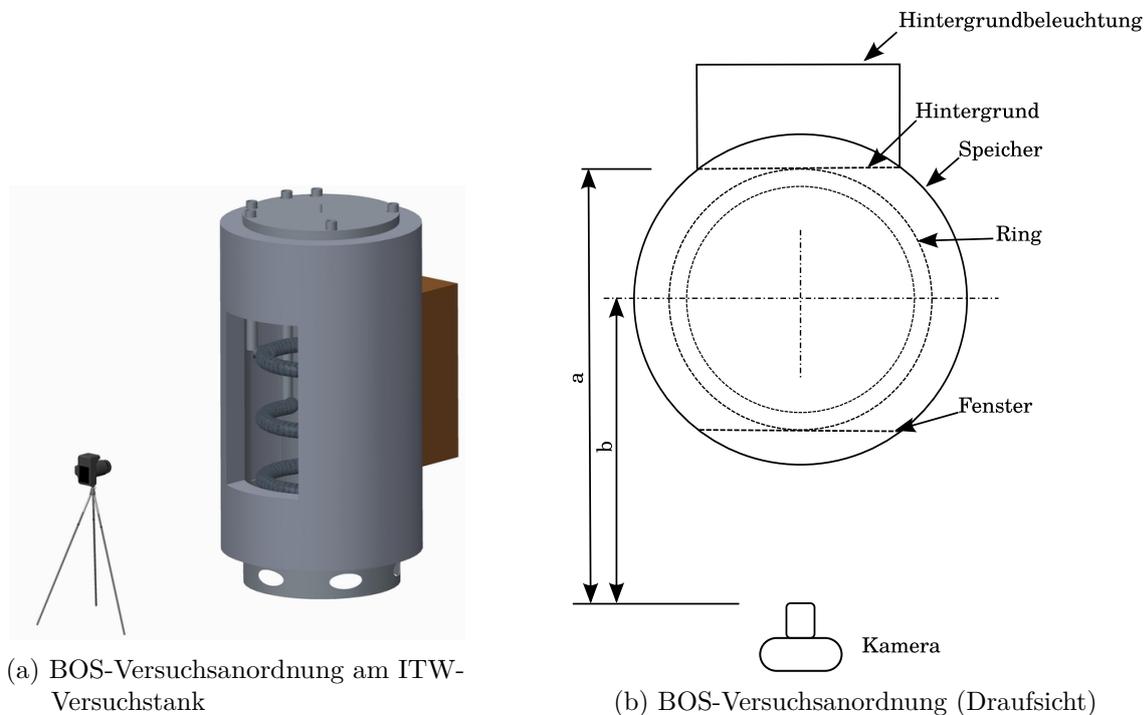


Abbildung 4.15: Konfiguration zur BOS-Visualisierung des Schichtungsverhaltens des ITW-Versuchstanks mit Beladungen im Stratisorp-Zyklus

In Abbildung 4.16 sind Momentaufnahmen des Experiments aus der BOS-Visualisierung zu sehen. Man erkennt gut, dass eine relativ scharfe Temperaturgradientenzone durch den Speichertank wandert.

Fluidschleier In den Standbildern nur schwach zu erkennen, aber im BOS-Video deutlich zu sehen ist, dass das vom Emulator zurück in den Speicher strömende Fluid sich nicht in der Höhe seines Einschichtrings über den gesamten Speicherquerschnitt verteilt, sondern unterhalb dieses Rings einen dünnen "Fluidschleier" (vgl. Abbildung 4.17) bildet und sich erst in Höhe der passenden Speichertemperatur über den gesamten Speicherquerschnitt verteilt. Dieser Effekt kann als gewünscht betrachtet werden, da er die thermische Vermischung im Speicher reduziert. Dennoch findet auch im "Fluidschleier" eine Vermischung statt, und es kann hier bereits festgestellt werden, dass ein besonders vermischungsarmer Betrieb des Speichers in Stratisorp-Zyklen dann realisierbar ist, wenn die Temperaturspreizung des Fluids im Adsorberkreis zu den Temperaturabständen der Ringe im Tank passt. Ein weiteres Experiment mit dem Emulator wurde bei einem Volumenstrom im "Adsorberkreis" von 680 L/h durchgeführt. Der Volumenstrom konnte nicht über eine genügend lange Zeit gehalten werden, um einen eingeschwungenen Zyklus zu erreichen. Die durch dieses

4 Experimentelle Ergebnisse

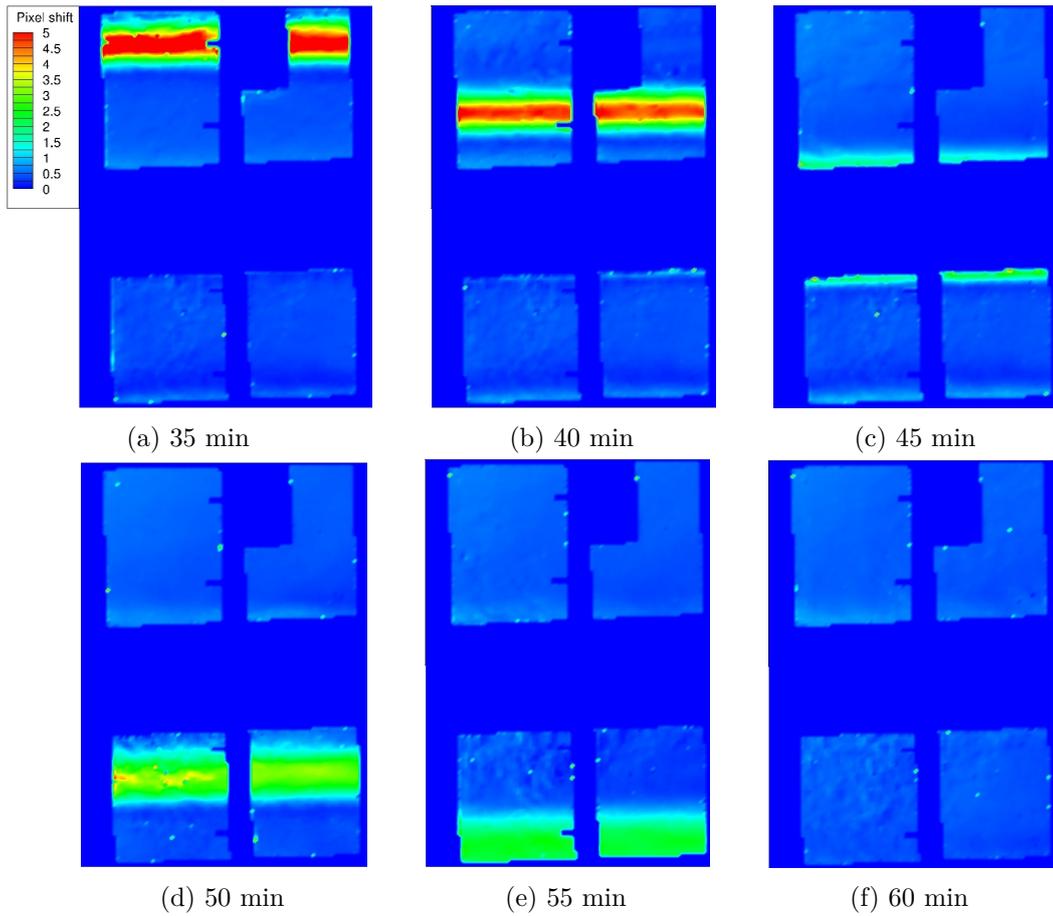


Abbildung 4.16: Abwärtsbewegung der Temperaturgradientenzone durch den Tank im Bereich des Fensters während des (emulierten) Adsorptions-Halbzyklus.

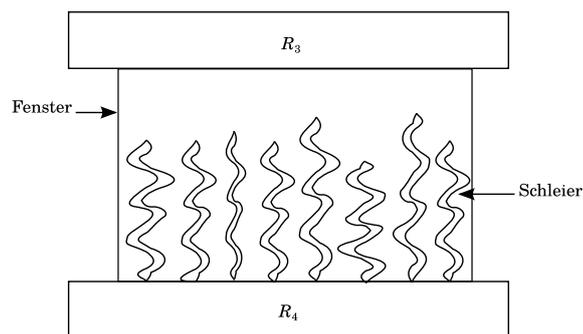


Abbildung 4.17: Schemazeichnung der Fluidschleier im Tank (hier: vom Einströmrings nach oben gerichtet im Fall der Desorption)

Experiment zu beantwortende Frage war, ob auch bei diesem Volumenstrom sich noch die zuvor beobachteten Fluidschleier ausbilden würden, oder ob sich das Fluid nun aufgrund des größeren Einstromimpulses direkt in Höhe der Ringe über den gesamten Querschnitt verteilen würde.

Modifizierte BOS-Auswertung Es stellte sich heraus, dass es auch in diesem Fall noch zur Ausbildung der Fluidschleier kam. Um diese sichtbar zu machen, wurde hier die “Progressive BOS”-Auswertung eingesetzt, bei der kein festes (vor Beginn des Experiments aufgenommenes) Referenzbild zur Berechnung der Punktverschiebung verwendet wird, sondern das Referenzbild im Film mit fester Zeitdifferenz “mitläuft”. Auf diese Weise können Regionen mit kurzzeitigen Veränderungen des Strömungsbildes sichtbar gemacht werden. Einige Momentaufnahmen aus dem “Desorptions”-Halbzyklus, in denen dieser Fluidschleier gut zu erkennen ist, sind in Abbildung 4.18 zu sehen.

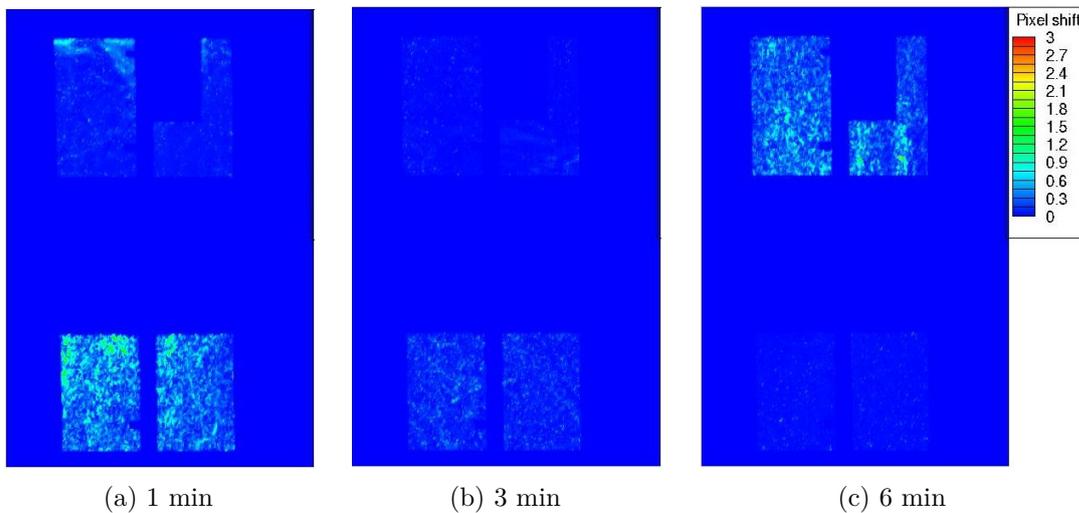


Abbildung 4.18: Beobachtetes Schichtungsverhalten mit Fluidschleiern während eines (emulierten) Desorptions-Halbzyklus mit Volumenstrom 680 L/h

Fazit Eine detailliertere Beschreibung und Auswertung dieses Experiments wird in der Dissertationsschrift von Joshi [2015] zu finden sein. An dieser Stelle soll aus dem Experiment nur das Fazit gezogen werden, dass bei einem Adsorbervolumenstrom bis 680 L/h der thermisch geschichtete Betrieb mittels der hierfür konstruierten Schichtladeringe sehr gut zu funktionieren scheint und augenscheinlich keine großräumigen Vermischungen auftreten, die die Schichtung stark beeinträchtigen würden.

4.5.2 Modultest-Messungen am Silikagelmodul

Nach der Integration des Silikagel-Adsorptionsmoduls in den Versuchsstand wurden zunächst Referenzmessungen ohne Wärmerückgewinnung durchgeführt, um Vergleichsgrößen für den Stratisorp-Zyklus zu haben. Das Modul wird dazu nach einer festen Halbzykluszeit (hier: 24 Minuten) durch Umschalten der Vorlauftemperaturen im Adsorber- und Verdampferkreis umgeschaltet, wobei ohne Zwischenschritte zwischen den Extremwerten

umgeschaltet wird. Da zu Beginn der Halbzyklen die treibenden Temperaturdifferenzen sehr groß werden und somit eine hohe Leistung umgesetzt wird, die das Leistungsvermögen der Heiz- und Kühlmodule überschritten hätte, wurde der Speicher hier als Puffer eingesetzt (die unterste Speicherzone als Puffer für die Adsorption und die oberste als Puffer für die Desorption). Durch eine Skalierung der in einer ähnlichen Messung beim Hersteller verwendeten Volumenströme ergab sich ein maximaler Adsorber-Volumenstrom von 1050 L/h, siehe dazu auch Joshi [2015]. Aus dieser Modultestmessung ergab sich ein Kühl-COP von 0.36 bei einer mittleren Kälteleistung von 1.36 kW. Die Vergleichsmessung beim Hersteller hatte (bei deutlich höheren Volumenströmen, aber gleichem insgesamt umgewälztem Fluidvolumen pro Halbzyklus) einen Kühl-COP von 0.41 ergeben.

Inertgasproblematik Diese Differenz in der Moduleffizienz wurde zunächst unter der Hypothese einer ausgeprägten Volumenstromabhängigkeit der Wärmeübertragerkennwerte $U \cdot A$ von Adsorber und Verdampfer/Kondensator betrachtet. Erst nach Abschluss der Messungen für dieses Vorhaben stellte sich heraus, dass bei der am FSM durchgeführten Messung höchstwahrscheinlich Fremdgase im Adsorber vorlagen im Bereich von 2 mbar bis 5 mbar. Das Silikagelmodul wurde nach Abschluss der Messungen für dieses Vorhaben an den Hersteller zurückgeschickt, und dort wurde eine erneute Modultestmessung bei den auch am FSM verwendeten Volumenströmen durchgeführt. Dabei wurde wieder ein COP von 0.41 gemessen, wodurch die Hypothese vom volumenstromabhängigen $U \cdot A$ als Haupteinflussfaktor falsifiziert war. Das Sorptionsmodul war während der gesamten Messungen am FSM und beim Hersteller mit einem kostengünstigen Drucksensor ausgestattet gewesen, dessen Messwert-Aufzeichnungen vorlagen. Die bereits zuvor beobachtete systematische Abweichung zwischen dem gemessenen Druck und dem aus der Verdampfer-/Kondensatortemperatur berechneten Sättigungsdampfdruck war bis dahin als Offset des Drucksensors interpretiert worden, was auch vom Modulhersteller für diesen Sensor für plausibel gehalten wurde. Die Anwesenheit von signifikanten Mengen Inertgases im Modul wurde auch deshalb während der Vorhabenslaufzeit nicht ernsthaft in Erwägung gezogen, weil das Modul zwischenzeitlich mehrfach nachevakuiert wurde, darunter mindestens einmal auch in Anwesenheit von Mitarbeitern des Herstellers. Im Nachhinein stellte sich heraus, dass die für die Evakuierung des Moduls verwendete einstufige Drehschieber-Vakuumpumpe nicht ordnungsgemäß gewartet worden war und am Ende des Vorhabens einen zu großen Wasseranteil im Pumpenöl aufwies, wodurch das Saugvermögen im Druckbereich von wenigen mbar stark beeinträchtigt war. Evtl. hätte das Problem durch einen längeren Pumpenleerlauf mit Gasballast vermieden werden können.

Somit sind auch alle nachfolgend beschriebenen im Verlauf des Vorhabens durchgeführten Messungen durch den Inertgas-Effekt beeinflusst. Eine genauere Auswertung und Quantifizierung der Inertgas-Partialdrücke wird in der Dissertationsschrift von Joshi [2015] zu finden sein.

4.5.3 Versuche mit dem geschlossenen Tank mit Solvis-Beladelanze

Aufgrund des Problems der Luftansaugung an den Pumpenwellen der Temperiermodule musste das Laborsystem zu einem geschlossenen, druckbeaufschlagten System umgerüstet werden. Der hierfür zunächst zur Verfügung stehende Speichertank ist bereits in Abbildung 4.13 gezeigt worden. Dieser Tank weist nur einen kleinen Flansch für die vertikale Temperaturmesslanze im Bereich des Deckels auf, so dass keine größeren Änderungen

an den Speichereinbauten vorgenommen werden konnten. Die im Speicher eingebaute Solvis-Schichtbeladelanze weist fünf horizontale Fluidauslässe mit 96 mm Durchmesser auf, die bei der Ausströmung teilweise noch von einer Rückschlagklappe verdeckt werden. Die Beladeringe weisen somit einen mindestens um einen Faktor 10 größeren Austrittsquerschnitt auf als die einzelnen Öffnungen der Solvis-Lanze. Die Richardson-Zahl Ri kann somit für die Beladeringe als mindestens um einen Faktor 100 größer angenommen werden.

Limitierung Rückkühler Mit diesem Tank wurde ein Stratisorp-Experiment unter den gleichen Temperaturbedingungen wie zuvor (Vorlauftemperaturen zum Sorptionsmodul: 72 °C Desorption, 27 °C Rückkühler und 18 °C Verdampfer) durchgeführt bei an die neuen Möglichkeiten angepassten erhöhten Volumenströmen: Diese betragen 860 L/h im Adsorberkreis während der Adsorptionsphase (795 L/h in Desorptionsphase), 2000 L/h im Verdampferkreis und 860 L/h als Gesamt-Rückkühlvolumenstrom, der während der Adsorptionsphase vollständig durch den unteren Speicherbereich geleitet wurde und während der Desorptionsphase überwiegend (mit ca. 800 L/h) durch den Kondensator geleitet wurde. Gegenüber dem zuvor untersuchten offenen System wurde also eine deutliche Steigerung der Volumenströme (insbesondere am Verdampfer) erreicht, der Rückkühl-Volumenstrom war jedoch immer noch sehr gering aufgrund von Einschränkungen der Laborinfrastruktur.

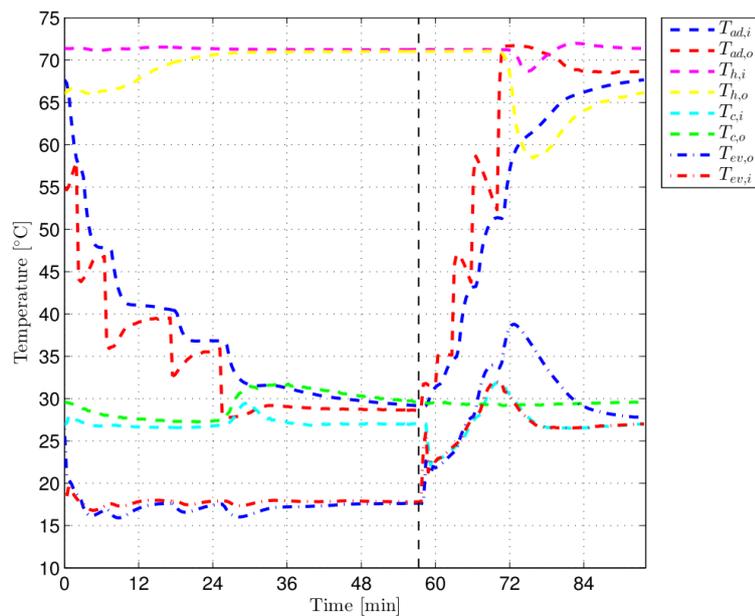


Abbildung 4.19: Temperaturverlauf am Adsorber und am Verdampfer/Kondensator für einen Stratisorp-Zyklus mit dem Silikagelmodul und dem 1. geschlossenen Tank (mit Solvis-Beladelanze) für das Temperaturtripel 72 °C, 27 °C und 18 °C

Modulauslegung und Wärmerückgewinnung Die Temperaturverläufe im Adsorber- und Verdampfer-/Kondensatorkreis sind in Abbildung 4.19 gezeigt, die zugehörigen Leistungs-

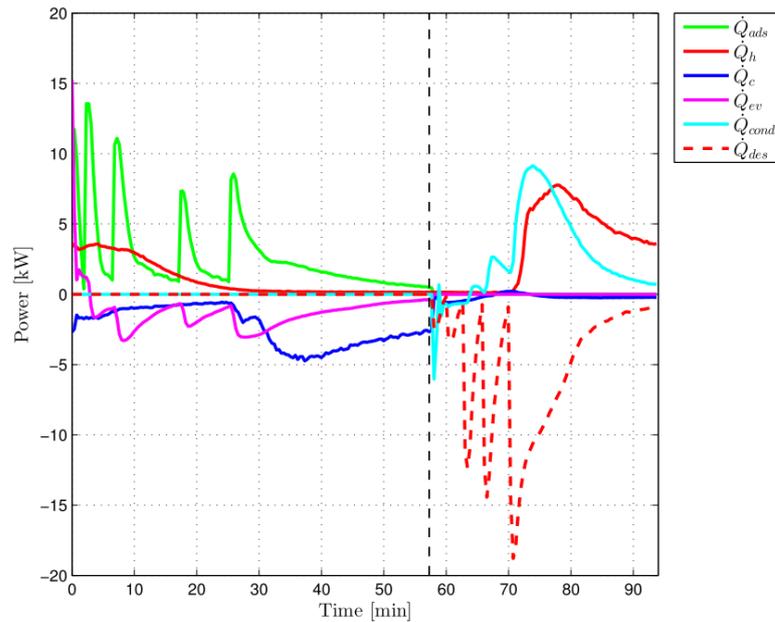
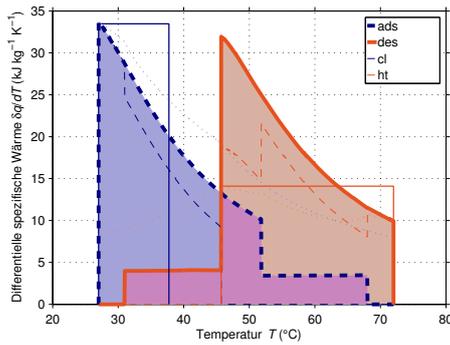


Abbildung 4.20: Leistungsverlauf am Adsorber und am Verdampfer/Kondensator für einen Stratisorp-Zyklus mit dem Silikagelmodul und dem 1. geschlossenen Tank (mit Solvis-Beladelanze) für das Temperaturtripler 72 °C, 27 °C und 18 °C

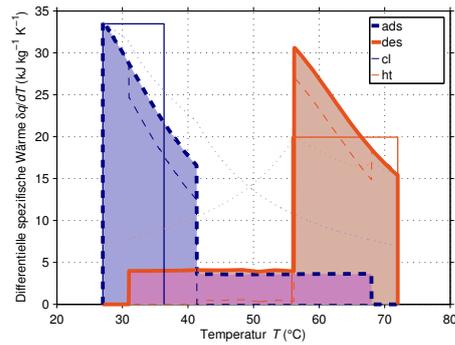
verläufe in Abbildung 4.20. Der erreichte COP war 0.43 bei einer Kälteleistung von 0.75 kW. An der Rücklauftemperatur des Kondensators in Abbildung 4.19 fällt auf, dass sie auf bis zu 39 °C ansteigt (Minute 72). Bei einem Wärmeübertragungsvermögen $U \cdot A \approx 2 \text{ kW/K}$ am Verdampfer/Kondensator bedeutet die zu diesem Zeitpunkt auftretende Spitzenleistung von ca. 9 kW am Kondensator eine Innentemperatur (Sättigungstemperatur des Dampfes) über 40 °C. Dadurch verringert sich die rückgewinnbare Wärme, wie aus den in Abbildung 4.21 dargestellten differentiellen Wärmekurven der Adsorption und Desorption für den Silikagel-Adsorber zu sehen ist.

Im Fall einer Kondensator-Innentemperatur von 30 °C ist noch ein Temperaturüberlapp der Wärmekurven vorhanden und somit eine sorptive Wärmerückgewinnung möglich. Bei 40 °C Kondensatortemperatur besteht bereits kein Temperaturüberlapp der sorptiven Wärme mehr. Für einen Stratisorp-Zyklus mit diesem Modul ist daher zu erwarten, dass ein höherer Kondensator-Volumenstrom zu einer deutlichen Steigerung des COP führen könnte. Dass der für diese Vorhaben gesteckte Zielwert von 0.75 für den COP in dieser Konfiguration bei weitem noch nicht erreicht werden konnte, ist also nicht überraschend. Dennoch bleibt das Ergebnis von 0.43 auch deutlich hinter dem zurück, was bis zum dem Zeitpunkt aus den Systemsimulationen für dieselben Betriebsbedingungen zu erwarten gewesen wäre.

Hypothese Vermischungseffekte Als Ursache für die schwache Performance wurden zu diesem Zeitpunkt vor allem die vermuteten Vermischungseffekte im Tank angesehen (z.B. durch Prallstrahlen infolge der einfachen Ausführung der Heizer- und Kühleranschlüsse).



(a) Zyklentemperaturen 72 °C (Des., extern), 27 °C (Ads., extern), 30 °C (Kond., intern) 16 °C (Verd., intern)



(b) Zyklentemperaturen 72 °C (Des., extern), 27 °C (Ads., extern), 40 °C (Kond., intern) 16 °C (Verd., intern)

Abbildung 4.21: Differenzielle Wärmekurven für Silikagel 127B / Wasser bei 30 °C und 40 °C als Sättigungstemperatur im Kondensator, jeweils für eine treibende Temperaturdifferenz am Adsorber von 2 K.

Aufgrund dieser Hypothese wurde alles daran gesetzt, noch einen verbesserten Tank im Rahmen des Vorhabens untersuchen zu können. Durch eine Laufzeitverlängerung und Aufstockung des Vorhabens seitens des Projektträgers wurde es ermöglicht, im Zeitraum Januar-März 2015 noch den bereits in Abbildung 4.14 dargestellten Tank in das System zu integrieren und einige Stratisorp-Zyklen zu vermessen.

4.5.4 Versuche mit dem geschlossenen Tank mit Schichtbeladungen

Wie bereits in Abschnitt 4.4 beschrieben, wurden die selbst hergestellten Schichtladeringe in den neuen Drucktank mit Rundumflansch integriert. Zur Integration ins System wurde eine zusätzliche Ventilbank benötigt, um auch den Adsorberrücklauf auf einen beliebigen ausgewählten Beladung schicken zu können. Die LabVIEW-Systemregelung wurde so angepasst, dass immer der benachbarte Ring oberhalb der Entnahmehöhe (für Adsorption) bzw. unterhalb der Entnahmehöhe (für Desorption) für die Einschichtung angesteuert wird.

Die Anordnung der Beladungen im geschlossenen Tank der 2. Generation ist in Abbildung 4.22 gezeigt. Mit diesem Tank wurde dasselbe Stratisorp-Experiment durchgeführt wie mit dem zuvor am verwendeten Tank. Der resultierende Temperaturverlauf im Adsorber- und Verdampfer-/Kondensator-Kreis ist in Abbildung 4.23 gezeigt, die zugehörigen Leistungsverläufe in Abbildung 4.24. Der ermittelte COP war 0.415 bei einer mittleren Kälteleistung über den Zyklus von 0.72 kW.

Interpretation Ergebnis Das Ergebnis zeigt, dass der Wechsel des Tanks zunächst sogar eine leichte Verschlechterung in COP und Leistung brachte. Die durch die Beladungen stark verringerten Einströmgeschwindigkeiten brachten also nicht die erhoffte Verbesserung durch eine verringerte Vermischung im Tank. Deutlich negativ wirkte sich angesichts der geringen Leistung des Laborsystems die Erhöhung der thermisch mitschwingenden sensiblen Masse durch die zweite Ventilbank (um ca. 12 kg) aus. Bzgl. der Vermischung im Tank zeigt eine nähere Betrachtung, dass die Auslegung des Adsorber-Wärmeübertragers

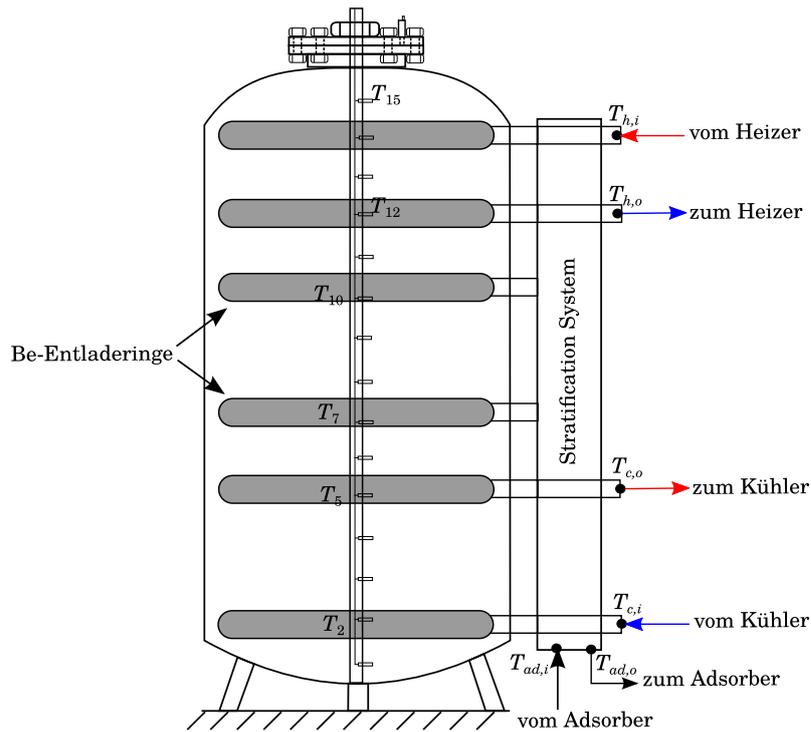


Abbildung 4.22: Sensorpositionen im geschlossenen Tank mit Beladungen

im Silikagelmodul für den Stratisorp-Betrieb mit der Art der Einschichtung durch die Beladung ungünstig ist: Bei nahezu linearer Temperaturschichtung im Speicher liegt die typische Temperaturdifferenz zwischen benachbarten Ringen im Bereich von 7 K bis 10 K. Eine Temperaturspreizung im Adsorberkreis in derselben Größenordnung würde also eine besonders vermischungsarme Einschichtung ermöglichen. Für das verfügbare Silikagelmodul lag diese Temperaturspreizung am Adsorber jedoch über große Teile des Zyklus im Bereich um 3 K. Dies bedeutet, dass das eingeschichtete Fluid zunächst in eine thermisch unpassende Schicht gelangt und von dort bestenfalls in Form eines “Fluidschleiers” in die passende Temperaturschicht gelangt. Dabei treten unweigerlich Vermischungseffekte auf, die nur schwer quantifizierbar sind. Bzgl. des Anwendungspotenzials des Stratisorp-Zyklus relevant ist hier, dass besser geeignete Adsorber nicht unbedingt auf grundsätzlich verbesserter Adsorbertechnologie basieren müssten, sondern auch bereits im Stand der Technik deutliche Verbesserungen durch eine angepasste fluidseitige Auslegung des Adsorbers möglich wären. Auch eine serielle Verschaltung zweier gleichartiger Sorptionsmodule könnte bereits eine deutliche Verbesserung bringen, konnte jedoch im Rahmen des Vorhabens nicht mehr getestet werden.

Regelstrategien In den letzten Wochen der Vorhabenslaufzeit wurde untersucht, ob sich COP und/oder Leistung durch eine veränderte Regelstrategie erhöhen lassen. Die Umschaltung zwischen den Entnahmehöhen für den Adsorberkreis erfolgt temperaturgeregelt: Sobald die Temperaturspreizung im Adsorberkreis einen Schwellenwert T_{diff} unterschreitet, wird die Fluidentnahme auf den nächsten Ring weitergeschaltet (während Adsorption abwärts, während Desorption aufwärts). Eine Möglichkeit zur Verbesserung der

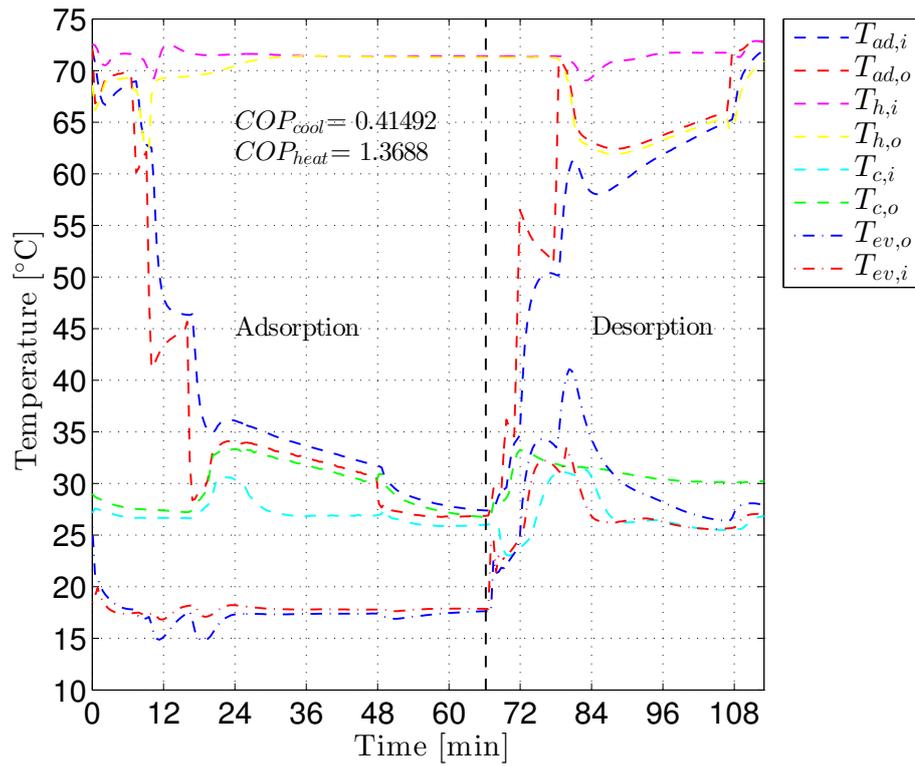


Abbildung 4.23: Temperaturverlauf am Adsorber und am Verdampfer/Kondensator für einen Stratisorp-Zyklus mit dem Silikagelmodul und dem 2. geschlossenen Tank (mit Beladungen) für das Temperaturtripel 72 °C, 27 °C und 18 °C

4 Experimentelle Ergebnisse

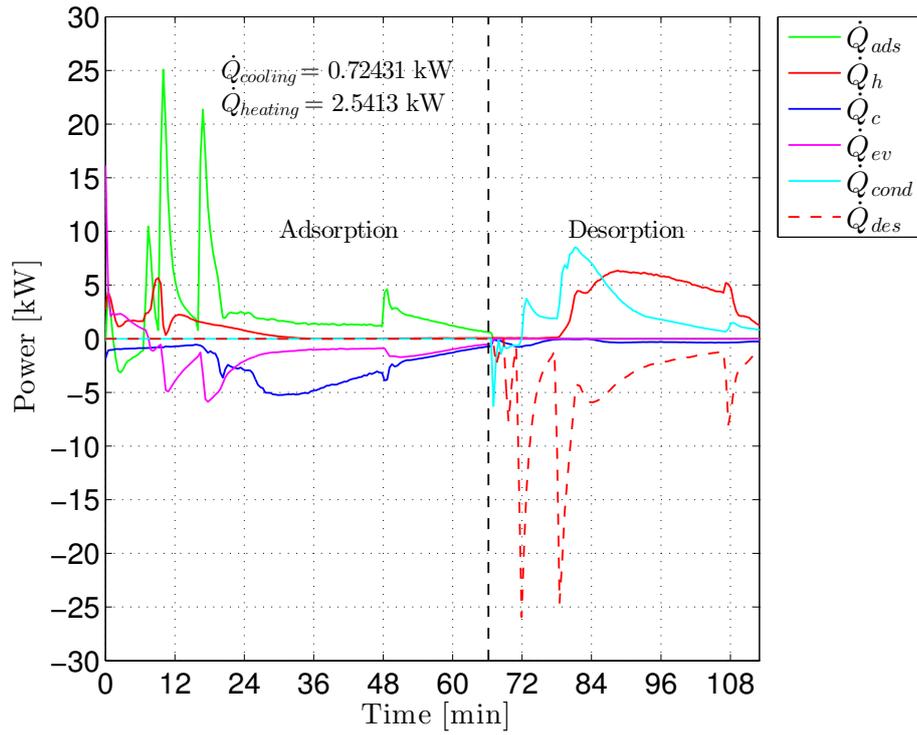


Abbildung 4.24: Leistungsverlauf für die verschiedenen Fluidkreise (Adsorber, Verdampfer/Kondensator, Tankheizer, Tankkühler) für den Zyklus aus Abbildung 4.23

Regelung des Zyklus besteht daher in der Anpassung der einzelnen T_{diff} für verschiedene Umschaltvorgänge und in der Anpassung der Volumenströme im Adsorber-, Heizer- und Kühlerkreis für verschiedene Phasen des Zyklus.

Zunächst wurde im Adsorberkreis die Auswirkung einer Anpassung der T_{diff} getestet. In den zuvor untersuchten Zyklen war T_{diff} auf 1 K eingestellt gewesen für alle Umschaltvorgänge bis auf den Wechsel des Halbzyklus von Adsorption zu Desorption, für den T_{diff} auf 0.5 K gesetzt war. Die Grundidee einer Verbesserung der Regelung war nun, T_{diff} in dem für die Wärmerückgewinnung wichtigsten Temperaturbereichs (der für diesen Zyklus zwischen 45 °C und 55 °C liegt) zu verringern, um hier die Leistung zu verringern und durch die Wechselwirkung mit Kondensator und Verdampfer hier den Überlapp der Wärmekurven zu vergrößern. Zugleich kann außerhalb dieses Temperaturbereichs T_{diff} erhöht werden, um die Leistung zu erhöhen und die Zykluszeit zu verkürzen. Hier wurde in Adsorption und Desorption zwischen dem 3. und 4. Ring von oben $T_{diff}=0.75$ K gewählt und sonst standardmäßig $T_{diff}=3$ K mit Ausnahmen im letzten Adsorptionsschritt mit $T_{diff}=1$ K (um den Beladungsumsatz des Zyklus zu erhöhen) und im letzten Desorptionsschritt mit $T_{diff}=2$ K.

Der Leistungsverlauf dieses Zyklus wird in Abbildung 4.25 gezeigt. Der COP ergibt sich zu 0.51 bei einer Kälteleistung von 0.99 kW. Die Zykluszeit verkürzt sich von 112 min auf 72 min. Am Leistungsverlauf des Kondensators fällt auf, dass die Spitzenleistung abgenommen hat und der Leistungsverlauf insgesamt geglättet wurde. Durch die Änderung der Umschaltkriterien wurde also der COP um 22% verbessert und zugleich die Kälteleistung um 37% erhöht.

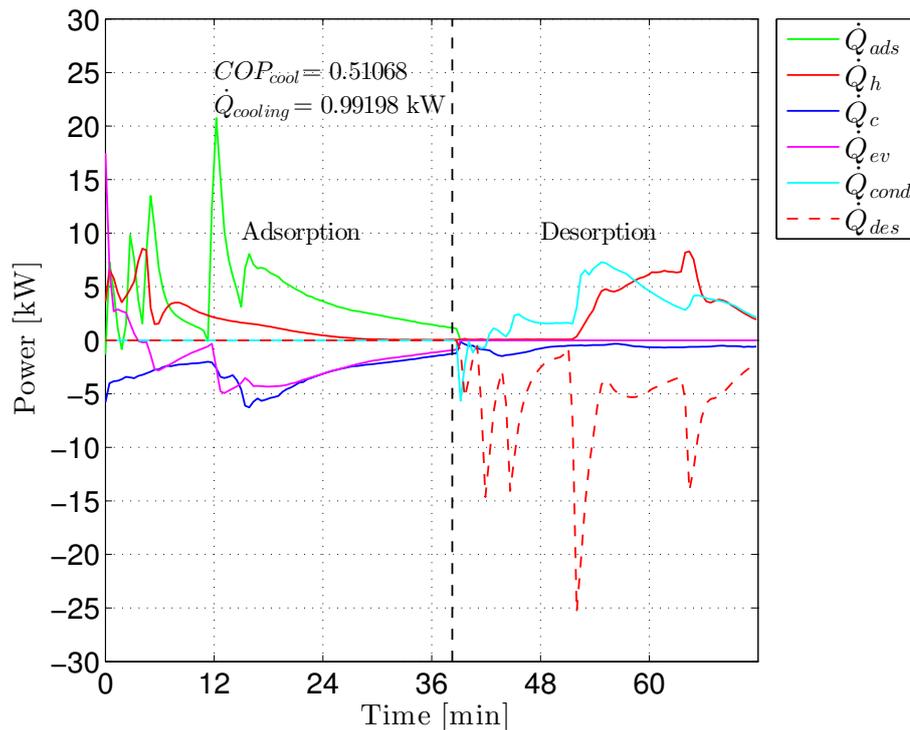


Abbildung 4.25: Gemessene Leistungsverläufe während eines Stratisorp-Zyklus mit modifizierten Umschaltbedingungen (s. Text)

Ausblick In Kombination mit einer gezielten Regelung der Volumenströme im Verlauf des Zyklus sind hier weitere Verbesserungen zu erwarten. Beispielsweise könnte kurz vor jedem Umschaltvorgang der Volumenstrom gedrosselt werden, um die Wärmeübertragercharakteristik ($NTU = \frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p}$) des Adsorbers zu verbessern und die Entropieerzeugung bei den Temperatursprüngen des Fluids zu vermindern. Dadurch würden zugleich die Leistungspeaks am Verdampfer und Kondensator geglättet und so das Wärmerückgewinnungspotenzial erhöht. Ein solcher Regelungsansatz hätte größere Änderungen an der LabVIEW-Regelung des Versuchsstandes erfordert und war daher im Rahmen des Vorhabens nicht mehr realisierbar.

Intermittierender Heizer- und Kühlerbetrieb Zuletzt wurde noch die Auswirkung eines intermittierenden Betriebs von Heizer und Kühler auf den Zyklus untersucht. Die Idee war hier, die Entropieerzeugung durch Mischungsvorgänge im Speicher zu vermindern, indem Heizer und Kühler nicht kontinuierlich Fluid aus dem Speicher umwälzen, sondern nur dann laufen, wenn der Adsorber nicht weiter aus dem Speicher beheizt (Desorption) oder gekühlt (Adsorption) werden kann, und dann direkt mit dem Adsorber verbunden werden, so dass der Speicher vom Betrieb des Heizers und Kühlers möglichst weitgehend entkoppelt ist. Um dies in der bestehenden hydraulischen Verschaltung zu realisieren, wurden Heizer-, Kühler- und Adsorbervolumenstrom gleich groß gewählt (bei 800 L/h). Der Heizer wurde erst im letzten Schritt der Desorption bei Unterschreitung einer Temperaturspreizung im Adsorberkreis von 2 K eingeschaltet, der Kühler nur im letzten Schritt der Adsorption bei Unterschreitung einer Temperaturspreizung von 3 K. Da Heizer- und Kühlerkreis außerhalb des Speichers an der Ventilbank hydraulisch angekoppelt sind, überlagern sich bei aktivem Heizer oder Kühler die Volumenströme mit dem Adsorber in den letzten Schritten beider Halbzyklen so, dass der Volumenstrom durch den Speicher verschwindet.

Der Leistungsverlauf dieses Zyklus (im eingeschwungenen Zustand) ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Es wird ein COP von 0.55 bei einer mittleren Kälteleistung von 0.67 kW erreicht. Man erkennt deutlich, dass Heizer und Kühler nur etwa in der zweiten Hälfte des jeweiligen Halbzyklus aktiv sind (mit zum Adsorber spiegelbildlichen Leistungsverlauf). Die Adsorptions- und Desorptionspeaks sind gegenüber den zuvor untersuchten Zyklen deutlich reduziert.

Aufschlussreich ist auch der Verlauf der Speichertemperaturen über alle aufgenommenen Zyklen (Abbildung 4.27). Da der Speicher nun nicht mehr durch Heizer und Kühler direkt konditioniert wird, sondern nur noch als Puffer für den Adsorber genutzt wird, schwingt er sich auf eine deutlich kleinere Temperaturspreizung ein als im bisher untersuchten Standardzyklus. Am Ende des letzten gemessenen (19.) Zyklus liegen die Fluidtemperaturen im Speicher zwischen 28 °C und 62 °C bei nahezu linearer Schichtung. Die Verringerung der Gesamtspreizung im Speicher bedeutet auch, dass die Temperaturdifferenzen benachbarter Ringe sich verringern und der diskrete Schichtladeansatz über die Ringe unter diesen Bedingungen auch etwas besser zur Temperaturspreizung am Adsorber passt.

Ausblick Regelung Auch diese Modifikation der Regelung des Stratisorp-Zyklus bietet offenbar ein deutliches Potenzial zur Effizienzsteigerung. Interessant wäre an diesem Punkt der Untersuchung eine Kombination der zuletzt vorgestellten Ansätze (Optimierung der Schaltbedingungen, aktive Volumenstromregelung im Adsorberkreis und intermittierender Betrieb von Heizer und Kühler). Da das Silikagelmodul am Ende der Vorhabenslaufzeit an

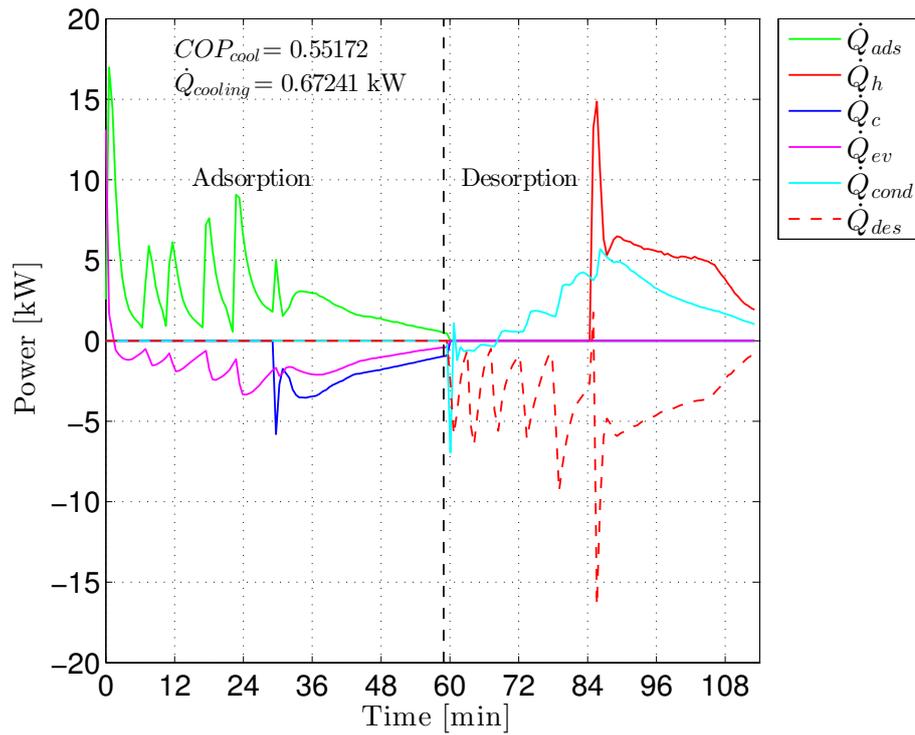


Abbildung 4.26: Leistungsverlauf für die verschiedenen Fluidkreise (Adsorber, Verdampfer/Kondensator, Tankheizer, Tankkühler) für den Zyklus mit intermittierendem Heizer- und Kühlerbetrieb

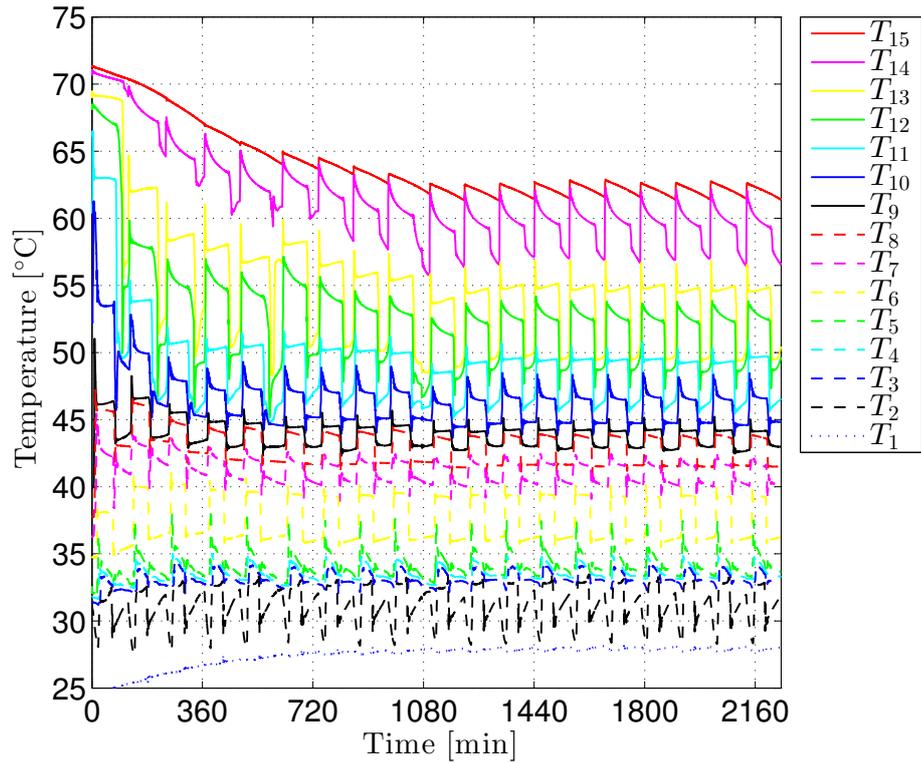


Abbildung 4.27: Entwicklung der Tanktemperaturen im Zyklus mit intermittierendem Heizer- und Kühlerbetrieb über den Verlauf der 19 gemessenen Zyklen

den Hersteller zurückgeschickt wurde wegen des Verdachts auf Schäden (was letztlich zur Entdeckung des Inertgas-Effekts führte), konnten im direkten Anschluss an das Vorhaben zunächst keine weiteren Messungen an diesem Modul durchgeführt werden.

Offen bleibt nach Abschluss der Messungen, wieviel bessere Ergebnisse mit einem Modul ohne Inertgas hätten erzielt werden können. Diese Frage wird im folgenden Kapitel im Zusammenhang mit der Parameteridentifikation des Simulationsmodells nochmals aufgegriffen.

5 Modellierung und Simulation

5.1 Überblick über das Modell

Der größte Teil der für dieses Vorhaben benötigten Modelle wurde bereits im Rahmen des Vorläuferprojekts “Stratisorp” (BWE 27005) entwickelt (Schwamberger et al. [2010]). Die wesentlichen Eigenschaften und Charakteristika dieses zu Projektbeginn vorhandenen Modells sollen in diesem Abschnitt kurz präsentiert werden und die wichtigsten Weiterentwicklungen im Rahmen des aktuellen Vorhabens aufgezeigt werden.

Das Modell der Adsorptionswärmepumpe besteht aus zwei Komponenten,

1. aus dem Adsorptionsmodul, bestehend aus Adsorber, Verdampfer und Kondensator sowie zugehörigem Gehäuse und Verrohrung (im Folgenden auch „Adsorberkomponente“ genannt) und
2. aus der Schichtspeicherkomponente mit Belade- und Entladeeinheit sowie Heizer und Kühler.

Das Modell ist vollständig im Programmpaket MATLAB von The MathWorks, Inc., implementiert. Besondere Toolboxes werden nicht verwendet, der Standardumfang von MATLAB ist ausreichend.

Adsorbermodul Der Adsorber ist ein spezieller Wärmeübertrager zur Übertragung von Wärme zwischen einem durch Rohre oder Kanäle strömenden Fluid auf der einen Seite und dem mikroporösen Sorptionsmaterial (Adsorbens, hier: Zeolith), das den Kältemitteldampf (hier: Wasserdampf) adsorbiert, auf der anderen Seite. Der Adsorber wurde mittels mehrerer Temperaturknoten modelliert. Verdampfer und Kondensator sind ebenfalls Wärmeübertrager, die dem Adsorptionskreisprozess über ein Wärmeträgerfluid Wärme zuführen oder entziehen. Sie sind jeweils mittels eines Temperaturknotens modelliert.

Die Wärmeübertrager sind in einer Vakuumkammer eingebaut. Im bereits vorhandenen Modell wurde das Adsorbermodul mit getrenntem Verdampfer und Kondensator modelliert. Mittlerweile sind Adsorbermodule mit kombiniertem Verdampfer und Kondensator auf dem Markt verfügbar, d. h. nur ein solcher Wärmeübertrager ist im Modul vorhanden und muss abwechselnd an die Niedertemperaturwärmequelle und die Mitteltemperaturwärmesenke gekoppelt werden. Während des Forschungsvorhabens wurde das Modell erweitert, um beide Bauweisen abbilden zu können.

Die Menge des Wärmeübertragungsfluids, die sich in der Verrohrung zwischen den Adsorbermodul und den thermischen Schichtspeicher befindet, wurde im Ausgangsmodell noch vernachlässigt. Die Masse der Verrohrung wurde je einem Rohrknoten vor und hinter dem Adsorber zugeordnet. Im aktuellen Modell erfolgt die Modellierung mittels mehrerer Rohrknoten, von denen eine Hälfte vor dem ersten, die zweite Hälfte nach dem letzten

Adsorberknoten durchströmt wird. Die Gesamt-Rohrmasse wird nun auf diese Rohrknöten verteilt. Mit dem erweiterten Modell ist es nun möglich, auch Totzeiten des Fluids beim Adsorberdurchlauf sinnvoll abzubilden. Dies ist wichtig, um den Einfluss verschiedener Regelungsstrategien (wie z.B. bei Zweiadsorber-Zyklen einer Wärmerückgewinnung durch verzögerte Adsorber-Rücklaufumschaltung zwischen den Halbzyklen) richtig abbilden zu können.

Schichtspeicher Der Schichtspeicher stellt die zentrale Komponente des Stratisorp-Systems dar und erfüllt die primäre Funktion der Wärmerückgewinnung zwischen Adsorptions- und Desorptionsphase des oder der Adsorber. Für die Systemsimulation wurde der Speicher durch ein stark vereinfachtes, eindimensionales Speichermodell modelliert, das mit dem Modell der Pfropfenstömung im Adsorber verträglich ist. Im Rahmen des aktuellen Vorhabens wurden mehrere neue Vermischungsmodelle für den Speicher implementiert. Eine für den Vergleich mit Experimenten wichtige Modellerweiterung war die Implementierung einer Einschichtung über extern selektierte Beladungen anstelle einer Schichtbeladelanze mit kontinuierlicher Austrittshöhe des Fluids (wie im Vorgängerprojekt betrachtet).

Über die Funktion der Wärmerückgewinnung hinaus kann der Speicher auch noch die Funktion eines Pufferspeichers übernehmen, der Antriebswärme für die Adsorptionswärmepumpe zwischenspeichert. Im aktuellen Vorhaben wurde eine Option zur Modellierung dieses Falles integriert (vgl. Schwamberger and Schmidt [2013b]).

Im Ausgangsmodell waren bereits ein Heizer und ein Kühler zur Zufuhr und Entnahme der Antriebs- und Rückkühlwärme in den Speicher integriert. In diesem Vorhaben wurden verschiedene zusätzliche Betriebsmodi des Heizers und Kühlers modelliert. Besonders wichtig für die Validierung des Modells ist die Modellierung eines Kühlerbetriebsmodus, in dem der Kühler während des Desorptionshalbzyklus abgeschaltet wird. Dieser Fall tritt in Experimenten auf, wenn das Rückkühlmodul keinen genügend großen Volumenstrom erzeugen kann, um den Kondensator und den Kühler für den Tank gleichzeitig zu betreiben.

Externe Wärmequellen und -senken Zur Untersuchung des Stratisorp-Zyklus in Kombination mit realistischen Wärmequellen (Sonnenkollektor, Erdwärmesonde) und -senken (Gebäude-Lastkurve, Kühlturm) wurden die entsprechenden Komponenten im Rahmen des aktuellen Vorhabens in das Systemmodell implementiert. Bei Erdwärmesonde und Kühlturm ist keine besondere Kontroll- und Regelungsstrategie erforderlich, da der Massenstrom entweder dauernd (Kühlturm) oder nur während des Adsorptionshalbzyklus (Erdwärmesonde) eingeschaltet ist. Bei der Verwendung eines Sonnenkollektorfelds als Antriebswärmequelle (z. B. konzentrierende Vakuumröhrenkollektoren) wurde für die Simulationen die Matched-Flow-Regelungsstrategie zugrunde gelegt. Damit wird der Massenstrom durch die Kollektoren so eingestellt, dass genau die verlangten Temperaturen erreicht werden. Damit kann sich im Speicher keine Temperaturinversion einstellen, d.h. das Temperaturprofil steigt über die Höhe immer monoton an. Ein dem Sonnenkollektor nachgeschalteter Wärmetauscher (Heizer) sorgt für die Trennung der Fluidkreise in Speicher und Kollektor. Simulationsergebnisse mit diesem Modell wurden in Schwamberger et al. [2011c,d,a] vorgestellt.

Interne Konsistenz Frühere Simulationsmodelle von Adsorptionswärmepumpen, insbesondere solche, die auf einer charakteristischen Kurve nach Dubinin für die Parametrisierung

der Adsorptions-Gleichgewichtsdaten beruhten, wiesen häufig interne Konsistenzprobleme auf, d.h. die Energie- und Entropiebilanzen waren nicht exakt erfüllt, und die Residuen waren größer als aus der Genauigkeit der verwendeten numerischen Integrationsverfahren zu erwarten war. Auch das zu Beginn dieses Vorhabens vorliegende Modell war von diesem Problem noch betroffen. Eine genauere Analyse ergab, dass die bisher in Dubinin-Modellen verwendeten Annahmen über die Wärmekapazität der Adsorbatphase notwendigerweise zu thermodynamischen Inkonsistenzen führten. Es wurde ein Verfahren gefunden bzw. ein in der Literatur bisher nur fehlerhaft beschriebenes Verfahren verbessert, die Wärmekapazität des Adsorbats auf thermodynamisch konsistente Weise numerisch zu berechnen [Schwamberger and Schmidt, 2013a].

5.2 Validierung

5.2.1 Einführung

Da das Grundprinzip sowohl des Stratisorp-Zyklus als auch anderer Zyklen inzwischen gut verstanden ist und ein detailliertes, intern konsistentes Modell verschiedener Zyklen vorliegt, ist es nun erforderlich, die Unterschiede zwischen den experimentellen und durch Simulation erhaltenen Ergebnissen zu verstehen und beide wenn möglich miteinander in Übereinstimmung zu bringen. Unterstützung erhält dieser Anspruch durch die dann mögliche Nutzung experimenteller Ergebnisse als Validierungsgrundlage für das Simulationsmodell, bevor andere Zyklenkonzepte damit untersucht werden. Der *coefficient of performance* (COP) und die Leistung im Kühlfall stellen die wichtigsten Kenngrößen zum Vergleich der Ergebnisse dar. Für Fälle, in denen diese aggregierten Werte eine gute Übereinstimmung aufweisen, wird ein detaillierterer Vergleich vorgenommen.

Bevor das Simulationsmodell durch einen Vergleich mit experimentellen Ergebnissen validiert werden kann, müssen Eingangsparameter wie Wärmeübergangs- und Stofftransportkoeffizienten im Adsorber abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Modultests, bei denen einfach Adsorptionszyklen ohne Wärmerückgewinnung durchlaufen wurden, können dazu herangezogen werden.

5.2.2 Modultests

Bei den Modultests, der Begriff rührt von der Charakterisierbarkeit eines Adsorbermoduls über diese Verfahren, handelt es sich um Experimente, in denen das Adsorbermodul einen einfachen Adsorptionszyklus durchläuft, während die externen Antriebstemperaturen konstant gehalten werden. Eine Wärmerückgewinnung wird nicht vorgenommen.

Es wurde ein Adsorbermodul untersucht, wie es baugleich in der Sortech eCoo Adsorptionskältemaschine Verwendung findet. Es handelt sich um ein Silikagel-Modul (Silikagel Grace 127B als Adsorbens) mit Wasser als Kältemittel. Beim Adsorber handelt es sich um einen Lamellen-Wärmeübertrager mit Aluminium-Lamellen, in dem das Silikagel-Granulat durch ein patentiertes Klebeverfahren mit einem Epoxidharz-Kleber fixiert wird.

In der Vergleichsstudie wurden zwei unabhängige Messreihen berücksichtigt. Es wurden die Ergebnisse verwendet, die bei den Versuchen am Fachgebiet Strömungsmaschinen (FSM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erhalten wurden, während es sich beim zweiten Datensatz um Ergebnisse des Modulherstellers Sortech AG aus Halle handelt.

Die Massenströme auf hohem, mittlerem und niedrigem Temperaturniveau sind in beiden Fällen unterschiedlich. Darüber hinaus wurden in beiden Fällen die Adsorbermodule mit unterschiedlich leistungsfähigen Vakuumpumpen evakuiert. Diese Unterschiede in den Randbedingungen der Experimente führen zu signifikanten Unterschieden in den für das Modul in beiden Fällen ermittelten Kenngrößen. In der Simulation werden die unterschiedlichen Durchflussraten der externen Kreise berücksichtigt und es werden unterschiedliche Stofftransportkoeffizienten verwendet.

Die abgeschätzten Modulparameter aus den Modultests sind: i) Stofftransportkoeffizienten des Adsorbers, ρ_{trans} und ii) Wärmeübergangskoeffizient des Wärmeübertragers vom Adsorberknoten in Verdampfer / Kondensator über das Gehäuse, hA^h .

5.2.2.1 Gleichgewichtsmessung

Zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten des Wärmeübergangs zwischen Adsorber und Verdampfer / Kondensator darf keine Adsorption oder Desorption stattfinden, d. h. es darf keine Adsorptionswärme freigesetzt oder Desorptionswärme aufgenommen werden. Um dies näherungsweise zu erreichen, werden die Modultests mit sehr langen Halbzykluszeiten ($t_{hf} = 9 \text{ h}$) durchgeführt. Am Ende des Halbzyklus wird angenommen, dass das Adsorbens das sorptive Gleichgewicht erreicht hat und deshalb $(hA)^h$ bestimmt werden kann, mit:

$$Q_{\text{cond}} = (hA)^h \cdot (T_{\text{cd}} - T_{\text{ads}}). \quad (5.1)$$

Die Kondensatortemperatur sollte dabei möglichst nah an der Temperatur des Aufstellungsortes liegen. Der Mittelwert von $(hA)^h$ in diesem Abschnitt des Zyklus kann dann als guter Schätzer für den wahren Wert dieser Größe angenommen werden. Für das gegebene Modul ergibt sich ein Wert von 2.35 W/K, der in allen weiteren Simulationen verwendet wird.

Zusätzlich können aus demselben Experiment die Wärmeverluste des Adsorbermoduls an die Umgebung abgeschätzt werden: Die vom Adsorber aufgenommene Leistung am Ende der Desorption ist größer als die vom Kondensator abgegebene Leistung, und die Differenz kann als Wärmeverlust an die Umgebung interpretiert werden:

$$Q_{\text{verlust}} = Q_{\text{ads}} - Q_{\text{cond}}. \quad (5.2)$$

Für die vorliegende Modultestmessung wurden mittlere Wärmeverluste an die Umgebung von 156 W ermittelt. Im Modell des Adsorbermoduls sind diese Wärmeverluste bisher nicht berücksichtigt (im Stratisorp-Zyklus wurden bisher alle Wärmeverluste an die Umgebung dem Tank zugerechnet). Im Vergleich zum Experiment unterschätzt die Simulation also die Wärmeaufnahme am Adsorber. Die hier vorgestellten Simulationsergebnisse zum Modultest wurden nachträglich um die experimentell ermittelten Wärmeverluste korrigiert.

5.2.2.2 Modultest – KIT

Der Modultest wurde simuliert für einen Zyklus mit einer Verdampfertemperatur von 18 °C, einer maximalen Desorptionstemperatur von 72 °C und einer Kondensator- und minimalen

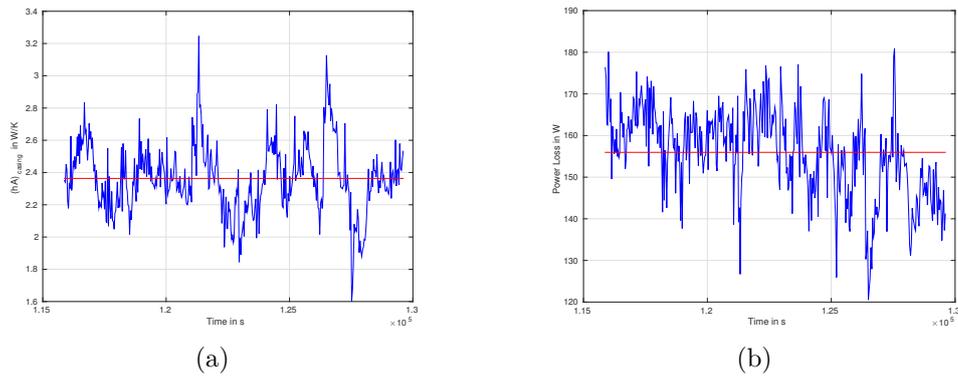


Abbildung 5.1: Verlauf von (a) hA^h und (b) Wärmeverlusten an die Umgebung am Ende des Desorptions-Halbzyklus. Der Mittelwert des jeweiligen Verlaufs ist durch die rote Linie dargestellt.

Tabelle 5.1: Volumenstrom für am KIT aufgenommene Modultest-Messungen

Komponente	Volumenstrom (l/h)
Verdampfer	2001,6
Kondensator	799,2
Adsorptionshalbzyklus	1000,8
Desorptionshalbzyklus	601,2

Adsorbtemperatur von 27°C . Die Volumenströme in den einzelnen Wärmeübertragern sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Es wurde eine Parametervariation des Stofftransportkoeffizienten durchgeführt, bei der alle anderen Simulationsparameter festgehalten wurden, um den Stofftransportparameter des vorliegenden Moduls zu bestimmen.

Parameteridentifikation Die Ergebnisse der Parametervariation sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Sowohl der COP als auch die Kälteleistung steigen mit besserer Adsorberkinetik (also steigendem Stofftransportkoeffizienten) an. Für niedrige Werte des Stofftransportkoeffizienten werden beide Kenngrößen stark durch den Wert dieses Parameters beeinflusst (insbesondere unterhalb von Werten von 0.02 kg bar/s). Der experimentell gemessene COP wird bei einem Wert von 0.004 kg bar/s erreicht. Dieses Ergebnis legt nahe, dass das Adsorbermodul in einem Regime arbeitet, in dem die Performance stark durch den Stofftransport limitiert ist. Allerdings wird bei einer Anpassung des Stofftransportkoeffizienten an den COP die Kälteleistung in der Simulation unterschätzt. Dies legt nahe, dass auch andere Modulparameter noch nicht mit hinreichender Genauigkeit identifiziert wurden (z. B. die aktive Adsorbensmasse) oder dass die Modellbildung selbst die Vorgänge im Modul noch nicht hinreichend beschreibt (z. B. wird eine Heterogenität in den Wärme- und Stofftransportwerten des Adsorbers im Modell bisher gar nicht berücksichtigt).

5.2.2.3 Modultest – Hersteller

Die Modultests wurden beim Hersteller des Adsorbermoduls in deren eigenen Labors wiederholt. Die Durchflussraten während der Experimente sind in Tabelle 5.2 angegeben.

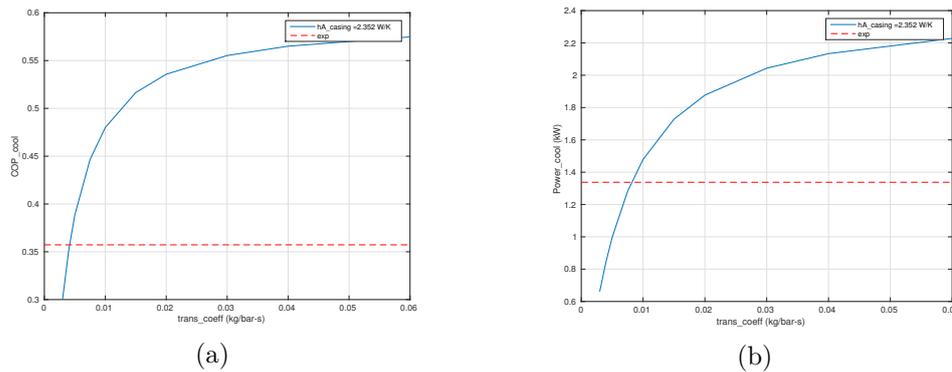


Abbildung 5.2: Variation von (a) COP und (b) Kühlleistung mit Stofftransportkoeffizient für eigenen Modultest

Tabelle 5.2: Volumenstrom für die vom Hersteller aufgenommenen Modultest-Messungen

Komponent	Volumenstrom (l/h)
Verdampfer	1990,8
Kondensator	759,6
Adsorptionshalbzyklus	1065,6
Desorptionshalbzyklus	633,6

Das Modul wurde vor der Wiederholung der Experimente neu evakuiert. Dabei wurde ein erhöhter Inertgas-Restdruck im Modul festgestellt, der grundsätzlich transportbedingt sein kann oder bereits am KIT bestanden haben kann.

Parameteridentifikation Eine ähnliche Parametervariation wie oben beschrieben wurde auch für den Modultest unter den Messbedingungen des Herstellers durchgeführt (s. Abbildung 5.3). Eine Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten COP wurde für einen Wert des Stofftransportkoeffizienten von 0.006 kg bar/s gefunden. Die Abweichung von dem aus der Messung am KIT bestimmten Wert wurde als Einfluss des in der KIT-Messung vorhandenen Inertgases interpretiert. Auch der für die Herstellermessung bestimmte Wert befindet sich noch deutlich im Stofftransport-limitierten Regime. Auch in diesem Fall wird die Kälteleistung in der Simulation unterschätzt.

5.2.3 Simulationen zu Stratisorp-Messungen

Die Ergebnisse der Simulationen des Stratisorp-Zyklus wurden mit den Experimenten dazu verglichen. Um die Verbesserung durch die Anwendung von Wärmerückgewinnung zu quantifizieren, wurde bei denselben externen Temperaturen gearbeitet wie zuvor, d. h. beim Temperatur-Tripel 72 °C/27 °C/18 °C. Die Durchflussraten für die Experimente sind in Tabelle 5.3 angegeben. Der durch Parametervariation ermittelte Stofftransportkoeffizient des Adsorbers und der ebenso identifizierte Wärmedurchgangkoeffizient des Gehäuses wurden in den Simulationen verwendet.

5 Modellierung und Simulation

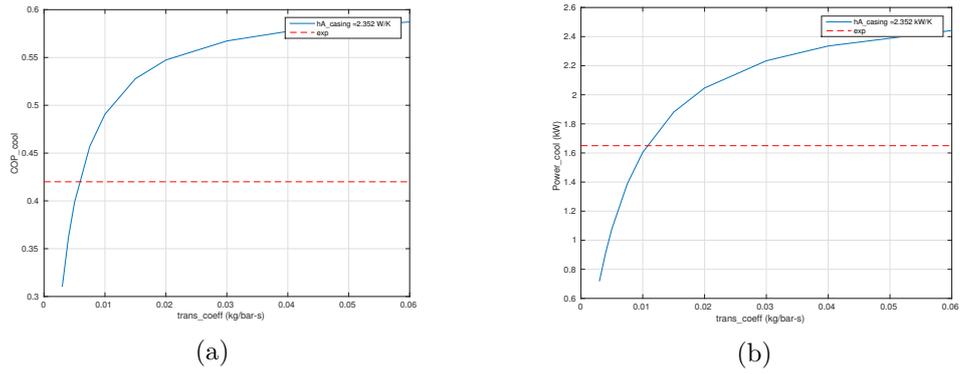


Abbildung 5.3: Variation von (a) COP und (b) Kälteleistung mit Stofftransportkoeffizient für vom Hersteller durchgeführten Modultest

Tabelle 5.3: Volumenstrom für am KIT aufgenommene Stratisorp-Messungen

Komponent	Volumenstrom (l/h)
Verdampfer	2001,6
Kondensator	799,2
Adsorber	1000,8

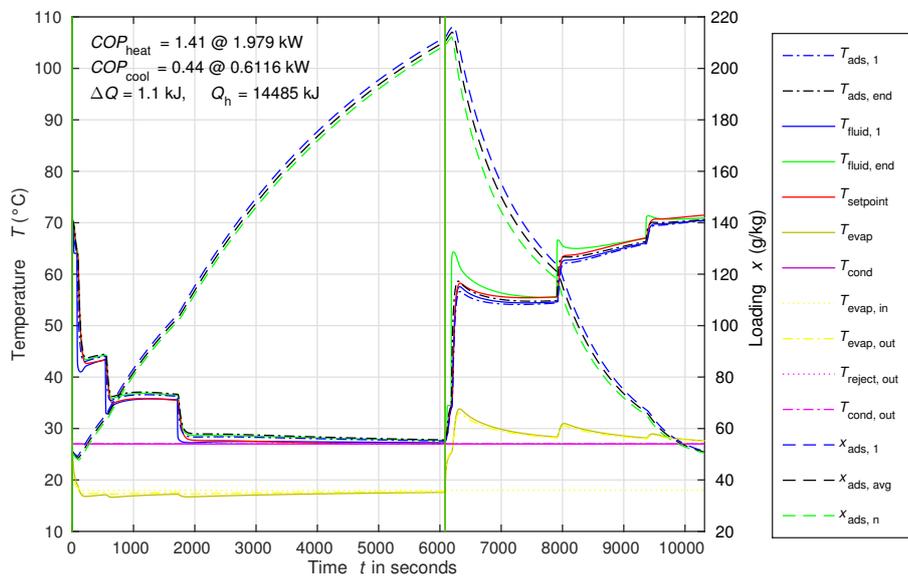


Abbildung 5.4: Temperatur- und Beladungsverläufe der simulierten Stratisorp-Zyklen für $\rho_{\text{trans}} = 0.004 \text{ kg bar/s}$

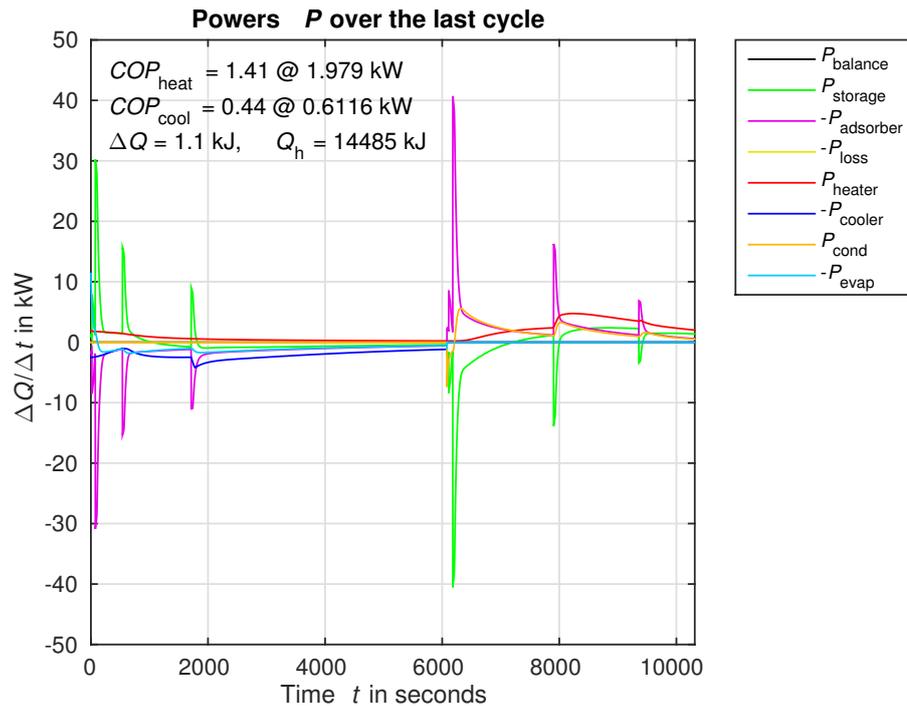


Abbildung 5.5: Leistungsverläufe der simulierten Stratisorp-Zyklen für $\rho_{\text{trans}} = 0.004 \text{ kg bar/s}$ (aus Parameteridentifikation zur Modultestmessung am FSM)

Ergebnis In den Simulationen wurde ein Kühl-COP von 0.44 und eine Kühlleistung von 0.612 kW ermittelt. Der mit den Adsorberverlusten aus den Gleichgewichtsmessungen korrigierte COP beträgt 0.416 und stimmt gut mit dem experimentell ermittelten COP von 0.415 überein. Wie oben beschrieben wird auch hier die Kälteleistung unterschätzt. Experimentell wurde diese zu 0.72 kW ermittelt. Die Differenz rührt vermutlich von einer systematischen Überschätzung der Verluste im Verdampfer her.

In den Simulationen wird die Zykluszeit im Vergleich zu den Experimenten deutlich überschätzt. In Verbindung mit der Unterschätzung der Kühlleistung deutet dies darauf hin, dass die Beladungsdifferenz zwischen minimaler und maximaler Beladung des Sorbens über den Zyklus im Experiment niedriger liegt als in der Simulation angenommen. Durch die Zugrundelegung eines verringerten Stofftransportkoeffizienten in der Simulation kann dieser Effekt weitgehend kompensiert werden, dies verringert jedoch die Genauigkeit des Modells insgesamt. Bei dem aus Vergleichen mit Experimenten ermittelten Stofftransportkoeffizienten handelt es sich daher um einen Effektivwert, der auch den Effekt inaktiver Adsorbensmasse beinhaltet. Eine Untersuchung bezüglich inaktiver Adsorbensmasse und den Hintergründen, wie z. B. Heterogenität der Adsorptionsstellen, wird hier erforderlich sein. Die Anwesenheit einer nicht genau bekannten Menge an Inertgas im Modul erschwert jedoch die Isolation und quantitative Bestimmung der einzelnen Größen.

Tabelle 5.4: Parameter für idealisierte Fälle

Parameter	Werte	Einheit
ρ_{trans}	0.005 , 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12	kg bar/s
$maxratio$	5, 25, 50, 75	-
$T_{\text{diff,min}}$	0.5 , 1,5	K

5.3 Idealisierte Fälle

Der Vergleich simulierter und experimenteller Ergebnisse zeigt, dass der COP des Stratisorp-Zyklus durch das Modell vorhergesagt werden kann. Das Modell kann außerdem eine qualitative Verhersage treffen und eine ungefähre Abschätzung einer Untergrenze für die erwartbare Kälteleistung angeben. Das Modell kann deshalb dazu verwendet werden, Entwicklungspotentiale für Verbesserungen der Zyklusperformance zu identifizieren.

Sensitivitätsanalyse Es wurde eine Sensitivitätsanalyse ausgeführt, um die Auswirkungen von Parameteränderungen bezüglich des Adsorbermoduls, des Schichtspeichers und der Regelungsstrategie zu evaluieren. Die folgenden Parameter wurden variiert:

i) der Stofftransportkoeffizient ρ_{trans} , ii) der lokale Überhöhungsfaktor der Speicherwärmeleitfähigkeit, $maxratio$ (für ein Modell mit superponierten Gaußkurven) iii) die minimale Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeübertragungsfluid im Adsorber (verwendet zur Bestimmung des Endes eines Halbzyklus), $T_{\text{diff,min}}$. Als externe Temperaturen und Massenströme wurden dieselben Einstellungen verwendet wie für die Experimente mit dem Stratisorp-Zyklus (wobei also z.B. der Kondensator-Massenstrom in einem sehr ungünstig niedrigen Bereich gehalten wird). Der Bereich, über den die Parameter variiert wurden ist in Tabelle 5.4 gezeigt. Die fettgedruckten Zahlen liegen den Werten aus den experimentellen Betriebsbedingungen am nächsten.

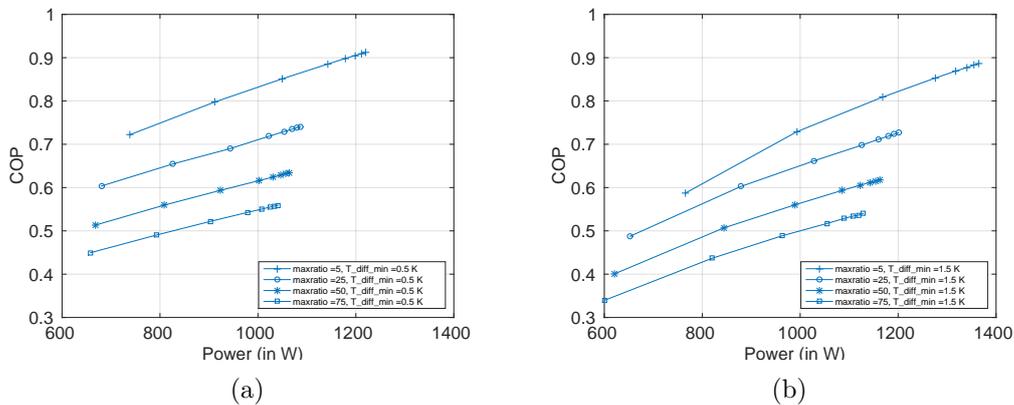


Abbildung 5.6: Variation der simulierten COPs und Kühlleistungen mit Stofftransportkoeffizient und $maxratio$ für (a) $T_{\text{diff,min}} = 0.5$ K und (b) $T_{\text{diff,min}} = 1.5$ K. Entlang jeder Kurve nimmt der Stofftransportkoeffizient zu gemäß Tabelle 5.4.

Die COPs und die entnehmbaren Leistungen für diese Mehrparameterstudie sind in Abbildung 5.6 gezeigt. Eine Erhöhung des Stofftransportkoeffizienten führt zu einem Anstieg sowohl des COP als auch der Kühlleistung (Punkte von links nach rechts auf jeder Kurve). Dies entspricht den Beobachtungen aus den Modultest-Simulationen. Die größere Sensitivität bzgl. des COP und der Leistung bei relativ niedrigen Stofftransportkoeffizienten kann hier ebenfalls beobachtet werden, wobei eine Erhöhung des Stofftransportkoeffizienten über 0.04 kg bar/s kaum noch zu einer weiteren Erhöhung des COP oder der Leistung führt. Ein Adsorber mit besseren Stofftransporteigenschaften kann daher zu einer Erhöhung des COP um mindestens 25 % führen für den Fall bei $T_{\text{diff,min}} = 0.5 \text{ K}$, und sogar noch weiter bei $T_{\text{diff,min}} = 1.5 \text{ K}$.

Werden alle anderen Parameter konstantgehalten, verringert sich der COP des Stratisorp-Zyklus mit einer Erhöhung von $T_{\text{diff,min}}$, während sich die Leistung erhöht. Dies rührt daher, dass die Wahl eines größeren $T_{\text{diff,min}}$ zu einer Verkürzung der Zykluszeit führt, was zu einer geringeren Beladungsspreizung führt. Obwohl der Adsorber zum Ende des Adsorptionshalbzyklus immer noch weit von der Sättigung entfernt ist, sind die treibenden Temperaturdifferenzen zu gering, was zu einem verlangsamten Adsorptionsprozess und entsprechend niedriger Leistung führt. Die Sensitivität hinsichtlich $T_{\text{diff,min}}$ ist hingegen größer für kleinere Stofftransportkoeffizienten im Vergleich zu höheren. Für einen Adsorber mit ausreichend hohem Stofftransportkoeffizienten könnte der Zyklus also mit höherem $T_{\text{diff,min}}$ betrieben werden um höhere Kühlleistung zu erzielen.

Der Überhöhungsfaktor über die Wärmeleitfähigkeit des Speichers im Modell der superponierten Gaußkurven, $maxratio$, ist ein Indikator für die Schichtungsqualität im Speicher. Der COP und die Leistung verhalten sich invers zu $maxratio$, die Auswirkung auf den COP ist jedoch stärker als auf die Leistung. Eine Erhöhung von $maxratio$ bedeutet einen höheren Grad an Vermischung und daher schlechtere Schichtung. Eine Erhöhung der $maxratio$ führt zu höherer Entropieproduktion infolge von Mischung im Speicher und höherem Energiebedarf des Heizers, um die Schichtung zu erhalten. Dies wiederum hat eine Verringerung des COP zur Folge. Solange jedoch die Schichtung durch Heizer und Kühler im Speicher erhalten werden kann, bleibt die Auswirkung auf die Kühlleistung gering. Eine Verbesserung der Schichtung im Speicher wird daher zu einer geringeren $maxratio$ und einer damit verbundenen Erhöhung des COP führen.

6 Nutzen und Verwertbarkeit der Vorhabensergebnisse

Hauptziel des Vorhabens war zu demonstrieren, dass die Effizienz von Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen durch die Nutzung des Stratisorp-Zyklus gegenüber den bisher eingesetzten Zyklen deutlich gesteigert werden kann. Dieses Ziel konnte auf experimenteller Seite im Rahmen des Vorhabens noch nicht erreicht werden, es wurden jedoch wichtige Erkenntnisse gewonnen, warum dies mit dem verwendeten Adsorbermodul und der im Rahmen des Vorhabens verfügbaren Laborinfrastruktur am Fachgebiet Strömungsmaschinen des KIT noch nicht der Fall war. Auch auf Seiten der Simulation wurden wichtige Erkenntnisse darüber gewonnen, was die Anforderungen des Zyklus an die Komponenten (insbesondere das Adsorbermodul) und an die Betriebsbedingungen sind, um tatsächlich eine deutliche Steigerung des *Coefficient of Performance* (COP) zu erreichen. Die Projektbearbeiter sind zuversichtlich, dass deutliche Steigerungen der bisher erreichten Effizienz noch mit verhältnismäßig einfachen Mitteln erreichbar sind, wie z. B. der Reihenschaltung mehrerer Adsorbermodule, der deutlichen Erhöhung des Kondensator-Volumenstroms und der angepassten Regelung des Adsorber-Volumenstroms.

Wenn es gelingt, durch diese Maßnahmen die ursprünglich angestrebte Effizienz ($\text{COP} \geq 0.75$) zu erreichen, kann von einer guten Verwertbarkeit ausgegangen werden. Im kleinen Leistungsbereich ist der hydraulische Aufwand für den Stratisorp-Zyklus möglicherweise zu groß, um eine wirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen. Der Aufwand skaliert jedoch sehr günstig mit der Systemleistung, da die Kosten von Ventilen, Speicher und -einbauten pro kW Kälteleistung mit steigender Größe schnell abnehmen. Bei größeren Leistungen kann zudem verstärkt auf marktverfügbare Komponenten aus Fernwärme-Anwendungen zurückgegriffen werden. Als Pilotanwendungen für den Zyklus eignen sich Anwendungen, in denen ohnehin große Warmwasserspeicher benötigt werden, wie z. B.:

- KWKK-Anlagen
- Netzgeführt betriebene KWK-Anlagen mit großen Pufferspeichern
- Gaswärmepumpen für Heizung und Warmwasserbereitung in großen Mehrfamilienhäusern
- Heizungsunterstützende Solarthermie-Anlagen (insbesondere für MFH, Nahwärme)

Zunächst muss jedoch diese angestrebte Effizienzsteigerung experimentell demonstriert werden, und dann ist eine Hochskalierung des Systems zu größeren Leistungen erforderlich. In einigen Jahren sollten wesentlich verbesserte Adsorber verfügbar sein, so dass sich die Konkurrenzfähigkeit des Stratisorp-Zyklus weiter verbessert.

Wenn die nächsten Entwicklungsschritte wissenschaftlich / technisch erfolgreich verlaufen, könnte auch eine Ausweitung des Anwendungsfeldes in Bereiche außerhalb des Gebäudesektors attraktiv werden (z. B. Nutzung industrieller Abwärme, Wärmetransformation).

Der Ergebnistransfer soll zunächst weiter primär durch wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und auf Tagungen erfolgen. Sobald es gelungen ist, die Erreichung der angestrebten Ziele zu demonstrieren, können gezielt Industriepartner für Produktentwicklungen angesprochen werden.

6.1 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms

Klimaschutz in Gebäuden Erweiterte Adsorptionszyklen wie der Stratisorp-Zyklus weisen ein großes Potenzial auf, signifikant zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor beizutragen. Neue Prozessführungen bei Gaswärmepumpen und in Anwendungen wie der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) in Kombination mit Kraft-Wärme-Wärme-Kopplung (der Nutzung der Sorption im Wärmepumpenmodus im Heizfall zur Erhöhung der thermischen Effizienz der KWK-Anlage) können die Effizienz der Wärmenutzung / Nutzung chemischer Energieträger im Gebäudesektor insgesamt deutlich erhöhen. Der Einsatz von *advanced cycles* wie des Stratisorp-Zyklus lässt dabei Synergien mit der Sanierung der Gebäudehüllen erwarten: Die Absenkung der Heizkreistemperaturen im Zuge einer späteren Sanierung der Gebäudehülle lässt die Effizienz der Sorptionswärmepumpe steigen, und auch die Auslegung einer Gaswärmepumpe auf den höheren Wärmebedarf vor einer Wärmedämmung der Gebäudehülle wäre nicht von Nachteil, da die Teillast-Wirkungsgrade des Stratisorp-Zyklus deutlich über dem Vollast-Wirkungsgrad liegen. Wenn Gaswärmepumpen mit dieser Charakteristik verfügbar sind, kann dies zur Auflösung des Sanierungsstaus im Gebäudebestand beitragen, da dann ein Austausch der Heizungsanlage auch dann sinnvoll wird, wenn gerade keine Sanierung der Gebäudehülle ansteht (und diese Sanierung somit später in Kombination mit “ohnehin-Maßnahmen” wirtschaftlicher vorgenommen werden kann).

Adsorptionsanlagen bieten hier gegenüber den heute viel weiter verbreiteten Absorptionsanlagen den Vorteil einer wesentlich größeren Auswahl an Adsorbentien (Stoffpaaren) und größeren Freiheitsgraden in der Prozessführung (ohne die von LiBr-Wasser-Absorptionsanlagen bekannte Einschränkung durch die Kristallisationslinie im Lösungsfeld).

Effiziente Nutzung thermischer Speicher Speziell der Stratisorp-Zyklus kann zu einem wichtigen Bindeglied zwischen der thermischen Energiespeicherung und der effizienten Energienutzung werden: Thermische Speicher stellen oft die wirtschaftlichste Art der zeitlichen Entkopplung zwischen Strom- und Wärmebedarf dar, die für ein Energiesystem mit hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien von großer Bedeutung ist (z. B. für den netzorientierten Betrieb von KWK-Anlagen). Warmwasserspeicher stellen aus Kostengründen gegenüber PCM- oder Sorptionsspeichern meist das System der Wahl dar. Der Stratisorp-Zyklus kann nun eingesetzt werden, um die Nutzungseffizienz (großer) Warmwasserspeicher deutlich zu erhöhen, indem die Wärme aus dem Speicher soweit möglich zum Antrieb der Wärmepumpe genutzt wird und so zusätzliche Umweltwärme eingekoppelt wird (und die Wärmeverluste des Speicher im Niedertemperaturkreis “aufgefangen” werden).

Vergleich mit elektrischen Wärmepumpen Gegenüber dem Einsatz elektrisch angetriebener Wärmepumpen haben thermisch angetriebene Wärmepumpen den Vorteil, das Stromnetz nicht zu belasten und insbesondere nicht zur Spitzenlast im Stromnetz beizutragen. Gerade für Baden-Württemberg kann dieser Umstand für eine erfolgreiche Umsetzung

der Energiewende von Bedeutung sein, da hier nach dem Wegfall der Kernkraftwerke insbesondere an kalten Wintertagen mit einer angespannten Situation des Stromnetzes zu rechnen ist.

Ein weiterer Vorteil von Adsorptionswärmepumpen gegenüber dem heutigen Stand der Technik bei Kompressionswärmepumpen liegt in der Verwendung von Wasser als Arbeitsmittel gegenüber heute überwiegend noch klimaschädlichen oder brennbaren/giftigen Kältemitteln in Kompressionsanlagen.

Weitere Aspekte Allgemein hat natürlich die Energieeinsparung im Gebäudesektor nicht nur Einfluss auf die Klimaschutzbemühungen, sondern vermindert volkswirtschaftlich auch den Vermögensabfluss für den Import fossiler Energieträger zugunsten regionaler Wertschöpfung.

Im Hinblick auf verschärfte Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden im Zuge geplanter Anpassungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) können hocheffiziente Gaswärmepumpen die klimaverträglichen Gestaltungsmöglichkeiten von Bauherren und Planern erweitern und somit zur Akzeptanz hoher Energiestandards beitragen.

7 Kurzfassung der Arbeitsergebnisse

Experiment Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Messstand für Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen im kleinen Leistungsbereich (bis ca. 8 kW Kälteleistung) am Fachgebiet Strömungsmaschinen des KIT aufgebaut. Ein Silikagel-Adsorptionsmodul wurde sowohl in einem Referenzzyklus ohne Wärmerückgewinnung als auch in dem hier untersuchten Stratisorp-Zyklus vermessen, bei dem eine interne Wärmerückgewinnung zwischen Adsorptions- und Desorptionshalbzyklus über einen Schichtwärmespeicher erfolgt. Im besten der untersuchten Fälle erhöhte sich der Coefficient of Performance (COP) von 0.36 im Referenzzyklus auf 0.55 im Stratisorp-Zyklus. Erst nach Abschluss der Untersuchungen für dieses Vorhaben wurde bei einem erneuten Test des Adsorptionsmoduls beim Hersteller festgestellt, dass sich eine nicht vernachlässigbare Menge von Inertgas (ca. 2 mbar bis 5 mbar) in der Adsorberkammer befand. Zudem waren die Betriebsbedingungen im Labor des FSM ungünstig aufgrund einer Limitierung des Kondensator-Volumenstroms durch das verwendete Temperiermodul auf ca. 800 L/h. Im Referenz-Betriebspunkt des Herstellers beträgt dieser Volumenstrom für dieses Modul 2000 L/h. Infolge des geringen Kondensator-Volumenstroms steigt die Sättigungstemperatur im Kondensator auf eine gegenüber der Vorlauftemperatur um bis zu 12 K höhere Temperatur an. Dadurch verschiebt sich die Desorption zu höheren Temperaturen, und die rückgewinnbare Wärme nimmt deutlich ab. Es wird daher erwartet, dass eine erneute Messung bei höherem Kondensator-Volumenstrom (nach Abschluss einer Umrüstung des Temperiermoduls) einen höheren COP liefert.

Simulation Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurde ein dynamisches Simulationsmodell des Systems (das aus dem Vorläuferprojekt BWE 27005 zur Verfügung stand) weiterentwickelt und eingesetzt, um ein vertieftes Verständnis der experimentellen Ergebnisse zu gewinnen.

Referenzzyklus-Messungen am Adsorptionsmodul (ohne Wärmerückgewinnung) wurden herangezogen, um die Parameter des Simulationsmodells zu identifizieren. Dies ist bisher nur teilweise gelungen, hier ist weitere grundlagenorientierte Arbeit bzgl. der Identifikation von Wärme- und Stofftransportlimitierungen, bisher möglicherweise vernachlässigter Verlustmechanismen an realen Adsorptionsmodulen und bzgl. der sinnvollen Abbildung von Heterogenität im Wärme- und Stofftransport in relativ einfachen Modellen (mit konzentrierten Parametern) erforderlich.

Ein recht robustes Ergebnis der Parameteridentifikation anhand des verfügbaren Silikagelmoduls ist, dass dieses Modul eine deutliche Stofftransportlimitierung aufweist. Daraus resultieren Verschiebungen der Dampfdrücke im Adsorbens (gegenüber Verdampfer-/Kondensatordruck), die die Adsorptionsgleichgewichte auf der Temperaturachse verschieben und somit zu einer Verringerung des Potenzials für eine interne Wärmerückgewinnung führen. Hierin sehen wir den Hauptgrund, warum an diesem Adsorbermodul die erhoffte Effizienzsteigerung des Stratisorp-Zyklus gegenüber anderen Zyklen experimentell nicht nachgewiesen werden konnte. In der Systemsimulation ist bei höheren Werten für den Stoff-

transportkoeffizienten ebenfalls ein sehr robustes Ergebnis, dass der Stratisorp-Zyklus eine deutlich höhere Leistungszahl (COP) erreicht als Referenzzyklen mit der heute marktverfügbaren Art der Wärmerückgewinnung (insbesondere Zwei-Adsorber-System mit verzögerter Rücklaufumschaltung am Adsorber nach Halbzyklenwechsel Adsorption / Desorption). Die benötigte Erhöhung des Stofftransportkoeffizienten, um dieses Potenzial des Zyklus realisieren zu können, ist nach unserer Einschätzung grundsätzlich im Rahmen der aktuellen Adsorbertechnologie möglich. Darüber hinaus ist aber bereits aus den Systemsimulationen im Vorläuferprojekt bekannt, dass technologisch weiterentwickelte Adsorber (mit sehr guten Wärme- und Stofftransporteigenschaften durch die Verwendung von Adsorbens / Träger-Kompositen) besonders stark vom Stratisorp-Zyklus profitieren können. Adsorber dieser Technologie sind jedoch bisher nicht außerhalb der an ihrer Entwicklung beteiligten Einrichtungen verfügbar und standen somit bisher nicht für Vorhaben dieser Art zur Verfügung.

Grundlagenorientierte Ergebnisse Auch wenn das anwendungsorientierte Hauptziel des Vorhabens auf experimenteller Seite nicht erreicht werden konnte, so wurden doch einige davon unabhängige Ergebnisse erzielt, die für die weitere wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet des Vorhabens von Bedeutung sind. Insbesondere sind hier die erzielten Fortschritte bei der thermodynamisch konsistenten Modellierung von Adsorptionszyklen zu nennen, die in Schwamberger and Schmidt [2013a] veröffentlicht wurden. Es konnte gezeigt werden, dass eine Parametrisierung der Adsorptionsgleichgewichte über charakteristische Kurven nach Dubinin immer dann zu thermodynamisch nicht konsistenten Ergebnissen (also zu Residuen in den Energie- und Entropiebilanzen über einen Adsorptionszyklus) führen, wenn nicht die Wärmekapazität der adsorbierten Phase so gewählt wird, dass die Konsistenzbedingung erfüllt ist. Es konnte ein Verfahren zur numerischen Berechnung dieser Wärmekapazität angegeben und in effizienter Weise in die Simulationsmodelle integriert werden.

Anwendungsorientierte Ergebnisse Der Stratisorp-Zyklus ist zwar von der Grundidee der Wärmerückgewinnung her sehr einfach, er weist jedoch auf der Regelungsseite viele Freiheitsgrade auf, so dass für seine möglichst effiziente Umsetzung in spezifischen Anwendungen ein sehr gutes Verständnis des Einflusses der einzelnen Regelungsparameter auf Effizienz und Leistung des Gesamtzyklus erforderlich ist. Dies nichttrivial aufgrund der starken Rückkopplungen im System – beispielsweise wirken sich Änderungen an den Umschaltbedingungen der Entnahmhöhen im Speicher auf die sich einstellende Temperaturverteilung im eingeschwungenen (stationären) Adsorptionszyklus aus. Auf diesem Gebiet wurden im aktuellen Vorhaben deutliche Fortschritte erzielt: Es wurde erkannt, dass es vorteilhaft ist, den Zyklus im Temperaturbereich des größten Überlapps der differentiellen Wärmekurven von Adsorption und Desorption bei geringer Leistung möglichst nah an den Adsorptionsgleichgewichten auszufahren und außerhalb dieses Bereichs die Leistung zu erhöhen durch größere treibende Temperaturdifferenzen und / oder größere Volumenströme. Auf diese Weise kann der Regelungs-Freiheitsgrad des Stratisorp-Zyklus, der auf der Entkopplung des Adsorberbetriebs vom Betrieb der Wärmequelle und -senke basiert, thermodynamisch vorteilhaft ausgenutzt werden.

Für den ungünstigen Fall relativ starker Vermischung im Speicher wurde zudem festgestellt, dass ein intermittierender Betrieb von Heizer und Kühler vorteilhaft sein kann: Wenn Heizer und Kühler direkt mit dem Adsorber kurzgeschlossen werden in den Endphasen

beider Halbzyklen (unter Umgehung des Speichers), verringert sich der Temperaturgradient im Speicher (durch Absenkung der Höchst- und Anhebung der Minimaltemperatur) und der "Fehlwärmestrom" vom Heizer direkt zum Kühler durch Vermischung im Speicher wird eliminiert.

Für das in diesem Vorhaben verfolgte Schichtladekonzept, die für die Fluidentnahme aus dem Speicher vorhandenen Schichteinrichtungen (hier: Ringe) auch für die Einschichtung zu verwenden, wurde erkannt, welche Abhängigkeit von der Auslegung des Adsorbermoduls besteht: Die mittlere Temperaturspreizung am Adsorber sollte zur Temperaturdifferenz zwischen den für die Ein- und Ausschichtung verwendeten Schichteinrichtungen passen, um die Vermischungseffekte im Speicher zu minimieren. Für das hier verwendete Silikagelmodul war diese Passung noch nicht gegeben, die Temperaturspreizung am Adsorber war typischerweise wesentlich kleiner als die Temperaturdifferenz zwischen benachbarten Ringen. In der weiteren Arbeit am Stratisorp-Zyklus sollten hier entweder Module mit angepasster Adsorber-Auslegung verwendet werden oder die Temperaturspreizung z. B. durch Reihenschaltung mehrerer Module vergrößert werden.

In der dynamischen Simulation des Stratisorp-Zyklus in verschiedenen Anwendungen wurden die verfügbaren Systemvarianten wesentlich erweitert und um neue Modelle für Wärmequellen und -senken (z. B. Erdwärmesonden und Solarkollektoren) ergänzt. Für die Adsorbermodule sind nun Varianten sowohl mit getrenntem Verdampfer und Kondensator als auch mit kombinierter Komponente und externer Umschaltung verfügbar. Auch die Regelungsvarianten in der Simulation wurden wesentlich erweitert, um Untersuchungen zur Regelungsoptimierung anstellen und Laborexperimente detailliert abbilden zu können.

Insgesamt wurde im Vorhaben sowohl auf experimenteller Seite als auch in der Simulation eine Vielzahl neuer Erkenntnisse gewonnen, die größtenteils in diesem Vorhaben nicht mehr in Verbesserungen des Testsystems umgesetzt werden konnten, aber einen sehr guten Ausgangspunkt für weitere Arbeiten darstellen.

8 Anhang

Erfolgte Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen sind im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entstanden.

1. Valentin Schwamberger, Christian Glück, and Ferdinand P. Schmidt. Neuartiges zykliskonzept mit verbesserter interner wärmerückgewinnung für adsorptionskältemaschinen. In *DKV-Tagung*, 2011b
2. Valentin Schwamberger, Christian Glück, and Ferdinand P. Schmidt. A novel adsorption cycle with advanced heat recovery for high efficiency air-cooled adsorption chillers. In *23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR)*, 2011c
3. Valentin Schwamberger, Christian Glück, and Ferdinand P. Schmidt. Modeling and transient analysis of a novel adsorption cycle concept for solar cooling. In *ISES World Congress*, 2011d
4. Valentin Schwamberger, Chirag Joshi, and Ferdinand P. Schmidt. Second law analysis of a novel cycle concept for adsorption heat pumps. In *Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf. (ISHPC11)*, pages 991–998, 2011e
5. V. Schwamberger, L. Schnabel, C. Glück, and F. P. Schmidt. Modeling results of a novel adsorption cycle with advanced heat recovery for high-efficiency air-cooled adsorption chillers. In *Proceedings of 4th OTTI conference on Solar Air-Conditioning*, 2011a
6. V. Schwamberger and F. P. Schmidt. Estimating the heat capacity of the adsorbate - adsorbent system for adsorption equilibria regarding thermodynamic consistency. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(47):16958 – 16965, 2013a
7. V. Schwamberger and F. P. Schmidt. Smart use of a stratified hot water storage through coupling to an adsorption heat pump cycle. In *Proc. 8th Int. Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2013)*, 2013b
8. Hadi Taheri, Ferdinand P Schmidt, and Martin Gabi. Numerical investigation of effective heat conductivity of fluid in charging process of thermal storage tank. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 5(01):39, 2015

Literaturverzeichnis

- Elsa Andersen, Simon Furbo, Matthias Hampel, Wolfgang Heidemann, and Hans Müller-Steinhagen. Investigation on stratification devices for hot water heat stores. *International Journal of Energy Research*, 32(3):255–263, 3 2008. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/er.1345.
- Y. I. Aristov. Challenging offers of material science for adsorption heat transformation: A review. *Applied Thermal Engineering*, 50(2):1610–1618, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.003>.
- J. Bauer, R. Herrmann, W. Mittelbach, and W. Schwieger. Zeolite/aluminum composite adsorbents for application in adsorption refrigeration. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 33(13):1233–1249, OCT 25 2009. ISSN 0363-907X. doi: {10.1002/er.1611}.
- A. Berg. Numerical and experimental study of the fluid flow in porous medium in charging process of stratified thermal storage tank. Master’s thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, 2013.
- Lucio Bonaccorsi, Luigi Calabrese, Angelo Freni, and Edoardo Proverbio. Hydrothermal and microwave synthesis of SAPO (CHA) zeolites on aluminium foams for heat pumping applications. *MICROPOROUS AND MESOPOROUS MATERIALS*, 167:30–37, FEB 2 2013. ISSN 1387-1811. doi: {10.1016/j.micromeso.2012.06.006}.
- N.M. Brown and F.C. Lai. Enhanced thermal stratification in a liquid storage tank with a porous manifold. *Solar Energy*, 85(7):1409 – 1417, 2011. ISSN 0038-092X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.024>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11001071>.
- Biplab Choudhury, Bidyut Baran Saha, Pradip K. Chatterjee, and Jyoti Prakas Sarkar. An overview of developments in adsorption refrigeration systems towards a sustainable way of cooling. *Applied Energy*, 104(0):554 – 567, 2013. ISSN 0306-2619. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.042>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008355>.
- Cynthia A. Cruickshank. *Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating application*. PhD thesis, Queen’s university, Kingston, Ontario, Canada, 2009.
- F. Feuerstein. Experimentelle Untersuchung von thermischen Schichtspeichern mittels optischer Strömungsvisualisierungsverfahren, Background Oriented Schlieren (BOS). Master’s thesis, KIT Fakultät für Maschinenbau, 2013. Diploma Thesis.
- Andrea Frazzica, Gerrit Földner, Alessio Sapienza, Angelo Freni, and Lena Schnabel. Experimental and theoretical analysis of the kinetic performance of an adsorbent coating composition for use in adsorption chillers and heat pumps. *APPLIED THERMAL*

- ENGINEERING*, 73(1):1022–1031, DEC 5 2014. ISSN 1359-4311. doi: {10.1016/j.applthermaleng.2014.09.004}.
- Angelo Freni, Lucio Bonaccorsi, Luigi Calabrese, Angela Capri, Andrea Frazzica, and Alessio Sapienza. SAPO-34 coated adsorbent heat exchanger for adsorption chillers. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 82:1–7, MAY 5 2015. ISSN 1359-4311. doi: {10.1016/j.applthermaleng.2015.02.052}.
- Michel Y. Haller, Cynthia A. Cruickshank, Wolfgang Streicher, Stephen J. Harrison, Elsa Andersen, and Simon Furbo. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – review and theoretical comparison. *Solar Energy*, 83(10):1847 – 1860, 2009. ISSN 0038-092X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.019>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09001546>.
- Matthias Hampel. *Rechnergestützte Entwicklung von Warmwasser-Wärmespeichern für Solaranlagen*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 2008.
- Chirag Joshi. *Experimental Investigations of Adsorption Heat Pump Cycle Using Stratified Thermal Storage for Heat Recovery*. Dissertationsschrift (noch unveröffentlicht), Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015.
- F. Leopold. The application of the colored background oriented schlieren technique (cbos) to free-flight and in-flight measurements. In *Proc. 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF 2007)*, 2007.
- X. H. Li, X. H. Hou, X. Zhang, and Z. X. Yuan. A review on development of adsorption cooling-Novel beds and advanced cycles. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 94:221–232, APR 2015. ISSN 0196-8904. doi: {10.1016/j.enconman.2015.01.076}.
- Rolf Lohse. *Einfluss von Beladeeinrichtungen auf die thermische Schichtung in Warmwasserspeichern*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, TU Chemnitz, Shaker Verlag, 2009.
- Marlinda, Aep Saepul Uyun, Takahiko Miyazaki, Yuki Ueda, and Atsushi Akisawa. Performance Analysis of a Double-effect Adsorption Refrigeration Cycle with a Silica Gel/Water Working Pair. *ENERGIES*, 3(11):1704–1720, NOV 2010. ISSN 1996-1073. doi: {10.3390/en3111704}.
- M. Pons and F. Poyelle. Adsorptive machines with advanced cycles for heat pumping or cooling applications. *International Journal of Refrigeration*, 1999.
- Abul Fazal Mohammad Mizanur Rahman, Yuki Ueda, Atsushi Akisawa, Takahiko Miyazaki, and Bidyut Baran Saha. STUDY OF A SILICA GEL-WATER-BASED THREE-BED DUAL-MODE ADSORPTION COOLING CYCLE. *HEAT TRANSFER RESEARCH*, 46(3):213–232, 2015. ISSN 1064-2285.
- H. Richard and M. Raffel. Principle and applications of the background oriented schlieren (bos) method. *Meas. Sci. Technol.*, 12(9):1576 – 1585, 2001. doi: 10.1088/0957-0233/12/9/325.

- V. Schwamberger and F. P. Schmidt. Estimating the heat capacity of the adsorbate - adsorbent system for adsorption equilibria regarding thermodynamic consistency. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(47):16958 – 16965, 2013a.
- V. Schwamberger and F. P. Schmidt. Smart use of a stratified hot water storage through coupling to an adsorption heat pump cycle. In *Proc. 8th Int. Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2013)*, 2013b.
- V. Schwamberger, C. Joshi, H. Taheri, and F. P. Schmidt. Stratisorp: Neuartiges schichtspeichersystem zur effizienzsteigerung von adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen. Technical report, Karlsruher Institut für Technologie, KIT, 2010.
- V. Schwamberger, L. Schnabel, C. Glück, and F. P. Schmidt. Modeling results of a novel adsorption cycle with advanced heat recovery for high-efficiency air-cooled adsorption chillers. In *Proceedings of 4th OTTI conference on Solar Air-Conditioning*, 2011a.
- Valentin Schwamberger, Christian Glück, and Ferdinand P. Schmidt. Neuartiges zyklenskonzept mit verbesserter interner wärmerückgewinnung für adsorptionskältemaschinen. In *DKV-Tagung*, 2011b.
- Valentin Schwamberger, Christian Glück, and Ferdinand P. Schmidt. A novel adsorption cycle with advanced heat recovery for high efficiency air-cooled adsorption chillers. In *23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR)*, 2011c.
- Valentin Schwamberger, Christian Glück, and Ferdinand P. Schmidt. Modeling and transient analysis of a novel adsorption cycle concept for solar cooling. In *ISES World Congress*, 2011d.
- Valentin Schwamberger, Chirag Joshi, and Ferdinand P. Schmidt. Second law analysis of a novel cycle concept for adsorption heat pumps. In *Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf. (ISHPC11)*, pages 991–998, 2011e.
- P. Steinert, S. Goepfert, and B. Platzer. Transient calculation of charge and discharge cycles in thermally stratified energy storages. *SOLAR ENERGY*, 97:505–516, NOV 2013. ISSN 0038-092X. doi: {10.1016/j.solener.2013.08.039}.
- Hadi Taheri. *Numerical Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Applied in Adsorption Heat Pump Cycle*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2014.
- Hadi Taheri, Ferdinand P. Schmidt, and Martin Gabi. Numerical investigation of effective heat conductivity of fluid in charging process of thermal storage tank. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 5(01):39, 2015.
- L. Venkatakrisnan and G. E. A. Meier. Density measurements using the background oriented schlieren technique. *Experiments in Fluids*, 37:237–247, 2004.
- U. Wittstadt, G. Fuldner, O. Andersen, R. Herrmann, and F. Schmidt. A new adsorbent composite material based on metal fiber technology and its application in adsorption heat exchangers. *Energies*, 8, 2015. (accepted 30.07.2015).
- J. S. Wu and S. X. Yin. A micro-mechanism model for porous media. *Commun. Theor. Phys. (Beijing, China)*, 52(5):936 – 940, Nov. 2009.