



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Aaron Schröder

## **Umsetzung und Wiederinbetriebnahme eines Zeolithspeichers**

**Aaron Schröder**

**Umsetzung und Wiederinbetriebnahme  
eines Zeolithspeichers**

Bachelor eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/ Energie- und Anlagensysteme  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. -Ing. Heike Frischgesell

Zweitprüfer/in: Alexander von Stryk

Abgabedatum: 23.08.2022

# **Zusammenfassung**

**Aaron Schröder**

## **Thema der Bachelorthesis**

Umsetzung und Inbetriebnahme eines Zeolithspeichers

## **Stichworte**

Zeolith, Versuchsstand, Sorption, Adsorption, Desorption, Wärmespeicher, Umpositionierung, Betriebsverhalten, Wiederinbetriebnahme

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit soll einen vertieften Einblick über die Funktionsweise von Sorptionswärmespeichern, besonders Zeolithspeicher, verschaffen. Dabei wird auf die physikalischen Prozesse eingegangen und diese thermodynamisch erläutert. Zusätzlich wird ein Konzept erstellt, welches den Umpositionierungsprozess des Versuchsstandes beschreibt und die Methode erklärt, weshalb diese Umpositionierung so durchgeführt worden ist. Anschließend wird der Versuchsstand noch experimentell untersucht, auf das Betriebsverhalten eingegangen und ein Vergleich mit dem Zustand vor der Umpositionierung geschaffen.

**Aaron Schröder**

**Title of the paper**

Transfer and commissioning of a zeolite storage tank

**Keywords**

Zeolite, trainer, sorption, adsorption, desorption, heat storage, repositioning, operating behaviour, recommissioning

**Abstract**

This bachelor thesis is intended to provide an in-depth insight into the functioning of sorption heat storage systems, especially zeolite storage systems. The physical processes are discussed and described thermodynamically. In addition, a concept is described that describes the repositioning process of the trainer and the philosophy behind this repositioning. Subsequently, the trainer is examined experimentally, the operating behaviour is described and a comparison is made with the condition before the repositioning.

# Aufgabenstellung

## für die Bachelorthesis

**von Herrn:** Aaron Schröder

**Matrikel-Nummer:** XXXXXXXXXX

**Thema:** Umsetzung und Inbetriebnahme eines Zeolithspeichers

### Schwerpunkte:

Im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen wird ein Zeolithspeicher als Laborversuch betrieben. Um die Versuchsstände des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen zentraler aufzustellen, muss der Speicher umpositioniert werden. Im Rahmen der Umbaumaßnahmen soll untersucht werden, ob der Versuchsstand optimiert werden kann. Der Speicher soll nach dem Umbau wieder in Betrieb genommen werden und das Betriebsverhalten soll untersucht werden.

Es sind daher im Besonderen folgende Aufgaben zu bearbeiten:

- Literaturrecherche
- Erstellen eines Konzepts zur Umpositionierung, indem auf mögliche Probleme und Risiken eingegangen wird, damit eine reibungsfreie und risikoarme Umpositionierung gewährleistet ist.
- Durchführung der Umpositionierung des Versuchsstandes mit der damit verbundenen Demontage und Montage des Versuchsstandes.
- Wiedereinbetriebnahme der Anlage
- Durchführen experimenteller Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Speichers
- Bewertung und Interpretation der bei der Inbetriebnahme ermittelten Messergebnisse
- Vorschläge zu möglichen Optimierungen der Anlage.

Am Ende der Arbeit sind die Ergebnisse kritisch zu bewerten. Die Ergebnisse der Arbeit sind in entsprechender Schriftform darzustellen und zu dokumentieren. Der Fortgang der Arbeit ist in regelmäßigen Abständen mit den Betreuern der Arbeit zu diskutieren.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XI
Symbolverzeichnis .....	XII
1. Relevanz in der heutigen Zeit .....	1
2. Funktionsweise von Zeolithspeichern - Stand der Technik.....	3
2.1. Begriffserklärung .....	4
2.2. Adsorption .....	6
2.2.1. Physisorption .....	6
2.2.2. Chemisorption .....	8
2.3. Thermodynamik in der Adsorption .....	9
2.3.1. Isotherme der Adsorption.....	10
2.3.2. Hysterese einer Adsorption.....	13
2.3.3. Entstehung einer Hysterese.....	13
2.3.4. Beeinflussung der Hysterese .....	17
2.4. Offene Systeme .....	18
2.5. Geschlossene Systeme .....	18
2.6. Adsorbens .....	19
2.6.1. Zeolith.....	20
2.6.2. Silicagele .....	23
3. Anwendungsbereiche von Sorptionsspeichern .....	25
3.1. Mobile Speicher.....	25
3.2. Trocknung .....	25
3.3. Weitere Anwendungen .....	25
4. Versuch .....	26

4.1.	Versuchsbeschreibung .....	26
4.2.	Versuchsdurchführung.....	28
5.	Konzept zur Umpositionierung des Versuchsstands .....	30
5.1.	Arbeitssicherheit .....	30
5.2.	Risiken und mögliche Probleme.....	30
5.2.1.	Probleme der Kabelzuordnung .....	30
5.2.2.	Erschütterungen .....	31
5.2.3.	Stabilitätsverlust der Anlage .....	31
5.3.	Bestimmung des Gewichtes .....	31
5.4.	Konzeptideen der Umpositionierung .....	33
5.4.1.	Konzeptidee1: Umpositionierung mit Hilfe des Hallenkrans .....	33
5.4.2.	Konzeptidee 2: Umpositionierung der Anlage als Ganzes .....	33
5.4.3.	Konzeptidee 3: Zerlegung der Anlage, um einen besseren Transport zu gewährleisten. ....	35
5.5.	Vorbereitung und Durchführung.....	38
5.6.	Fazit der Umpositionierungsmaßnahmen .....	38
6.	Messergebnisse.....	39
6.1.	Messergebnis vor der Umpositionierung.....	39
6.1.1.	Adsorptionsvorgang vor der Umpositionierung .....	39
6.1.2.	Desorptionsvorgang vor der Umpositionierung .....	40
6.2.	Messergebnis nach der Umpositionierung .....	41
6.2.1.	Direkt nach der Umpositionierung.....	41
6.2.2.	Adsorptionsprozess nach der Umpositionierung .....	43
6.2.3.	Desorptionsprozess nach der Umpositionierung.....	44
6.3.	Vergleich der Messergebnisse vor und nach der Umpositionierung.....	45
6.3.1.	Vergleich mit Mehlaus: Temperaturverlauf bei der Desorption .....	45

6.3.2.	Vergleich mit Mehlaus: Wassergehalt bei der Desorption .....	47
6.3.3.	Vergleich mit Mehlaus: Temperatur bei der Adsorption.....	48
6.3.4.	Vergleich mit Mehlaus: Wassergehalt bei der Adsorption .....	49
6.4.	Einordnung der Ergebnisse des Vergleiches .....	52
7.	Analyse des Betriebsverhaltens.....	53
7.1.	Temperaturregelung am Eintritt .....	53
7.2.	Temperaturregelung am Austritt .....	55
7.3.	Luftfeuchtigkeitsregelung.....	57
7.4.	Wasserbilanzierung .....	58
7.5.	Bestimmung der Wärmemenge .....	60
8.	Optimierung .....	64
8.1.	Stolperfalle Kabelführung.....	64
8.2.	Sicherung der Wasserkanister .....	64
8.3.	Temperaturbereich .....	65
8.4.	Temperaturreglung am Austritt .....	65
8.5.	Erhöhung des Massenstromes .....	66
9.	Fazit und Zusammenfassung.....	67
	Quellen .....	69
	Anhang-A: secondary building units (SBUs) .....	A
	Anhang B: Modell der Kabelführung .....	B
	Anhang C: R&I.....	C
	Anhang D: Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung .....	D



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verdeutlichung der zeitlichen Verschiebung von Angebot und Bedarf bei solarer Energie [1] .....	1
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Prozesses.....	3
Abbildung 3: Darstellung Polarität von Wasser .....	7
Abbildung 4: Schematische Darstellung der physikalischen Adsorption.....	7
Abbildung 5: Darstellung des Thermodynamischen Gleichgewichts [2].....	9
Abbildung 6: Schematische Darstellung der ersten Standardtype [3].....	10
Abbildung 7: Schematische Darstellung der zweiten Standardtype [3].....	11
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Adsorption bei der dritten Standardgruppe [3] .	12
Abbildung 9: Schematische Isotherme Darstellung der vierten Standardtype [3].....	12
Abbildung 10: Schematische Isotherme Darstellung der fünften Standardtype [3] .....	13
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Tintenflaschenmodells [5].....	14
Abbildung 12: Grafische Beschreibung des Sorptionsvorgangs nach dem Tintenflaschenmodell [5] .....	15
Abbildung 13: Darstellung der Hysterese nach dem Tintenflaschenmodell [5] .....	16
Abbildung 14: Veranschaulichung der Entstehung einer Hysterese bei beidseitig geöffneten Poren [5].....	17
Abbildung 15: Darstellung der Funktionsweise von geschlossenen Systemen [8].....	18
Abbildung 16: Darstellung der Primärbauereinheiten [9] .....	20
Abbildung 17: Darstellung verschiedener SBUs [10].....	21
Abbildung 18: Darstellung von verschiedenen Zeolithtypen und deren Zusammensetzung .	21
Abbildung 19: Schematische Darstellung von ZSM-5 Zeolith [11] .....	22
Abbildung 20: Visualisierung von Silicagel [12] .....	23
Abbildung 21: Aufbau des Versuchsstands.....	27
Abbildung 22: Einteilung der zwei Einheiten .....	28
Abbildung 23: Darstellung des abgeschlossenen Beladevorgangs .....	29

Abbildung 24: Skizze der Engstelle Treppe oben, Angaben in mm .....	34
Abbildung 25: Model der Engstelle Treppe unten, Angaben in mm .....	34
Abbildung 26: Modell der oberen Engstelle beim liegenden Transport .....	37
Abbildung 27: Modell der Engstelle unten an der Treppe beim liegenden Transport .....	37
Abbildung 28: Entladung vor der Umpositionierung .....	39
Abbildung 29: Messergebnisse der Beladung vor der Umpositionierung .....	40
Abbildung 30: Entladung direkt nach der Umpositionierung .....	41
Abbildung 31: Problem bei der Feuchtigkeitsmessung .....	42
Abbildung 32: Darstellung der gelösten Problematik .....	43
Abbildung 33: Adsorptionsvorgang nach der Umpositionierung .....	44
Abbildung 34: Desorptionsvorgang nach der Umpositionierung .....	45
Abbildung 35: Temperaturverlauf nach der Umpositionierung bei der Desorption .....	46
Abbildung 36: Temperaturverlauf von Mehlaus vor der Umpositionierung bei der Desorption .....	46
Abbildung 37: Verlauf des Wassergehalts nach der Umpositionierung bei der Desorption...	47
Abbildung 38: Verlauf des Wassergehalts vor der Umpositionierung von Mehlaus bei der Desorption .....	48
Abbildung 39: Temperaturverlauf nach der Umpositionierung bei der Adsorption .....	49
Abbildung 40: Temperaturverlauf von Mehlaus bei der Adsorption .....	49
Abbildung 41: Verlauf des Wassergehalts nach der Umpositionierung bei der Adsorption...	50
Abbildung 42: Verlauf des Wassergehalts von Mehlaus bei der Adsorption .....	50
Abbildung 43: $h_1+x$ Diagramm zum Einfluss der Umgebungstemperatur .....	51
Abbildung 44: Darstellung der Regelung der Ist-Temperatur am Eintritt .....	53
Abbildung 45: Darstellung der Regelung der Ist-Temperatur am Eintritt bei 80°C .....	54
Abbildung 46: Darstellung der Regelung für die Ist-Temperatur am Austritt .....	55
Abbildung 47: Darstellung der Regelung für die Temperatur am Austritt in umgekehrter Reihenfolge .....	56

Abbildung 48: Darstellung des Regelverhaltens bei verschiedenen Soll-Werten.....	57
Abbildung 49: Darstellung der abgegebenen Wassermassen bei der Desorption .....	59
Abbildung 50: Darstellung der aufgenommenen Wassermasse während der Adsorption.....	59
Abbildung 51: Darstellung des Wärmestroms bei der Desorption.....	61
Abbildung 52: Darstellung des Wärmestroms bei der Desorption ohne Wärmeverluste .....	62
Abbildung 53: Darstellung des Wärmestroms bei der Adsorption.....	62
Abbildung 54: Darstellung der Wärmemenge bei der Adsorption .....	63
Abbildung 55: Überblick der gängigsten secondary building units (SBUs). [7].....	A
Abbildung 56: Darstellung des Excel-Modells zur richtigen Kabelführung .....	B
Abbildung 57: R&I des Versuchsstandes [11] .....	C

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der Massen einzelner Bauteile.....	32
---	----

# Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
$p_A$	Partialdruck	Pa
$d_1$	Durchmesser Kanal	nm
$d_2$	Durchmesser Pore	nm
$d_3$	Durchmesser Flaschenhalspore	nm
$T_u$	Temperatur unten / Temperatureintritt	°C
$T_o$	Temperatur oben/ Temperature Austritt	°C
rHo	relative Luftfeuchtigkeit oben/ relative Luftfeuchtigkeit Austritt	%
rHu	relative Luftfeuchtigkeit unten/ relative Luftfeuchtigkeit Eintritt	%
ro	Wassergehalt oben / Wassergehalt Austritt	$\frac{g}{kg}$
ru	Wassergehalt unten/ Wassergehalt Eintritt	$\frac{g}{kg}$
$x_s$	Massenbeladung	-
$T_s$	Temperatur	°C
$p_i$	Partialdruck	bar
$Q_{Bind}$	Bindungswärme	J
$Q_{Kond./ Verd.}$	Kondensationswärme/ Verdunstungswärme	J
$Q_{Sens}$	sensible Wärme	J
$Q_{gesamt}$	gesamte Wärme	J
$\psi$	Anteil des Gesamtvolumenanteils	-
$v$	experimentell untersuchtes spezifisches Volumen	$\frac{m^3}{kg}$
$d$	Durchmesser einer Kugel	mm
$m$	Masse einer Kugel	kg
$m_{Stangen}$	Gesamtmasse der Stangen	kg

$m_{spez,60x60}$	spezifische Masse der 60x60 Profilstangen	$\frac{kg}{m}$
$l_{gesamt,60x60}$	Gesamtlänge aller 60x60 Profilstangen	m
$m_{spez,30x30}$	Spezifische Masse der 30x30 Profilstangen	$\frac{kg}{m}$
$l_{gesamt,30x30}$	Gesamtlänge aller 30x30 Profilstangen	m
$\varphi$	Relative Feuchte	%
$\dot{m}_l$	Massenstrom der trockenen Luft	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{w,u}$	Massenstrom des Wassers am Eintritt	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{w,o}$	Massenstrom des Wassers am Austritt	$\frac{kg}{s}$
$m_{w,sp}$	Eingespeicherte Wassermasse	kg
$\dot{Q}_L$	Wärmestrom der trockenen Luft	W
$c_{p,l}$	Spezifisch Wärmekapazität von Luft	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
$\dot{Q}_w$	Wärmestrom vom Wasser	W
$c_{p,d}$	Spezifische Wärmekapazität vom Dampf	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
$\dot{Q}_{ges}$	Gesamter Wärmestrom	W
$Q$	Wärmemenge	J

# 1. Relevanz in der heutigen Zeit

Durch die von der Bundesregierung angesetzten Klimaziele, die einen Wechsel der Primärenergien von fossilen Energiequellen hin zu regenerativen Energiequellen wie z.B. Wind- oder Solarenergie vorsehen, gehen einige Herausforderungen einher. Dabei sind die konventionellen Energiequellen meist deterministisch. Sie stehen somit planbar zur Verfügung, anders gesagt ist es möglich, bei Bedarf eine gewünschte Energiemenge bereitzustellen. Bei der thermischen Energieversorgung wird immer mehr auf Solarenergie gesetzt. Bei der Solarenergie handelt es sich um ein volatiles Energiesystem, sie steht somit nicht planbar zur Verfügung. Beim Beispiel mit der Solarenergie heißt dies, wenn keine Sonne scheint, kann keine Energie gewonnen werden. Das ist vor allem bei der Wärmeversorgung eine große Herausforderung, da Angebot und Bedarf häufig nicht übereinstimmen. So herrscht im Sommer ein Überschuss an thermischer Energie, die allerdings nicht benötigt wird. Hingegen im Winter, wenn es deutlich kälter ist und gleichzeitig die Sonne weniger scheint, deutlich weniger thermische Energie zur Verfügung steht, diese aber, z.B. zum Heizen, dringend benötigt wird. Dieses Dilemma zwischen Verfügbarkeit der Solarwärme und Wärmebedarf wird in der Abbildung 1 verdeutlicht.

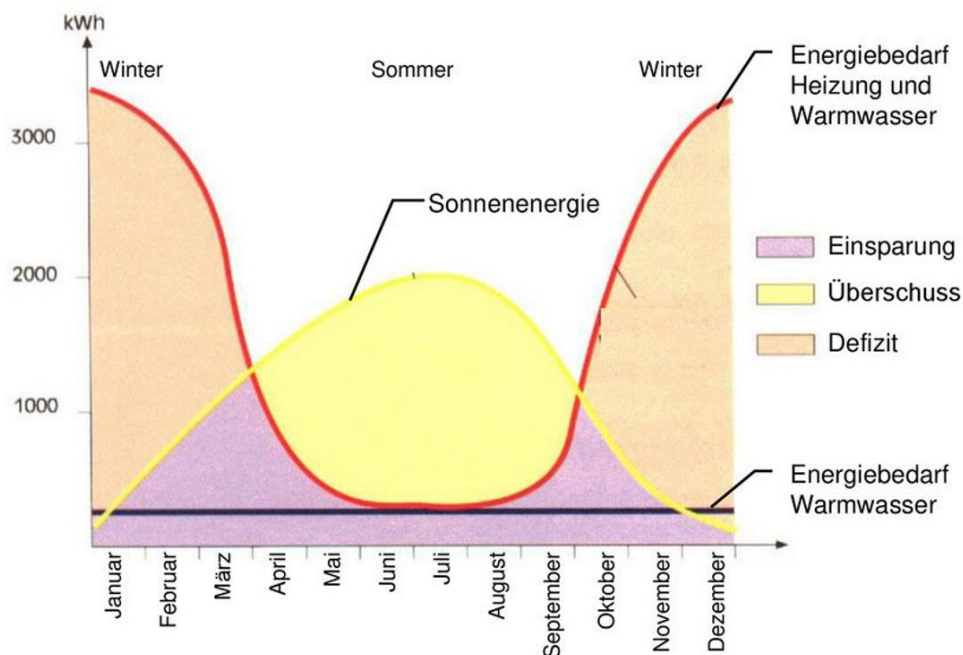


Abbildung 1: Verdeutlichung der zeitlichen Verschiebung von Angebot und Bedarf bei solarer Energie [1]

Dasselbe gilt auch für den Tag-Nacht Wechsel. Dabei steht tagsüber solare Energie zur Verfügung, wobei der private Energiebedarf zu dieser Zeitspanne allerdings geringer ist, da die Menschen dann in der Regel nicht zu Hause sind und es draußen wärmer ist als nachts. In der Nacht hingegen wird es kühler und da die Menschen zu Hause sind, wird die Wärmeenergie benötigt, allerdings steht nachts dann keine solare Energie zur Verfügung.

Eine Lösung für dieses Problem ist die Speicherung der thermischen Energie in thermischen Speichern. Diese Speicher füllen sich bei einem Energieüberfluss mit der nicht benötigten thermischen Energie und können diese bei einem Energiemangel wieder abgeben. Thermische Speicher spielen daher im Sinne der Energiewende eine immer wichtiger werdende Rolle und sind für die Umsetzung der Klimaziele nicht mehr wegzudenken.

Das Entwicklungspotential ist bei den herkömmlichen Speichermethoden wie z.B. bei den sensiblen Speichern nahezu ausgeschöpft und kommt schnell an ihre Grenzen. Die Sorptionsspeicher stehen hingegen noch am Anfang ihrer Entwicklung und haben durch ihre große Speicherdichte enormes Potential noch effizienter Energie speichern zu können. Es können Speicherdichten von 200 bis  $300 \frac{kWh}{m^3}$  erreicht werden [2].

## 2. Funktionsweise von Zeolithspeichern- Stand der Technik

Beschrieben wird hierbei die Funktionsweise des Versuchsstandes. Hierbei handelt es sich um einen offenen Sorptionsspeicher, der eine Verbindung mit Wasser und Zeolith eingeht.

Zeolith weist eine zu seinem Volumen große, poröse Oberfläche auf, in der sich die Wasserteilchen durch Adsorption anbinden. Wird das Zeolith nun mit kühler, feuchter Luft durchströmt, setzen sich die Wasserpartikel an der Oberfläche des Zeoliths ab. Dabei wird deren kinetische Energie in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben. Hierbei handelt es sich um einen exothermen Prozess. Dadurch wird Wärme an die Umgebung abgegeben. Der Speicher entleert sich. Somit wird aus der feuchtkalten Luft, die in den Speicher eindringt, warme, trockene Luft, welche aus dem Speicher herausströmt. Diese kann zum Beispiel zum Heizen verwendet werden. Die Funktionsweise wird in Abbildung 2 veranschaulicht dargestellt.

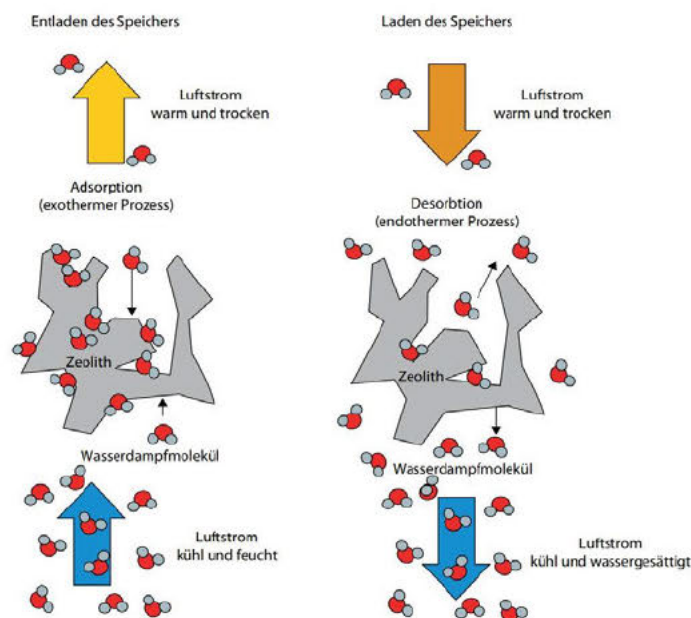


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Prozesses

Dieser Prozess ist reversibel. So werden beim Durchströmen des bereits entladenen Speichers mit warmer, trockener Luft die im Zeolith eingelagerten Wassermoleküle freigesetzt. Um dies möglich zu machen, benötigen die Wassermoleküle genügend Energie, um die herrschenden Bindungskräfte zu überwinden. Dies geschieht durch die Aufnahme von Wärme aus der warmen Luft. Man spricht dabei von Desorption. Somit strömt aus dem Wärmespeicher nun kühle, feuchte Luft. Dabei handelt es sich um einen endothermen Prozess, da Wärme aufgenommen wird. Der Speicher wird somit geladen und fungiert als Kühler.

Im Gegensatz zu den konventionellen thermischen Speichern, wie zum Beispiel bei den sensiblen Speichern, wobei ein Medium durch Wärmezufuhr erhitzt wird und nur durch eine möglichst gute Isolierung das Abkühlen des Mediums und somit das ungewollte Entladen



gering gehalten werden kann, wird bei Sorptionsspeichern die Wärmeenergie nicht in Form von Wärme gespeichert. Dadurch gibt es keine Wärmeabgabe an die Umgebung und somit besteht keine Gefahr des Abkühlens und keinen damit einhergehenden Wärmeverlust während der Speicherung. Das Zeolith kann nach dem Beladen auf Raumtemperatur abkühlen und dennoch seine gespeicherte Energie in Form von Wärme abgeben. Bei der Adsorption kann theoretisch so viel Energie freigesetzt werden, wie bei der Desorption eingespeichert wurde. Die einzigen Verluste, die dabei entstehen, sind die, die bei der Be- bzw. bei der Entladung in Form von Abwärme entstehen und das sensible Abkühlen des Speichermediums auf Umgebungstemperatur nach dem Ladevorgang. Somit ist eine verlustfreie Wärmespeicherung gewährleistet. Durch diese Besonderheit ist es möglich die gespeicherte Wärme auch nach sehr langer Zeit wieder abzugeben. Deshalb eignen sich Sorptionsspeicher besonders gut als Langzeit- oder Saisonspeicher. Die verlustfreie Speicherung bedingt allerdings eine trockene Lagerung unter Ausschluss jeglicher Feuchte.

Auch Latentwärmespeicher haben eine ähnliche Eigenschaft. Hierbei wird die Wärme ähnlich wie bei den sensiblen Speichern in Form von Wärme gespeichert. Dabei wird sich allerdings der Phasenübergang zunutze gemacht. Hierbei gibt es das Phänomen der Unterkühlung, wobei sich das Speichermedium unterhalb seiner Erstarrungstemperatur befindet und dennoch nicht erstarrt ist. Das Speichermedium besitzt im unterkühlten Zustand noch immer seine latente Wärmeenergie. Darauf wird aber in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

## 2.1. Begriffserklärung

Um eine eindeutige inhaltliche Zuordnung von einigen im Laufe dieser Arbeit öfter verwendeten Fachbegriffen gewährleisten zu können, werden im Folgenden einige wichtige Begriffe kurz erläutert:

### **Adsorptiv**

Als Adsorptiv werden die noch nicht adsorbierten Moleküle bezeichnet. Am Beispiel von Zeolithspeichern ist dies das nicht adsorbierte Wasser. [3]

### **Adsorbens**

Hierbei handelt es sich um ein Feststoff, an diesen sich die zu adsorbierenden Teilchen (das Adsorptiv) binden können. Beim Zeolithspeicher ist dies das Zeolith. [3]

### **Adsorpt**

Als Adsorpt werden die Moleküle bezeichnet, welche vom Adsorbens adsorbiert worden sind. Am Beispiel von Zeolithspeichern ist dies das bereits vom Zeolith aufgenommene Wasser. [3]

## **Adsorbat**

Das Adsorbat setzt sich aus Adsorbens und Adsorpt zusammen und beschreibt die kombinierte Form aus beiden Komponenten. Beim Beispiel von Wasser und Zeolith ist dies der Zusammenschluss aus dem absorbiertem Wasser und dem Zeolith. [3]

## **Sorption**

Sorption ist der Oberbegriff von Adsorption und Absorption und bezeichnet die Anlagerung von Stoffen an einem anderen Stoff. Auf Absorption und Adsorption wird im folgenden Kapitel 2.2 noch ausführlicher eingegangen.

## **Desorption**

Die Desorption beschreibt den umgekehrten Prozess der Sorption und bezeichnet die Abgabe von Teilchen aus einem anderen Stoff an die Umgebung.

## **Absorption**

Anders als bei der Adsorption werden bei der Absorption die Teilchen nicht an der Oberfläche eines Festkörpers gebunden, sondern im Inneren des Feststoffes aufgenommen. Also eine Aufnahme von Teilchen durch die Oberfläche ins Innere des Festkörpers. Dabei kann es sich auch um eine Flüssigkeit handeln.

Auch wenn es bei Zeolithspeichern zum Transport von Wasser, durch das Porensystem, ins Innere des Zeoliths kommt, handelt es sich hierbei dennoch um ein Adsorptionsprozess, da das Wasser dabei nicht die Oberfläche des Zeoliths durchdringt und somit nicht absorbiert wird. Das Porensystem ist somit Teil der Oberfläche des Zeoliths. [3]

## 2.2. Adsorption

Adsorption bezeichnet die Anhaftung von Partikeln in flüssigem oder gasförmigem Zustand an der Oberfläche eines Festkörpers. Dabei wird generell in zwei Arten von Adsorption unterschieden: Die Chemisorption und die Physisorption.

### 2.2.1. Physisorption

Bei der Physisorption handelt es sich um einen physikalischen Prozess. Hierbei gehen die Teilchen strenggenommen keine richtigen Bindungen miteinander ein, sondern stehen vielmehr in einer gewissen Wechselwirkung zueinander. Dennoch ist in der Literatur oft die Rede von einer Bindung, weshalb in dieser Arbeit auch nicht klar zwischen einer Wechselwirkung und einer Bindung unterschieden wird.

In der Physisorption werden die Teilchen durch elektrostatische Kräfte an der Oberfläche des Adsorbens gehalten. (Diese Bindungen werden in der Abbildung 3 durch drei übereinander liegende Striche dargestellt.) Dies ist auf die unterschiedlichen Ladungen zurückzuführen. Dabei kommt es zu keiner Veränderung der chemischen Struktur des Adsorbens. Durch die relative schwachen Bindungskräfte ist dieser Prozess reversibel und kann somit leicht rückgängig gemacht werden. Es können Bindungsenergien von rund  $50 \frac{kJ}{mol}$  erreicht werden. Die Moleküle können sich hierbei auch in mehreren Schichten übereinander anlagern, so dass ein Adsorptiv nicht direkt an dem Adsorbens adsorbiert wird, sondern sich, durch die unterschiedlichen Ladungen, an einem bereits adsorbierten Adsorptiv anbindet. Dies wird in der Abbildung 4 auf der rechten Seite dargestellt und in Kapitel 2.3.1 nochmal vertieft.

Die Physisorption ist die vorherrschende Bindungsform, die bei Zeolithspeichern und auch bei anderen Sorptionsspeichern herrscht. Deshalb wird im Folgenden ausführlich darauf eingegangen. Das Augenmerk liegt dabei auf der Bindung von Wasser und Zeolith [4]

Wasser besteht, bekannterweise aus einem Sauerstoff-Atom und zwei Wasserstoffatomen. Da die Elektronegativität von Sauerstoff (mit 3,44) höher ist als die von Wasserstoff (mit 2,20) werden die Elektronen der Wasserstoffatome näher an das Sauerstoffatom gezogen. Somit befinden sich an der Sauerstoffseite mehr Elektronen als an den Wasserstoffseiten. Folglich stellt sich eine negative Ladung an der Sauerstoffseite ein (hier rot dargestellt) und an der Wasserstoffseite eine positive Ladung (hier blau dargestellt). Dadurch weist Wasser zwei unterschiedlich geladene Seiten auf, eine positive und eine negative Seite. Man spricht dabei auch von den polaren Eigenschaften des Wassers. Dies wird in der Abbildung 3 veranschaulicht.

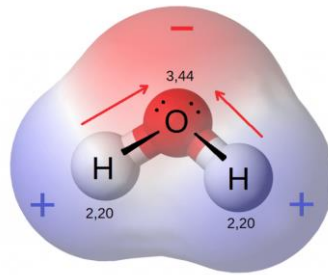


Abbildung 3: Darstellung Polarität von Wasser

Hydrophiler Zeolith hat hingegen eine leicht negativ geladene Oberfläche, weshalb die positiv geladene Seite von Wasser eine Wechselwirkung mit dem Zeolith eingeht und somit an der Oberfläche des Zeoliths adsorbiert wird. Dabei wird Adsorptionsenergie freigesetzt. Die Wasserteilchen werden dadurch an der Oberfläche „gebunden“ und können sich auf der Oberfläche frei bewegen (siehe Abbildung 4). Durch Diffusionsvorgänge werden die adsorbierten Wasserteilchen durch das Porensystem ins Innere des Zeoliths gefördert.

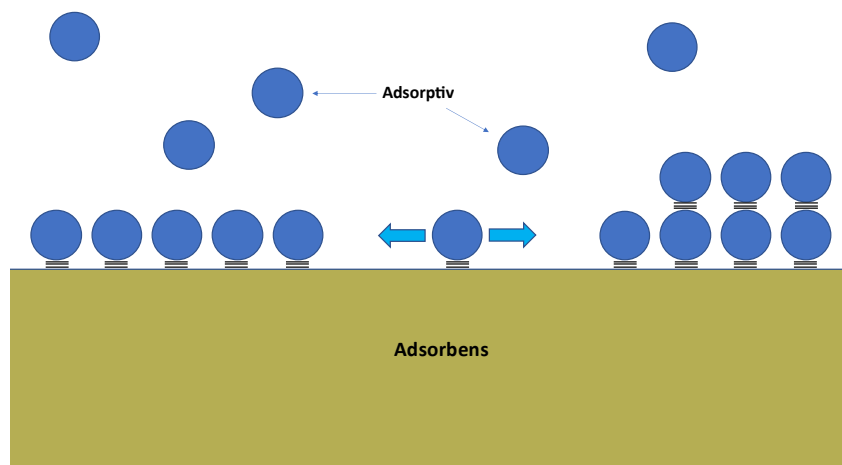


Abbildung 4: Schematische Darstellung der physikalischen Adsorption

Hierbei wird das Wasser, welches sich in gasförmiger Form in der Luft befindet, vom Adsorbens adsorbiert, gleichzeitig kondensiert und in das Innere des Adsorbens diffundiert. Diese beiden Vorgänge sind voneinander nicht klar trennbar und finden teilweise im Inneren des Adsorbens statt. Dabei wird zum einen die Adsorptionsenergie und zum anderen die Kondensationsenergie in Form von Wärme freigesetzt. Die frei werdende Adsorptionswärme setzt sich aus der Bindungswärme  $Q_{Bind}$ , Kondensationswärme bzw. Verdampfungswärme  $Q_{Kond./Verd.}$  und der sensiblen Wärme  $Q_{Sens}$  zusammen. Analog dazu geschieht auch der Desorptionsvorgang. Dabei muss die Adsorptionsenergie überwunden und das Wasser verdampft werden. Somit setzt sich die benötigte Desorptionswärme aus der Wärme zur Überwindung der Bindungskräfte, der Wärme die für die Verdampfung benötigt wird und der

Wärme zur sensiblen Erwärmung des Zeoliths und des Wassers zusammen. [4] [3] Es gilt somit folgender Zusammenhang:

$$Q_{gesamt} = Q_{Bind} + Q_{Kond./Verd.} + Q_{Sens} \quad (2.1)$$

### 2.2.2. Chemisorption

Bei der Chemisorption binden sich Teilchen an die Oberfläche des Adsorbens. Dabei wird das Adsorptiv durch chemische Bindungskräfte am Adsorbens gebunden. Somit erfolgt diese Bindung, bei der Chemisorption, durch einen Elektronenübergang. Es kommt zu einer Veränderung der chemischen Struktur des Adsorbens.

Chemische Bindungen sind deutlich stärker als physikalische Bindungen und weisen daher auch eine deutlich größere Adsorptionsenthalpie auf. Diese liegt zwischen  $200-400 \frac{kJ}{mol}$ . Somit kann deutlich mehr Wärme durch die chemische Adsorption bereitgestellt werden als von der physikalischen Adsorption. Durch die stärkeren Bindungskräfte ist jedoch die Desorption oft nicht möglich oder mit einem deutlich größeren Energieaufwand verbunden als bei der Physisorption und dadurch schwerer technisch umzusetzen.

Das Adsorptiv kann sich hierbei nur an dem Adsorbens binden und somit nicht, wie bei der physikalischen Adsorption, in mehreren Schichten übereinander ans Adsorbens. Somit besteht immer eine direkte Verbindung zwischen Adsorptiv und Adsorbens und die Beladung ist begrenzt auf die Oberfläche des Adsorbens begrenzt.

Da die chemische Adsorption bei Zeolithspeichern keine große Rolle spielt, wird im Weiteren nicht darauf eingegangen. [3]

### 2.3. Thermodynamik in der Adsorption

Ein Sorptionsprozess kann als Streben eines Gleichgewichtszustandes zwischen der Temperatur, dem Druck und der Beladung beschrieben werden. Dabei kommt es bei einer Veränderung der genannten Variablen zur Adsorption bzw. Desorption und somit zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes. Dieses Gleichgewicht kann in einer Isothermen, einer Isostere und einer Isobaren dargestellt werden (siehe Abbildung 5).

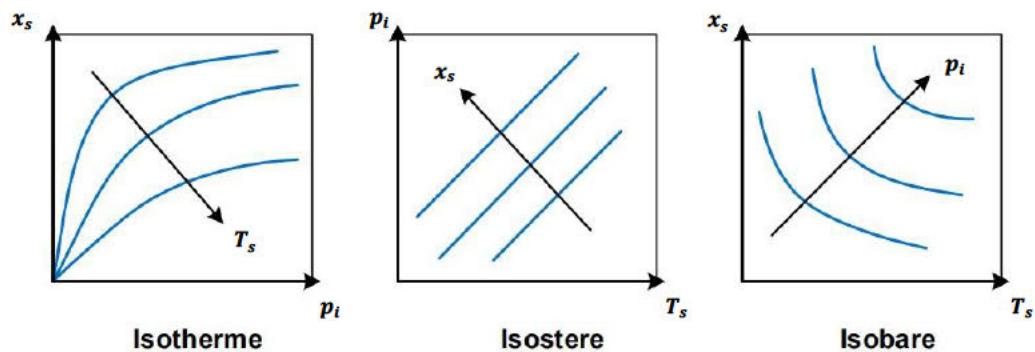


Abbildung 5: Darstellung des Thermodynamischen Gleichgewichts [2]

Bei der Isotherme wird der Zusammenhang der Beladung  $x_s$  und Partialdruck  $p_i$  bei konstanter Temperatur wiedergegeben. Die Isothermen beschreiben dabei die Linien gleicher Temperatur. Bei der Isostere wird der Zusammenhang des Partialdrucks mit der Temperatur beschrieben. Die Isoteren beschreiben dabei die Linien gleicher Beladung. Bei der Isobaren wird der Zusammenhang zwischen der Beladung und der Temperatur bei konstantem Partialdruck beschrieben. Dabei sind die Isobaren die Linien gleichen Drucks.

Durch diese Betrachtung wird die Einflussnahme von Druck und Temperatur auf den Sorptionsprozess verdeutlicht. Somit nimmt die Beladung bei höheren Temperaturen und konstantem Partialdruck ab. Bei konstanter Temperatur und größer werden dem Partialdruck nimmt die Beladung wiederum zu. [3]

Es gilt somit folgende Beschreibung:

$$x_s = f(T_s, p_i) \quad (2.2)$$

### 2.3.1. Isotherme der Adsorption

Um einen Adsorptionsprozess beschreiben und klassifizieren zu können wird klassischerweise eine Isotherme verwendet. Durch den Verlauf der Isothermen können Rückschlüsse über die Wechselwirkung des Adsorptivs und des Adsorbens geschlossen werden. Auch eine Aussage über die Porenstruktur des Adsorbens ist möglich. Diese Isotherme beschreibt den Verlauf des Adsorptionsprozesses und gibt dabei diesen als Adsorptionsbeladung  $\left(\frac{\text{kg}_{\text{Adsorpt}}}{\text{kg}_{\text{Adsorbens}}}\right)$  über den Partialdruck  $p_A$  des Adsorptivs an. Die Temperatur wird währenddessen konstant gehalten (Isotherm) und der Partialdruck von null bis zum Sättigungsdampfdruck erhöht. Die Adsorptionsisothermen werden dabei in fünf Standardtypen eingeteilt, diese werden im Folgenden beschrieben.

Bei der **ersten dieser Standardformen** handelt es sich um einen hydrophilen Adsorptionsprozess. Dabei wird das Adsorptiv an der Oberfläche des Adsorbens adsorbiert. Die freien Plätze auf dem Adsorbens werden mit zunehmender Beladung geringer. Somit stellt sich im Verlauf der Isothermen eine immer geringer werdende Steigung ein (siehe Abbildung 6). Sobald die Steigung der Isothermen null beträgt, ist die maximale Beladung erreicht und das Adsorbens kann keine Moleküle mehr aufnehmen. [3]

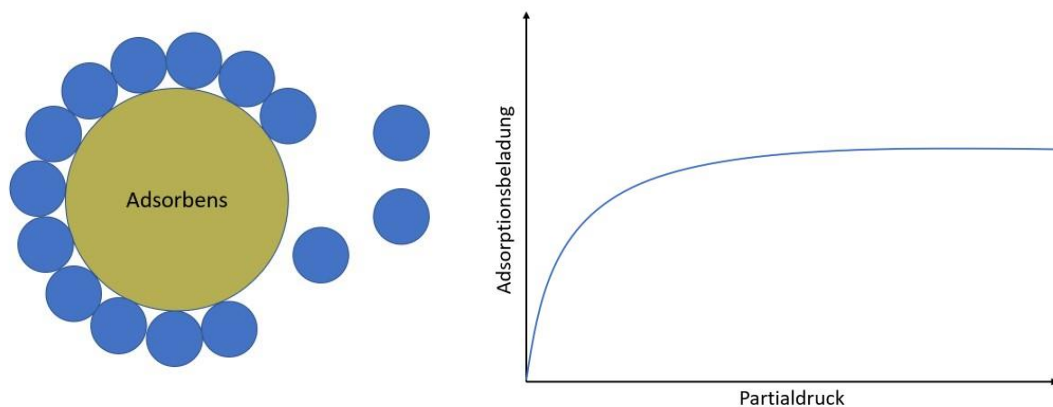


Abbildung 6: Schematische Darstellung der ersten Standardtype [3]

Bei der **zweiten Standardform** kann das Adsorptiv in mehreren Lagen adsorbiert werden. Dabei spricht man auch von einer multilaren Adsorption. Es stellt sich anfangs der von der ersten Standardform bekannte Verlauf, durch die Bildung einer Monoschicht, ein. Mit zunehmendem Partialdruck kommt es dann zur Adsorption des Adsorptivs auf dem bereits adsorbierten Adsorptiv, dem Adsorpt, und somit zur Beladung einer weiteren Schicht. Es kommt zur Bildung der zuvor erwähnten Multilaren Adsorption. Der Beginn der Beladung der

Multilare Adsorption ist in der Isothermen am Wendepunkt (Punkt 1 in Abbildung 7) zu erkennen. Dabei kommt es teilweise zur Überlappung der Monoschicht-Adsorption und der Mehrschichtigen-Adsorption. Diese Überlappungen spiegeln sich in der Isothermen wider. Somit ist der Übergang bei Adsorptionsprozessen mit einer geringen Überlappungen in der Isothermen deutlich ausgeprägter und es zeigt sich ein deutlich zu erkennender Wendepunkt ab. Hierbei verliert die Adsorptionskraft mit zunehmender Entfernung an Kraft. Es können somit nicht unbegrenzt viele Schichten adsorbiert werden und die Schichten verlieren ab einer bestimmten Entfernung an Stabilität. [3]

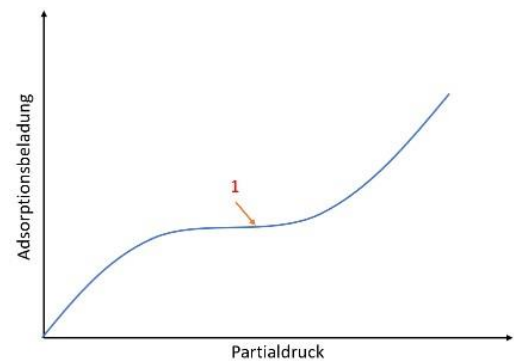
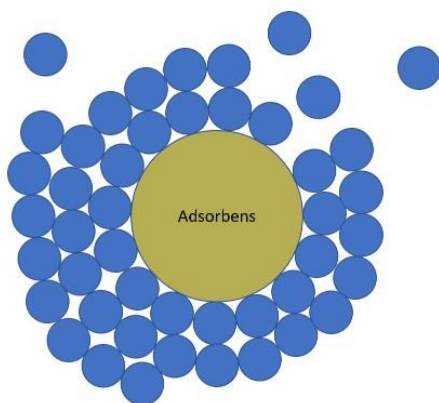


Abbildung 7: Schematische Darstellung der zweiten Standardtype [3]

Bei der **dritten Standardgruppe** kommt es zur Adsorption von mehreren Schichten, bevor sich die erste Schicht voll ausgebildet hat. Dies ist dann der Fall, wenn das Adsorbens deutlich unpolare Eigenschaften aufweist als das Adsorptiv und somit das Adsorptiv eine stärkere Tendenz aufweist sich an das bereits adsorbierte Adsorptiv zu binden als ans Adsorbat selbst. Dieses Verhalten kann als hydrophobes Verhalten bezeichnet werden. Somit ergibt sich ein stetig steigender isobarer Verlauf, wie in der Abbildung 8 zu sehen ist. Bei diesem Verlauf kommt es nicht zu einer Sättigung des Adsorbats, da die Bindungen vom Adsorptiv ausgehen. [3]



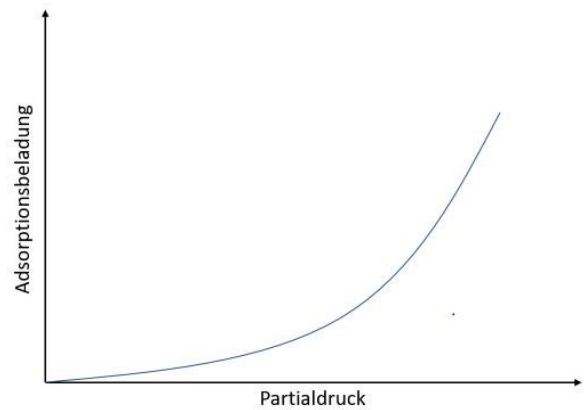
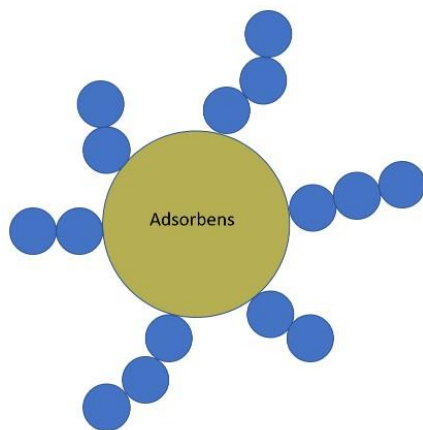


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Adsorption bei der dritten Standardgruppe [3]

Bei der **vierten Standardgruppe** handelt es sich um eine kapillare Form der Adsorption. Hierbei bildet sich, analog zur ersten Standardgruppe, eine erste Schicht des Adsorpt an dem Adsorbens. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, hat die Isotherme somit bis zum Punkt 1 einen Verlauf, der den Verlauf der Isothermen in der ersten Standardgruppe entspricht. Mit steigendem Partialdruck kommt es ab dem Punkt 1 zu einer Kondensierung des Adsorpt in die Poren des Adsorbens und gleichzeitig zur Bildung von mehreren Schichten. Das besondere hierbei ist, dass es beim Vergleich von Adsorption und Desorption zu einer Bildung einer Hysterese kommt. Darauf wird in Kapitel 2.3.2 noch genauer eingegangen. [3]

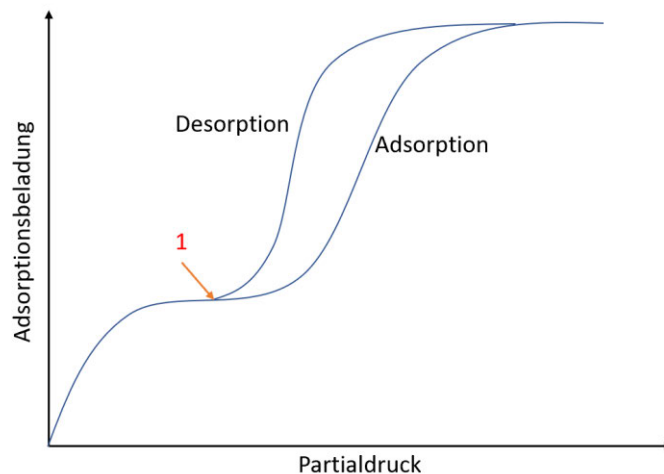


Abbildung 9: Schematische Isotherme Darstellung der vierten Standardtype [3]

Die **fünfte Standardgruppe** ähnelt mit Ihrem Aufbau der dritten Standardgruppe. Dabei handelt es sich aber auch um eine kapillare Adsorption wie es in der vierten Standardgruppe beschrieben worden ist. Das Adsorptiv setzt sich dabei aber nicht direkt an das Adsorbens, sondern gelangt direkt in die Poren des Adsorbens (siehe Abbildung 10). [3]

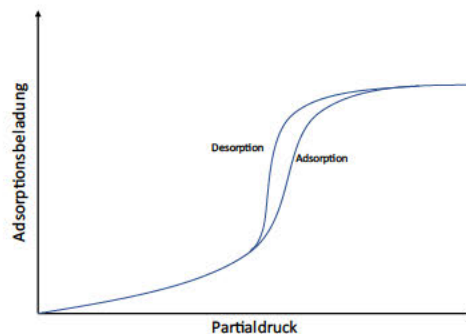


Abbildung 10: Schematische Isotherme Darstellung der fünften Standardtype [3]

### 2.3.2. Hysterese einer Adsorption

Wie schon im Kapitel 2.3.1 erwähnt, kann es im isothermen Verlauf zwischen der Adsorption und der Desorption bei kapillaren Strukturen zu einer Bildung einer Hysterese kommen. Dabei wird Bezug auf die zuvor erwähnte vierte und fünfte Standardgruppe genommen. Unter einer Hysterese wird dabei ein System verstanden, welches zwischen zwei Zuständen pendelt, dabei aber nicht denselben Weg einschlägt. Im Zuge eines Sorptionsprozesses heißt dies, dass bei der Adsorption oder bei der Desorption eine Verzögerung entsteht. Die Bildung einer ausgeprägten Hysterese ist in vielen technischen Anwendungen unerwünscht.

### 2.3.3. Entstehung einer Hysterese

Es werden drei Modelle zur Entstehung einer Hysterese aufgeführt.

Bei dem Tintenflaschenmodell kommt es wegen einer flaschenartigen Verjüngung (3) an der Porenöffnung zur Entstehung einer Hysterese. Dieses Tintenflaschenmodell kann in drei Teile eingeteilt werden. Dem Kanal (1) an dem sich die kleineren Poren anbinden, die Flaschenporen (2) und die Flaschenhalsporen (3) die die Poren mit dem Kanal (1) verbinden (siehe Abbildung 11).

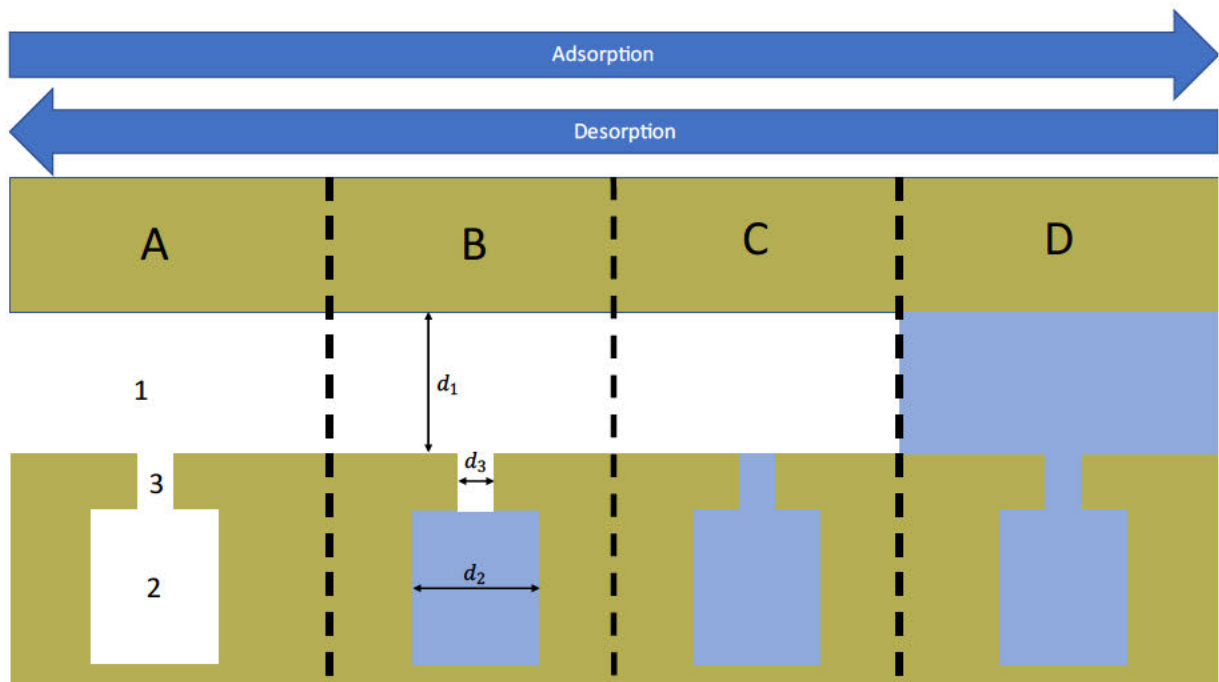


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Tintenflaschenmodells [5]

Dabei ist der Durchmesser  $d_1$  des Kanals am größten und der Durchmesser  $d_3$  der Flaschenhalssporen am geringsten. Die Durchmesser stehen somit im folgenden Verhältnis zueinander.

$$d_3 < d_2 < d_1 \quad (2.3)$$

Es ergibt sich somit eine Engstelle zwischen dem Kanal und der Pore.

Bei der Adsorption kondensiert das Adsorptiv, nach diesem Modell, zuerst in den Poren (B) anschließend in dem Flaschenhals (C) und als letztes im Kanal (D). Dabei muss das Adsorptiv erst einmal die besagte Engstelle durchqueren. Gleichzeitig muss die in der Pore befindliche Luft die Möglichkeit haben zu entweichen. In diesem Modell wird angenommen, dass dies hinreichend schnell geschieht und daher zu vernachlässigen ist. Die Desorption geschieht in umgekehrter Reihenfolge. So wird zuerst der Kanal entleert, anschließend der Porenhals und zuletzt die Pore an sich (siehe Abbildung 11). Dabei wird die Hysterese durch die Energiebarriere aufgrund der Oberflächenkräfte erzeugt. Um dies genauer nachzuvollziehen können die Abbildungen 11 und 12 herangezogen werden. Durch die stärkere kapillare Sogwirkung werden Poren mit kleineren Durchmessern bevorzugt vom Adsorptiv besetzt und gleichzeitig auch bei der Desorption als letztes desorbiert. Hierbei wird der Verlauf von verschiedenen relativen Feuchtigkeiten als lineare Funktion der abgegebenen Energien über der Beladung dargestellt. Bei diesem Prozess stellen sich stabile und metastabile Zustände ein, die sich jeweils bei den globalen bzw. lokalen Minima einstellen. Die verschiedenen Teile des



Tintenflaschenmodells sind an den unterschiedlichen Steigungen zu erkennen (siehe Abbildung 12). [5]

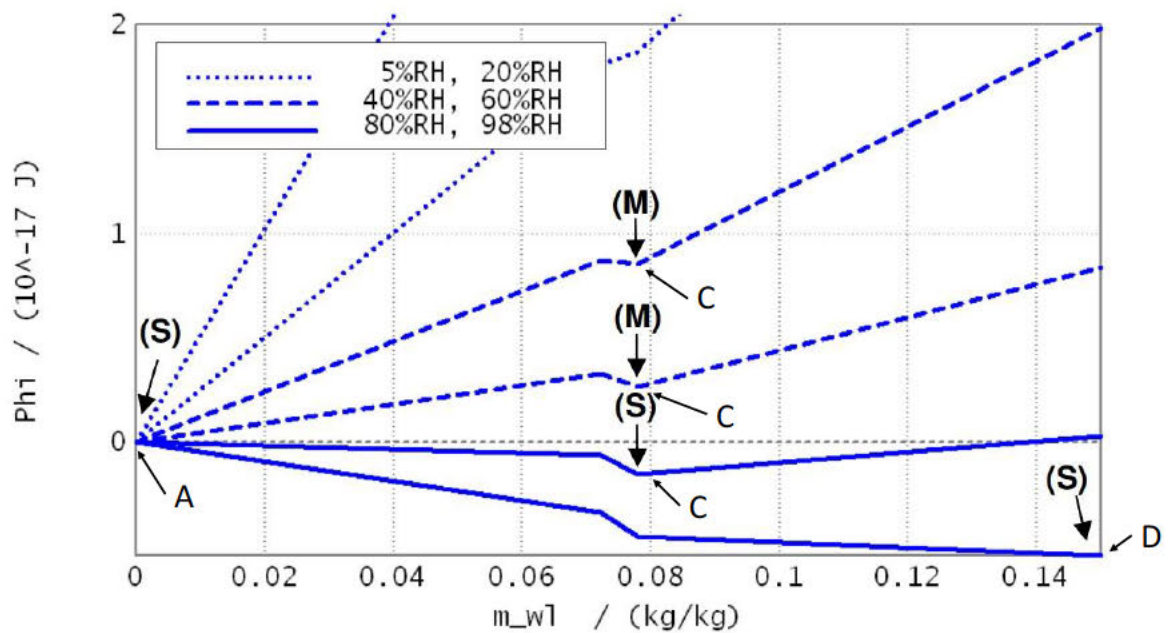


Abbildung 12: Grafische Beschreibung des Sorptionsvorgangs nach dem Tintenflaschenmodell [5]

Der Adsorptionsvorgang beginnt in diesem Beispiel bei einer Beladung von  $0 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$  und einer Luftfeuchtigkeit von 0% (A). Dabei befindet es sich in einem stabilen Zustand und die Poren des Adsorbens sind nicht besetzt. Steigt nun der Feuchtigkeitsgehalt auf einen ungefähren Wert von 76% kommt es zum Erreichen des nächsten stabilen Zustands (C). Hierbei füllen sich die Poren und auch der Porenhals vollständig. Um nun auch noch den Kanal zu befüllen, benötigt es einen noch größeren Feuchtegehalt. Bei einem Feuchtegehalt von ungefähr 92% kommt es zur Auskondensation in den Kanälen (D) und somit zum Erreichen eines weiteren stabilen Zustands. Das System ist gesättigt. [5]

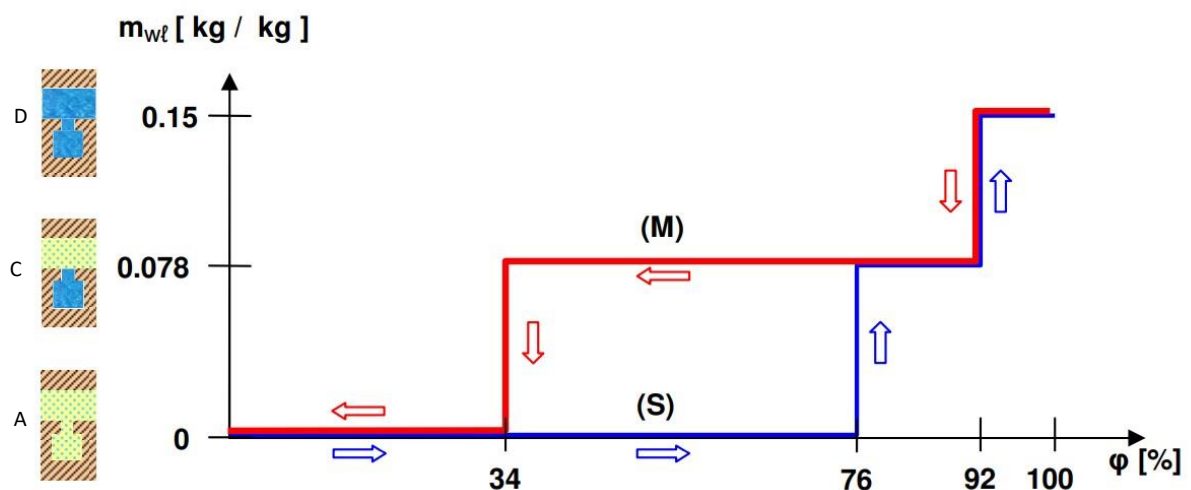


Abbildung 13: Darstellung der Hysterese nach dem Tintenflaschenmodell [5]

Bei der Desorption wird als Ausgangszustand der gesättigte Zustand betrachtet (III; D). Hierbei befindet sich das System in einem stabilen Zustand. Sinkt nun der Feuchtegehalt auf unter 92% kommt es zur Entleerung des Adsorptivs im Kanal und ein weiterer stabiler Zustand wird erreicht (C). Wird nun der Feuchtegehalt auf unter 76% abgesenkt stellt sich ein metastabiler Zustand ein. Dabei reicht die geringe Feuchtigkeit aus, um das in den Poren befindliche Adsorptiv zu desorbieren, allerdings reicht sie nicht aus um das in dem Flaschenhals befindliche Adsorptiv zu desorbieren. Somit kommt es durch das adsorbierte Adsorptiv im Flaschenhals zu einem Verschluss der Poren. Es entsteht dadurch eine Verzögerung im Desorptionsprozess, der die Hysterese bedingt. Dieser metastabile Zustand erstreckt sich bis zu einem Feuchtegehalt von 34%. Ab diesem Feuchtegehalt beginnt die Desorption im Flaschenhals, der Verschluss ist entfernt und auch das in den Poren befindliche Adsorptiv kann nun durch den Flaschenhals freigesetzt werden. Es stellt sich eine Beladung von  $0 \frac{kg}{kg}$  ein (A). [5]

Eine weitere Erklärung zur Entstehung einer Hysterese ist die, dass sich beim Bilden von einer geschlossenen Pore mit immer größer werdendem Durchmesser die Seite mit dem kleineren Durchmesser, wegen der größeren kapillaren Saugwirkung, zuerst gefüllt wird. Dort bildet sich ein Meniskus, der sich von dort ausbreitet. Durch die raue Oberfläche gibt es eine gewisse Barriere, die überwunden werden muss. Dies kann vereinfacht als eine Art „Reibung“ angesehen werden, die dem Ausbreiten des Meniskus entgegengerichtet ist und überwunden werden muss. Dadurch kommt es diesmal zu einer Verzögerung im Adsorptionsprozess und somit zur Entstehung einer Hysterese. [5]

Bei dem beidseitig geöffnetem Porenmodell bildet sich bei der Adsorption zu Beginn ein leichter Film in den Poren, der mit zunehmender Beladung immer dicker wird. Dadurch ist bereits ein großer Teil der Poren gefüllt, bevor es überhaupt zur Bildung des Meniskus

kommen kann. Bei der Desorption hingegen bildet sich der Meniskus gleichmäßig zurück und es kann eine gleichmäßige Desorption stattfinden. Dies wird in der Abbildung 14 veranschaulicht. [5]

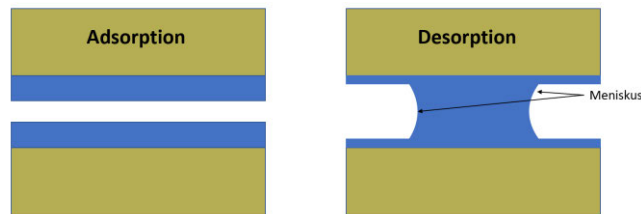


Abbildung 14: Veranschaulichung der Entstehung einer Hysterese bei beidseitig geöffneten Poren [5]

Der Unterschied zwischen dem Tintenflaschenmodell und den beiden anderen Modellen (beidseitig geöffneten Porenmodell und Modell mit geschlossener Pore mit immer größer werdendem Durchmesser) ist der Zeitpunkt der Verzögerung. Somit findet beim Tintenflaschenmodell die Verzögerung bei der Desorption statt. Bei den beiden anderen Modellen findet die Verzögerung bei der Adsorption statt. Dadurch ergeben sich zwei völlig unterschiedliche Begründungen zu Bildung einer Hysterese. [3]

#### 2.3.4. Beeinflussung der Hysterese

Der Verlauf der Hysterese kann viel über den Sorptionsprozess verraten.

Das Verschwinden einer Hysterese ist dabei ein schlechtes Zeichen. Dadurch kann nämlich die bei der Adsorption freigesetzte Energie negativ beeinflusst werden. Das Verschwinden der Hysterese kann verschiedene Gründe haben:

- Durch Belegung der Poren können die Eigenschaften des Sorptionsprozesses verändert werden und somit kann es zum Verschwinden der Hysterese kommen. Als Beispiel ist das verstopfte Flaschenhalsmodell zu erwähnen, welches nicht mehr in der Lage ist ein Adsorptiv aufzunehmen.
- Durch das Verschwinden von Verunreinigungen können einige Poren, die zuvor belegt waren, nun wieder voll beansprucht werden.
- Durch den Einsatz von Adsorptiv, welches mit dem Adsorbens reagiert und somit seine Porenstruktur beeinträchtigt.
- Durch die Vortäuschung des Verschwindens der Hysterese, indem nicht der ganze Partialdruckbereich untersucht wird. Dabei können durch Lade- und Entladezyklen, Poren, welche zuvor durch Verunreinigungen verstopft waren, freigespült werden. Dadurch kann sich der Partialdruckbereich, in dem sich die Hysterese bildet, verschieben.

Um dem Verschwinden einer Hysterese entgegenzuwirken, sind mögliche Lösungen für dieses Problem den Prozess, wenn möglich, in einem anderen Partialdruckbereich arbeiten zu lassen oder aber das Adsorbens durch ein anderes für diesen Prozess geeignetes Adsorbens zu ersetzen. Die einfachste Lösung ist allerdings bei der Desorption mehr Energie zuzuführen und somit den verzögerten Desorptionsprozess zu beschleunigen. Dabei kann die Temperatur erhöht werden oder aber der Partialdruck verringert werden. [6]

## 2.4. Offene Systeme

Sorptionsvorgänge können in offene Systeme und geschlossene Systeme eingeteilt werden. In den offenen Systemen geschieht der Sorptionsprozess bei Umgebungsdruck. Dabei wird in der Regel ein Trägermedium verwendet, welches durchs Adsorbens strömt. Dieses Trägermedium dient dazu das Adsorptiv, bei der Adsorption, zum Adsorbens zu transportieren und gleichzeitig die dabei entstandene Wärme abzutransportieren. Bei der Desorption hingegen wird das Trägermedium dazu verwendet, um die Wärme zum Adsorbens zu transportieren und gleichzeitig das desorbierte Wasser und die abgekühlte Luft abzutransportieren. [7] Bei dem Versuchsstand handelt es sich um ein solches offenes System.

## 2.5. Geschlossene Systeme

Aus Gründen der Vollständigkeit wird hier noch kurz auf die geschlossenen Adsorptionssysteme eingegangen.

Bei den geschlossenen Systemen wird das Adsorbens und das Adsorptiv gasdicht abgeschlossen. Dabei befindet sich im System nur noch das Adsorbens und das Adsorptiv. Der Partialdruck ist dabei gleich dem Absolutdruck und kann frei eingestellt werden. In der Abbildung 15 ist ein solches System schematisch dargestellt.

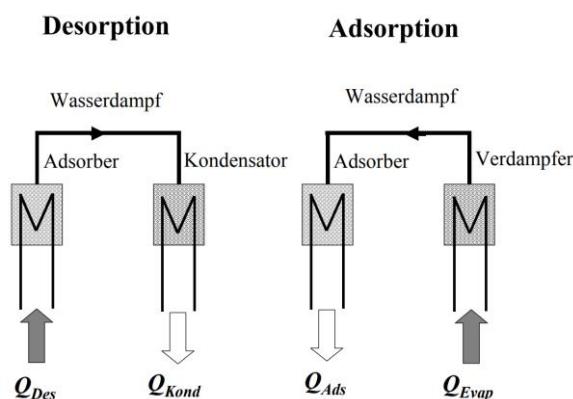


Abbildung 15: Darstellung der Funktionsweise von geschlossenen Systemen [8]

Bei der Desorption wird Wärme dem Adsorber zugeführt. Dabei löst sich das aufgenommene Adsorptiv und wird im Kondensator kondensiert, wobei die Kondensationswärme freigesetzt wird. Die Adsorption geschieht hierbei in umgekehrter Reihenfolge. Wie auch beim offenen System ist ein Kühlprozess genauso gut möglich wie die Bereitstellung von Wärme.

Eine Verwendung als Absorptionswärmepumpe oder Kältemaschine ist durchaus denkbar. Ein weiteres Anwendungsbeispiel hierfür sind selbstkühlende Bierfässer. Dabei befindet sich das Zeolith im Wandbereich des Fasses und nimmt bei der Aktivierung die Wärme des Bieres auf, wodurch dieses gekühlt wird. [7] [8]

## 2.6. Adsorbens

Um möglichst viel Wasser aufnehmen zu können und somit viel Adsorptionsenergie freisetzen zu können, benötigt es eine möglichst große Oberfläche. Dies wird durch eine Porenstruktur erreicht. Dabei werden die Poren in verschiedene Porengrößen eingeteilt:

- Makroporen mit einem Durchmesser von 50nm
- Mesoporen mit einem Durchmesser von 2 bis 50nm
- Mikroporen mit einem Durchmesser von < 2nm

Der Anteil des Gesamtholraumes eines Adsorbens in einer Kugelform kann dabei durch die Pelletporosität  $\psi$  beschrieben werden. Sie kann zur Qualifizierung von Adsorbentien herangezogen werden und wird wie folgt berechnet:

$$\psi = \frac{v \cdot m}{\frac{1}{6} \pi \cdot d^3} \quad (2.4)$$

Dabei ist  $v$  das experimentell untersuchte spezifische Volumen der Hohlräume einer Kugel,  $m$  die Masse einer Kugel und  $d$  der Durchmesser einer Kugel. [7]

Von technischer Relevanz sind im Wesentlichen drei Adsorbentien: Silicagel, Aktivkohle und Zeolith. Aktivkohle eignet sich dabei zur Aufnahme von Wasserdampf nur schlecht und findet meist Anwendung bei der Filterung. Deshalb wird in dieser Ausarbeitung nicht weiter darauf eingegangen. [7]



### 2.6.1. Zeolith

Zeolith ist ein in der Natur vorkommendes Gestein, welches aus erkaltetem Vulkangestein gewonnen wird. Es kann aber auch synthetisch hergestellt werden. Hierbei handelt es sich um einen Festkörper, der durch seine kristalline Gitterstruktur eine große innere Oberfläche aufweist.

Chemisch besteht Zeolith aus Aluminium-, Silicium- und Sauerstoff-Atomen. Hierbei verbinden sich sowohl die Aluminium-Atome als auch die Silicium-Atome mit vier Sauerstoffatomen. Diese Silicium- Sauerstoff bzw. Aluminium-Sauerstoffverbindungen ( $SiO_4$  und  $AlO_4$ ) weisen eine tetraederförmige Struktur auf und werden Primärbauereinheiten genannt. Dies wird in der Abbildung 16 verdeutlicht.

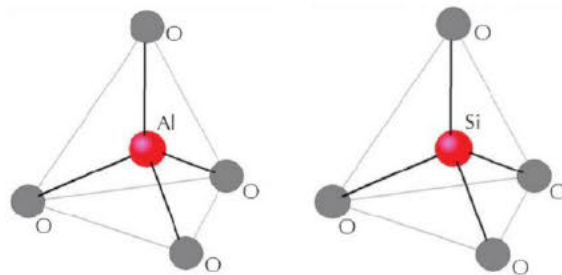


Abbildung 16: Darstellung der Primärbauereinheiten [9]

Die Primärbauereinheiten teilen sich jeweils ein Sauerstoffatom mit einer weiteren Primärbauereinheit und bilden dabei eine Gitterstruktur. Zur Unterscheidung dieser Gitterstrukturen eignet sich das secondary building units (kurz SBUs), auf deutsch Sekundäre Baueinheiten. Dabei werden die Primärbauereinheiten als Punkte veranschaulicht und die Sauerstoffatome, welche die einzelnen Primärbauereinheiten miteinander verbinden, als Striche dargestellt. Hierbei gibt es verschiedene Formen, die angenommen werden können. Ein Überblick über die für Zeolith relevanten Formen verschafft Abbildung 17. Im Anhang sind noch weitere Formen zu find, darauf wird aber nicht weiter eingegangen.

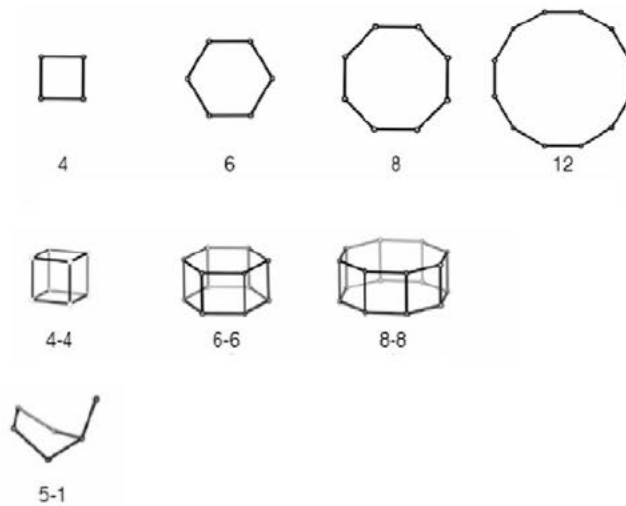


Abbildung 17: Darstellung verschiedener SBUs [10]

Aus mehreren SBUs setzen sich dann Käfige zusammen. So können sich acht 8er -SBUs zu einem Sodalith-Käfig zusammensetzen. Dieser Sodalith-Käfig kann sich wiederum mit anderen Sodalith-Käfigen verknüpfen und bildet dabei ein SOD (Sodalith) wie in Abbildung 18 dargestellt. Eine Verknüpfung von Sodalith-Käfigen mit 4-4 oder 6-6 SBUs (siehe Abbildung 18) führt zu einer Molekularsiebstruktur von LTA (Zeolith Typ A) und FAU (Zeolith Typ X, Y, Faujasit). Die dabei entstandenen Hohlräume sind durch sogenannte Fenster miteinander verbunden. So entsteht ein Netzwerk von vielen kleinen Hohlräumen, die miteinander verbunden sind und dabei eine Art Kanalsystem bilden. Dadurch kommt die zuvor genannte große innere Oberfläche zustande. [3]

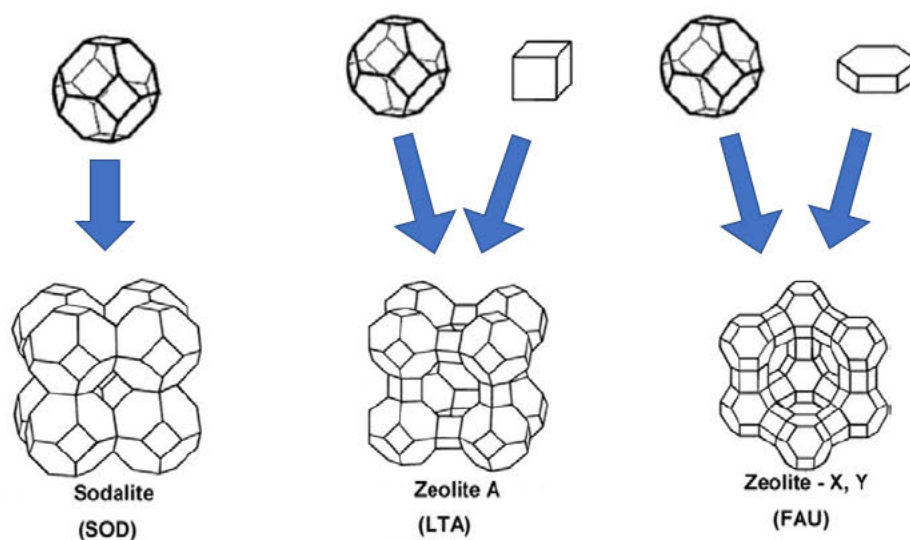


Abbildung 18: Darstellung von verschiedenen Zeolithtypen und deren Zusammensetzung

Die Zeolith-Typen können durch das Verhältnis von  $SiO_2$  und  $Al_2O_3$  eingestellt werden. Dabei bildet sich ein Zeolith vom Typ A bei einem Verhältnis von 1, ein Zeolith vom Type X bei einem Verhältnis von 1 bis 2 und Zeolith vom Typ Y bei einem Verhältnis von 2 bis 5. Durch eine Variation der verwendeten Anzahl von Primärbaueneinheiten können die Adsorptionseigenschaften verändert werden. Somit fallen auch die Fenster bei einer niedrigeren Anzahl von Primärbaueneinheiten kleiner aus, was zur Folge hat, dass Partikel mit einem größeren kinetischen Durchmesser als die Fenstergröße nicht absorbiert werden können. Dieses selektive Verhalten verbirgt sich hinter dem Molekularsiebeffekt. [3]

Eine weitere oft eingesetzte Zeolith-Struktur ist die mittels eines Poren-Systems, wie in Abbildung 19 dargestellt. Zeolith mit einem solchem Aufbau wird auch Zeolith ZSM-5 genannt. Dieses Porensystem besteht nicht aus den Sodalith-Käfigen, wobei die Hohlräume durch Fenster miteinander verbunden sind. Hierbei bilden sich ein 5-1 SBUs (a, siehe Abbildung 19) zu einer Kette (b, Abbildung 19). Diese Ketten verknüpfen sich wiederum mit anderen Ketten und bilden ein Netz(c). Dieses Netz kann Verbindungen in y-Achsenrichtung eingehen, so dass ein dreidimensionales Gitter entsteht (d). Durch die markante Struktur des Netzes entsteht ein parallel verlaufendes Porensystem, welches durch viele kleinere Verbindungen untereinander verbunden ist und dadurch eine große innere Oberfläche bildet. [11]

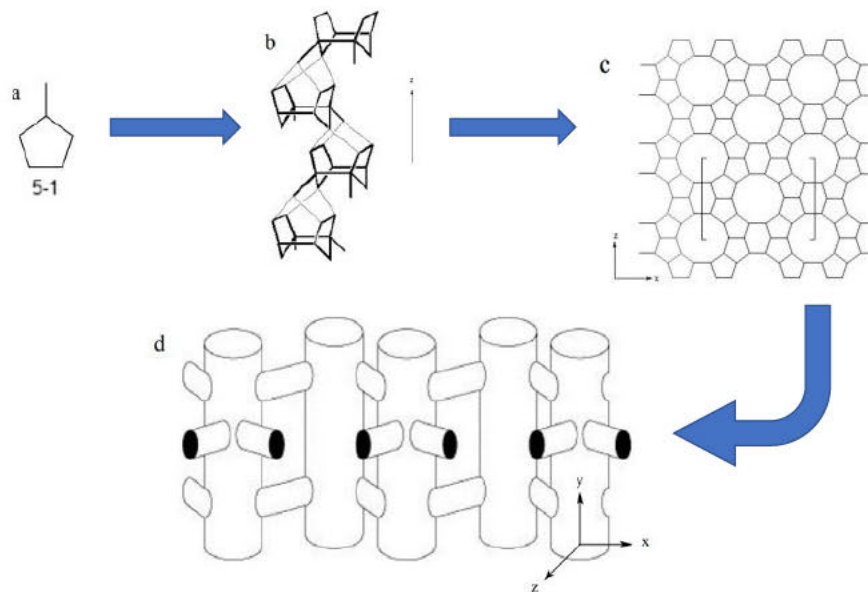


Abbildung 19: Schematische Darstellung von ZSM-5 Zeolith [11]

Dadurch, dass Zeolith zum Teil aus Aluminium besteht und Aluminium polare Eigenschaften besitzt, besitzen auch die Gitterstrukturen polare Eigenschaften. Wegen diesen polaren Eigenschaften werden auch bevorzugt polare Substanzen absorbiert. Einer dieser Substanzen ist z.B. Wasser, weshalb Zeolith auch bevorzugt in Verbindung mit Wasser eingesetzt wird. Durch Erhitzen kann das Wasser wieder aus dem Zeolithen entfernt werden und somit ist der Prozess reversibel, wie bereits weiter oben in Kapitel 2 beschrieben.



Bei Zeolith handelt es sich um einen thermisch stabilen Stoff, der nicht brennbar ist. Zeolith geht erst bei einer Temperatur von 700°C bis 1000°C in eine andere Phase über. Zudem ist Zeolith in der Regel nicht säurebeständig, da das Aluminium aus der Gitterstruktur durch die Säure herausgelöst werden kann. Die Säurebeständigkeit lässt sich allerdings durch einen niedrigeren Aluminiumgehalt im Zeolithen verbessern.

Verwendung findet Zeolith in Adsorptionsvorgängen wie beispielsweise bei der Adsorption von Wasser zur Trocknung und als Verwendung als thermische Speicher (dazu mehr in Kapitel 3). Durch die große Porosität eignet es sich auch gut zum Filtern von Wasser, z.B. um organische Komponenten aus Wasser aufzunehmen. Zeolith wird u.a. in Waschmitteln als Wasserenthärter eingesetzt. Mittlerweile findet es auch als Nahrungsergänzungsmittel Verwendung.

Kaufen lässt sich Zeolith in Pulverform, in 1-5mm großen Kugeln, als Zylinder und auch als Hohlzylinder. Dadurch, dass Zeolith ein Naturstoff ist, fallen keine Kosten für eine Herstellung an, was diesen Stoff kostengünstig macht. Eine Ausnahme bildet das synthetisch hergestellte Zeolith. [3]

### 2.6.2. Silicagele

Silicagel oder auch Kieselgel sind Siliziumdioxide. Dabei handelt es sich um einen farblosen Stoff, der eine große innere Oberfläche aufweist. Meist wird Silicagel in Pulverform oder in kleinen Kugeln mit einem Durchmesser von 2-8mm gehandelt (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Visualisierung von Silicagel [12]

Herstellt wird das Silicagel aus wässrig, alkalischen Wasserglaslösungen. Diese werden mit einer Säure versetzt. Dabei entsteht eine gelartige Masse mit einem dreidimensionalen Netzwerk. Anschließend wird die gelartige Masse mit einer Lauge gewaschen. Durch die Wahl der richtigen Alkalität können die Eigenschaften des Stoffes eingestellt werden. Generell gilt,

je größer die Alkalität, desto größer der Porendurchmesser. Es folgt die Trocknung des Silicagels. Dabei wird es erhitzt und bildet einen Feststoff. [3]

Chemisch bestehen Silicagele aus Siliziumatomen und Sauerstoffatomen, welche dreidimensional verbrückt sind. Dadurch lassen sich leicht Wassermoleküle über Wasserstoffbrückenbindungen an Silicagel binden (ähnlich wie beim Zeolith). Silicagele weisen somit hydrophile Eigenschaften auf.

Zusätzlich weist Silicagel eine sehr poröse Oberfläche mit Porendurchmessern von 2 bis 12,5nm auf. Die Bindungskräfte können durch Erhitzen wieder aufgehoben werden, wobei das aufgenommene Wasser an die Umgebung abgegeben wird. Silicagel ist dabei sehr zyklenstabil. [3]

Angewendet werden Silicagele hauptsächlich als Trocknungsmittel. So wird in vielen Verpackungen von elektrischen Geräten kleine Papiertütchen mit Silicagel hinzugegeben, um dadurch eine mögliche Kondensatbildung zu vermeiden.

Zu kaufen gibt es Silicagel meist in Pulverform oder als kleine Kugeln (siehe Abbildung 20).

Silicagele weisen sehr gute Wasseraufnahmefähigkeiten auf, allerdings ist die Bindungsenergie zwischen Silicagel und Wasser nicht so stark wie die von Zeolith und Wasser. Daher kann Silicagel keine so hohen Temperaturen bereitstellen, wie es Zeolith kann. Als thermischer Speicher wird daher Zeolith bevorzugt. [3]

### 3. Anwendungsbereiche von Sorptionsspeichern

Während die sensiblen Wärmespeicher als ausgereift gelten und über einen breiten Anwendungsbereich verfügen, befinden sich die Sorptionsspeicher noch in ihrer Anfangsphase ihrer Entwicklung. Dennoch gibt es einige erste Anwendungsbereiche, in denen diese Speicherart zum Einsatz kommt.

#### 3.1. Mobile Speicher

Die Abwärme von verschiedenen industriellen Einrichtungen, wie z.B. Müllverbrennungsanlagen oder Kraftwerksprozessen kann dazu genutzt werden, um einen Zeolithspeicher zu beladen. Dies kann in mobilen Modulen geschehen. Diese Module können dann mit LKWs zum Verbraucher, wie z.B. Haushalte, transportiert werden. Der Vorteil gegenüber dem konservativen Weg mittels Leitungsbau zur Nahwärmeversorgung liegt darin, dass keine Leitungen gebaut werden müssen und das Modul zum gewünschten Ort gefahren werden kann, wo die Wärme benötigt wird. Dieses Prinzip ist auch mit den konventionellen Wärmespeichern wie sensiblen und latenten Wärmespeichern erprobt. [7]

#### 3.2. Trocknung

Durch die Fähigkeit des Zeoliths während der Adsorption nicht nur Wärme abzugeben, sondern dabei auch Wasser aufzunehmen, eignet sich dieses sehr gut zum Trocknen. Diese Eigenschaft wird sich z.B. bei Spülmaschinen zu Nutze gemacht.

#### 3.3. Weitere Anwendungen

Weitere denkbare Anwendungen sind bei der saisonalen Speicherung von Solarwärme, bei der Luftentfeuchtung in Hallenbädern, bei der Raumklimatisierung und beim Einsatz von Adsorptionswärmepumpen.

## 4. Versuch

Der Versuchsstand Zeolithspeicher befindet sich im Zentrum für Energietechnik, Berliner Tor 11 in Hamburg an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg. Mit diesem Versuchsstand soll experimentell die Funktionsweise von Zeolithspeichern veranschaulicht werden.

### 4.1. Versuchsbeschreibung

Für die Umpositionierung des Versuchsstands ist es essentiell zu wissen wie der Versuchsstand aufgebaut ist. Daher wird im Folgendem auf die wesentlichen Bestandteile dieses Versuchsstandes eingegangen und der Aufbau kurz erklärt. In der Abbildung 21 ist der gesamte Versuchsstand dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Zeolithspeicher-Versuchsstand. Dieser wird als Laborversuchsstand für Studenten betrieben.

Die Speicherung der Wärme geschieht hierbei im Zeolith-Granulat (1). Dieses Granulat befindet sich, um die Wärmeverluste beim Be- und Entladen gering zu halten, in einer doppelt verglasten zylindrischen Plexiglashülle (2), welche von Luft durchströmt werden kann. Unter dem Granulat befindet sich ein Sieb. Dieses Sieb soll die Vermischung des Granulats mit dem darunterliegenden Raschigringen (3) verhindern und gleichzeitig wird dadurch gewährleistet, dass die Luft durch das Sieb und dadurch auch durch den Zylinder hindurchströmen kann. Die Raschigringe sorgen dafür, dass es zu einem, über den gesamten Querschnitt des Zylinders, gleichmäßigen Luftstrom kommt. Die Raschigringe sowie das Sieb befinden sich ebenfalls im Plexiglaszylinder. Über und unter dem Speicher befindet sich jeweils ein Dreiwegehahn (4) (Manual J4C S20-S300 der Firma Fergo Armaturen GmbH), der entweder die Luft durch den Speicher leitet oder den Speicher nach außen hin abschottet und dabei die Luft über einen Bypass (5) um den Speicher herum befördert. Vor dem Eintritt und nach dem Austritt des Zylinders wird die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit (6) (Series EE33 der Firma E+E ElektronikGes.m.b.H) gemessen. Am Austritt wird die Luft an die Umgebung freigegeben.

Die Luft wird durch die hausinterne Druckluftversorgung bereitgestellt und mit Hilfe eines Luftmassenreglers (7) (QSC-DDSA-BB13) geregelt. Dabei handelt es sich um vorher gefilterte und somit um relativ trockene Luft. Anschließend wird diese Luft mit Hilfe eines Lufterwärmers (8) (LE MINI 400 der Firma Leister Technologies AG) erwärmt und durch eine Messung die Temperatur der erwärmten Luft bestimmt. Um die Wärmeverluste zwischen dem Lufterwärmer und dem Zeolith gering zu halten, sind die Rohre an einigen Stellen isoliert. Zusätzlich kann mit Hilfe eines Dampferzeugers (9) (LE18PD der Firma Vapac) der trockenen Luft Wasserdampf zugefügt werden, um somit eine gewünschte Luftfeuchtigkeit bereitzustellen. Die Wasserdampfzuführung kann dabei vom Wasserdampfregler (10) geregelt werden. Kommt es zur Bildung von Kondensat, sammelt sich dieses Kondensat am tiefsten Punkt der Anlage und kann dort mit Hilfe eines Kondensatablasshahns (11) abgelassen werden. Alle elektrischen Verbraucher, wie die gesamte EMSR-Technik sind im Schaltkasten (12) verbunden. Im Anhang C befindet sich das zum Versuchsstand passende R&I. Der gesamte

Versuchsstand ist mit Aluminiumprofilstangen der Firma Item (Profil 6 30x30 leicht, natur und Profil 6 60x60 leicht, natur) aufgebaut. Diese Profilstangen sind mit Schraubenverbindungen miteinander verbunden.



Abbildung 21: Aufbau des Versuchsstands

Die Anlage ist rechnergestützt und wird über das Programm LabView bedient. Dabei kann die Temperatur vor und hinter der Speichereinheit, die Temperatur nach dem Lufterwärmer, der Durchfluss, die Luftfeuchte und die Ventilstellungen eingestellt werden. Die Messergebnisse werden dabei sekundlich gespeichert und grafisch dargestellt.

Der Versuchsstand wird im späteren Verlauf in zwei Einheiten eingeteilt. Dabei bilden die linken zwei Drittel des Versuchstandes eine Einheit und das rechte Drittel die andere Einheit. In Abbildung 22 wird dies verdeutlicht dargestellt.



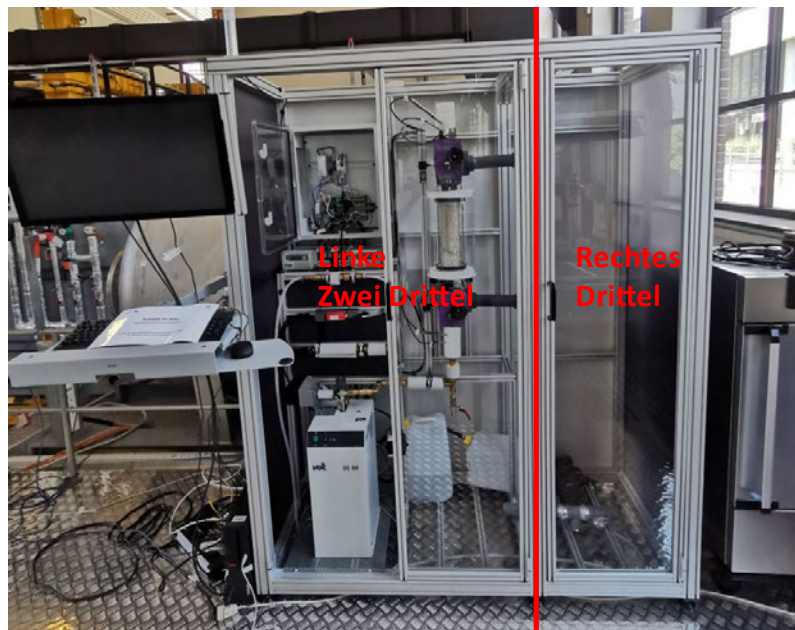


Abbildung 22: Einteilung der zwei Einheiten

## 4.2. Versuchsdurchführung

Nachdem die Stromversorgung, der Anschluss der Druckluftversorgung und die Versorgung des Dampferzeugers mit Wasser sichergestellt ist, kann der Rechner gestartet werden und das Programm LabView geöffnet werden. Sobald im Programm oben rechts ein gelbes Licht hin und her blinkt, gleichzeitig die Ampel am Versuchsstand grün leuchtet und der Verdampfer eingeschaltet ist, ist der Versuchsstand einsatzbereit.

Um einen vollen Be- sowie Entladezyklus aufzunehmen, sollte sichergestellt werden, dass der Zeolithspeicher die volle Kapazität an Energie bereitstellen beziehungsweise aufnehmen kann. Somit ist der Versuchsstand zuerst vollständig zu laden beziehungsweise zu entladen. Bei der Beladung ist dabei die Lufttemperatur auf einen möglichst hohen Wert einzustellen. Aus Gründen der Materialschonung wird ab einer gemessenen Temperatur am Lufterwärmer von  $100^{\circ}\text{C}$  abgeregelt. Diese warme Luft wird dann in den Zeolithspeicher gefördert und lädt nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Prinzip den Speicher. Je nachdem wie sehr der Speicher vorher geladen war, kann dieser Vorgang einige Minuten dauern. Der Vorgang ist abgeschlossen, wenn die Temperaturen am Eintritt  $T_u$  und am Austritt  $T_o$  sich nicht mehr annähern, eine konstante Temperaturdifferenz sich einstellt und gleichzeitig der Wassergehalt sich angleicht. Die konstante Temperaturdifferenz, die sich dabei einstellt, ist durch die Wärmeverluste zwischen Eintrittstemperaturmessung und Austrittstemperaturmessung begründet. Diese Beladung wird in Abbildung 23 verdeutlicht.

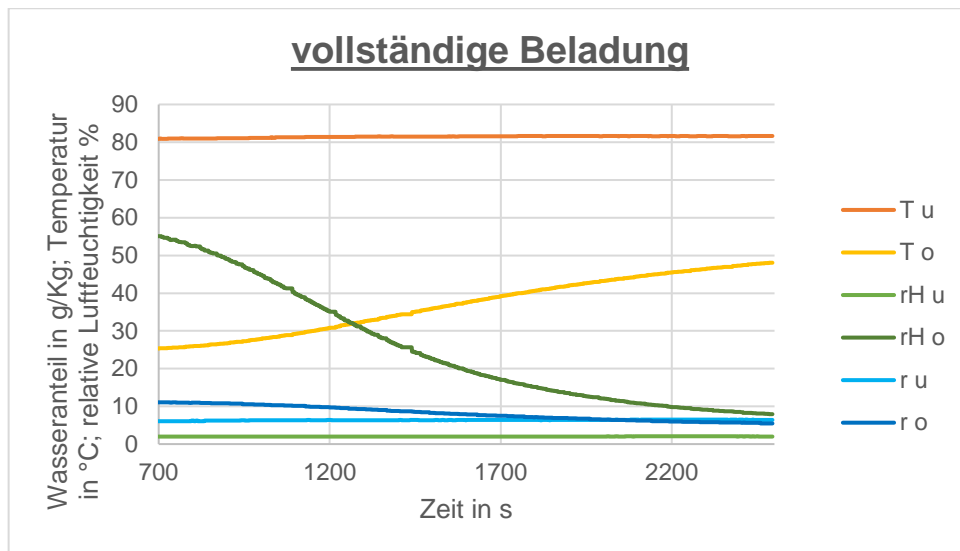


Abbildung 23: Darstellung des abgeschlossenen Beladevorgangs

Um eine möglichst gute Ausgangssituation für Messungen herzustellen, werden nun die Dreiwegehähne so eingestellt, dass die Luft über den Bypass umgeleitet wird. Um anschließend den Speicher zu entladen, wird die Luft auf 0°C im Programm eingestellt (es stellt sich dadurch die Raumtemperatur ein und der Luftwärmer wird ausgeschaltet) und durch den Verdampfer wird nun der Luft die gewünschte Luftfeuchtigkeit zur Verfügung gestellt. Durch den zugeführten Dampfanteil steigt die Temperatur leicht an. Hierbei sollte, zur Vermeidung von Kondensat in den Rohrleitungen, die relative Luftfeuchtigkeit von 100% nicht erreicht werden. Dieser Zustand wird so lange durchgeführt, bis die Messwerte am Eintritt und am Austritt sich angeglichen haben und einen konstanten Wert angenommen haben. Das System ist somit eingeschwungen.

Nun kann mit der eigentlichen Messung begonnen werden. Die Ventile werden so eingestellt, dass diese nun den Luftstrom durch das Granulat leiten. Dabei sollte weder die Temperatur noch die Luftfeuchtigkeit verändert werden. Um den gesamten Prozess abdecken zu können, ist der Versuch so lange durchzuführen, bis es wieder zu einer Angleichung der Temperaturen und des Wassergehalts kommt.

Anschließend kann der Versuchsstand wieder geladen werden, dabei werden die Dreiwegehähne wieder so eingestellt, dass diese die Luft durch den Bypass leiten und der Speicher geschlossen ist. Die Temperatur wird erhöht und die Luftfeuchtigkeit verringert. Es wird so lange gewartet, bis sich das System eingeschwungen hat. Anschließend kann mit der Beladung angefangen werden. Die Beladung geschieht analog zum zweiten Absatz dieses Kapitels.

## 5. Konzept zur Umpositionierung des Versuchsstands

Um den zuvor beschriebene Versuchsstand im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen zentraler aufzustellen, soll dieser umpositioniert werden. Damit eine risikofreie und sichere Umpositionierung gewährleistet werden kann, ist diese Umpositionierung gut vorzubereiten. In dieser Ausarbeitung werden verschiedene Konzepte diskutiert, wobei sich daraus ein Konzept als am sinnvollsten herausgestellt hat. Dieses Konzept wurde dann auch durchgeführt.

### 5.1. Arbeitssicherheit

Um mögliche Verletzungen zu vermeiden, werden Sicherheitsschuhe und Handschuhe empfohlen. Das Greifen oder Stehen unter schwebenden Gegenständen ist dringend zu vermeiden.

### 5.2. Risiken und mögliche Probleme

Um mögliche Schäden an Material und Personen zu vermeiden, muss auch auf die Risiken und mögliche Gefahren, die mit dieser Umpositionierung einhergehen, eingegangen werden. Somit sind mehrere Maßnahmen zu ergreifen, um dies zu gewährleisten.

Beim Transport ist zu beachten, dass die einzelnen Komponenten in möglichst großen Teilen transportiert werden, diese aber trotzdem von der Masse und Größe handhabbar bleiben. Dadurch ist ein unproblematischer Transport und anschließende einfachere Montage besser zu bewerkstelligen.

#### 5.2.1. Probleme der Kabelzuordnung

Eine mögliche Gefahr bei dieser Umpositionierung liegt in der Kabelführung. Um zu vermeiden, dass die Zuordnung von losen Kabeln im späteren Verlauf der Wiederinbetriebnahme ein größeres Problem darstellt, ist eine gute Dokumentation der Kabelführung wichtig. Dazu wurde ein dreifach unabhängiges System entwickelt.

Zum einen wurden die Kabel selbst mit Klebestreifen beschriftet, so dass eindeutig ersichtlich ist, woher jedes Kabel kommt und wo sich deren Anschlussstellen befinden.

Des Weiteren wurde ein Modell von dem Schaltkasten erstellt, in dem jedes Kabel, welches sich im Schaltkasten befindet, eindeutig zugeordnet werden kann. Dieses Modell ist im Anhang B dargestellt.

Zusätzlich wurde auch fotografisch dokumentiert, wo welches Kabel positioniert ist.

### 5.2.2. Erschütterungen

Durch vom Transport entstehende Erschütterungen besteht eine Gefahr von Schäden. Besonders gefährdet ist die Mess- und Regelungstechnik, der elektrische Schaltkasten mit seinen Anschlüssen und die Zeolithspeichereinheit. Aber auch bei den Ventilen und dem Dampferzeuger sind Erschütterungen zu vermeiden. Um diese Gefahr möglichst gering zu halten, sind die besonders gefährdeten Teile, wenn möglich, einzeln zu transportieren. Ist dies nicht realisierbar, sind die empfindlichen Bauteile besonders gut geschützt einzupacken, so dass mögliche Erschütterungen keine Schäden hervorrufen können. Ein hohes Potential von Erschütterungen geht von dem Transportabschnitt auf den Treppen aus. Somit ist dort besonders darauf zu achten, Erschütterungen zu vermeiden. Eine Verringerung von möglichen Erschütterungen lässt sich durch das Herabsetzen der zu transportierenden Masse und durch eine bessere Handhabbarkeit verwirklichen. Dies kann durch den Transport von kleineren Einzelteilen erreicht werden.

### 5.2.3. Stabilitätsverlust der Anlage

Durch die beim Transport abwechselnden Belastungen an den Verbindungen der Profilstangen, können sich Schraubenverbindungen lösen und somit zu einem erheblichen Schaden an der Anlage führen. Um dies zu vermeiden, sollte vor dem Transport auf mögliche lose Schraubenverbindungen und lose Profilstangen geachtet werden. Beim Transport ist zudem noch darauf zu achten, dass sich keine Profilstangen lösen. Auch sind größere Hebelwirkungen an den Verbindungen der Profilstangen zu vermeiden. Es gilt, umso geringer das Gewicht ist, desto besser lassen sich Schäden durch Stabilitätsverlust vermeiden.

## 5.3. Bestimmung des Gewichtes

Um eine Einschätzung über die Machbarkeit der Umpositionierung zu ermöglichen, ist die Ermittlung der zu transportierenden Masse essentiell. Um diese zu bestimmen, kann im Bestellkatalog der Hersteller nach den entsprechenden Massen recherchiert werden. Bei der Stützgeometrie handelt es sich um Profilstangen „Profil 6 60x60 leicht, natur“ der Firma Item. Diese 60x60 Profilstangen sind mit einer spezifischen Masse von  $2,7 \frac{kg}{m}$  angegeben. Bei den „Item Profil 30x30 leicht, natur“ Profilstangen wurden diese mit  $0,93 \frac{kg}{m}$  angegeben. Dies musste anschließend nur noch mit den Längen der einzelnen Stangen multipliziert werden und somit erhält man die Masse der Profilstangen [11]. Siehe dazu Formel 5.1.

$$m_{Stangen} = m_{spez.,60x60} \cdot l_{gesamt,60x60} + m_{spez,30x30} \cdot l_{gesamt,30x30} \quad (5.1)$$

Die Masse der Flächenelemente, wird mit einer spezifischen Masse von  $4 \frac{kg}{m^2}$  angegeben. Multipliziert mit der Fläche ergibt sich daraus die Masse dieser Flächenelemente [11]. Hinzu kommen die Masse des Dampferzeugers und der Ventile, die sich aus den Herstellerangaben ergeben. In der folgenden Tabelle werden einzelne Bauteile mit deren jeweiligen Massen aufgelistet. Um möglichen Gewichtsproblemen präventiv entgegen zu wirken, sind die errechneten Massen aufgerundet.

Tabelle 1: Darstellung der Massen einzelner Bauteile

Bauteile	Massen in kg
<b>Profilstangen rechtes Drittel</b>	20
<b>Flächenelemente rechtes Drittel</b>	8
<b>Profilstangen linke zwei Drittel</b>	60
<b>Flächenelemente linke zwei Drittel</b>	12
<b>Angenommenes zusätzliches Gewicht für Schaltkasten, Teil-Rohrleitung und Messstellen</b>	5
<b>Dampferzeuger</b>	27
<b>T-Ventil</b>	1,8

Für das rechte Drittel ergibt sich, aus der Tabelle 1, somit eine Masse von 28kg und für die linken zwei Drittel eine Masse von 77kg. Bei dem Transport des Versuchsstands als Ganzes sind beide Teile zusammenzurechnen. Es ergibt sich daher eine Masse von 105kg. Hierbei handelt es sich um die im folgenden Kapitel 5.4 zu transportierende Baugruppe. Die Masse des Dampferzeugers, des Zeolithspeichers und der Ventile wird hierbei nicht mitbetrachtet, da diese extra transportiert werden.

## 5.4. Konzeptideen der Umpositionierung

Um die Umpositionierung des Versuchsstands am materialschonendsten und mit einem minimalen Risiko durchzuführen, wurden verschiedene Konzeptideen genauer beleuchtet. Im Folgenden wird auf drei Ideen eingegangen, wie eine solche Umpositionierung durchgeführt werden kann und erläutert, ob diese Konzeptideen zu empfehlen und durchführbar sind.

### 5.4.1. Konzeptidee1: Umpositionierung mit Hilfe des Hallenkrans

Die erste Möglichkeit, welche untersucht worden ist, um die Umpositionierung durchzuführen, ist die Verwendung des vorhandenen Hallenkrans. Hierfür müssten allerdings zuvor alle empfindlichen Gegenstände, sowie alle leicht zu entfernenden und nicht statisch relevante Teile demontiert werden. Somit wird das Gewicht reduziert, was den Transport vereinfacht und dadurch mögliche Beschädigungen, speziell an empfindlichen Teilen, vorbeugt.

Der Versuchsstand kann dann mithilfe eines Rollbretts an die Rüstung der Plattform befördert werden. Aufgrund eines vorhandenen Geländers ist es dort allerdings nicht möglich, den vorhandenen Kranhaken am Versuchsstand zu befestigen. Unter Verwendung einer provisorischen Flaschenzugkonstruktion, die an der Kranbrücke befestigt werden müsste, könnte der Versuchsstand im liegenden Zustand dennoch vom Kran angehoben werden. Ein weiteres Problem ist, dass der Kran nicht weit genug über die Plattform gefahren werden kann, so dass sich der Schwerpunkt des Versuchsstands nicht direkt unter der Kranbrücke befindet. Somit kommt es beim Anheben des Versuchsstands zu Schwingungen, welche ausgeglichen werden müssten.

Aus diesen Gründen gibt es beim Durchsetzen des eben beschriebenen Umpositionierungskonzeptes große Bedenken gegenüber der Statik des Versuchsstands und der Sicherheit für Mensch und Material. Somit ist von dieser Konzeptidee abzuraten.

### 5.4.2. Konzeptidee 2: Umpositionierung der Anlage als Ganzes

Eine weitere Möglichkeit diese Anlage umzupositionieren ist der Transport der Anlage als Ganzes über die Treppen. Dabei müsste das Gewicht der Anlage vorher reduziert werden, indem alle leicht zu entfernende Teile und besonders empfindliche Teile demontiert werden. Der Versuchsstand kann dann von vier Personen (26,3kg pro Person) auf ein Rollbrett platziert und bis zur Treppe transportiert werden. Dort befindet sich die erste Engstelle. Diese Engstelle stellt dabei kein Problem dar. Dieses wird auch aus der maßstabsgetreuen Skizze in der Abbildung 24 deutlich.

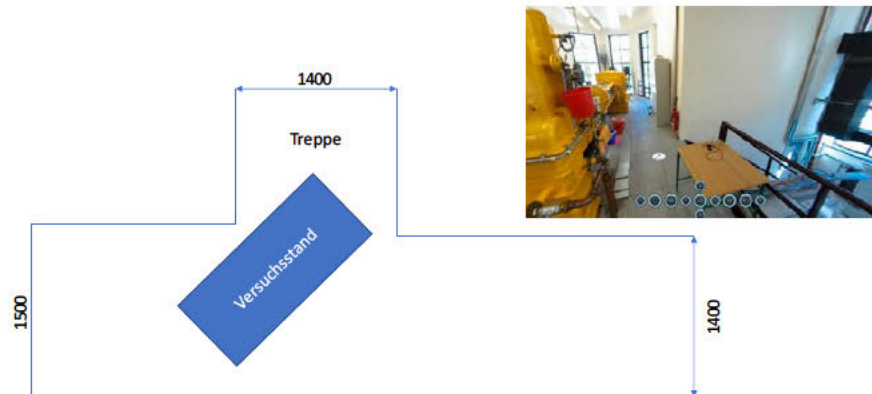


Abbildung 24: Skizze der Engstelle Treppe oben, Angaben in mm

Der Versuchsstand wird nun die Treppen heruntergetragen. Das Gewicht des gesamten Versuchsstands beträgt 105kg und stellt dabei eine Herausforderung dar, da das Rollbrett auf den Treppen nicht eingesetzt werden kann.

Die nächste Engstelle befindet sich unten an der Treppe. Auch hierzu wurde ein Modell angelegt, welches verdeutlicht, dass diese Engstelle auch ohne Probleme passiert werden kann (siehe hierzu Abbildung 25).

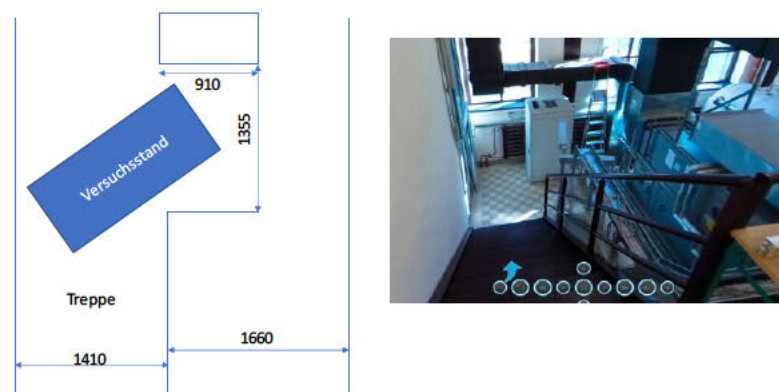


Abbildung 25: Model der Engstelle Treppe unten, Angaben in mm



Die dritte Engstelle unter der Plattform stellt allerdings ein Problem dar. Es wurde bei der Vermessung dieser Engstelle keine Möglichkeit gefunden, um den Versuchsstand durch diese Engstelle zu transportieren. Der Versuchsstand müsste somit demontiert werden, um diese Engstelle zu passieren. Eine Demontage gestaltet sich wegen des geringen Platzes unten an der Treppe schwierig. Auch gibt es Bedenken zur Statik beim Transport des gesamten Versuchsstands.

Aufgrund der eben benannten Engstelle und der hohen Masse der Anlage gibt es große Bedenken bezüglich der sicheren Durchführung dieser Umpositionierung. Aus diesen Gründen wird auch von diesem Umpositionierungskonzept abgeraten.

#### 5.4.3. Konzeptidee 3: Zerlegung der Anlage, um einen besseren Transport zu gewährleisten.

Um dennoch durch die zuvor beschriebene problematische Engstelle zu gelangen, muss der Versuchsstand vorher zum Teil demontiert werden. Die Demontage ist somit am Ausgangsort durchzuführen, da dort mehr Platz zur Verfügung steht. Auch ist das Gewicht, welches getragen werden muss, somit deutlich geringer, wodurch der Transport deutlich leichter fällt und sicherer bewerkstelligt werden kann.

Dabei sollte der Versuchsstand in möglichst großen Teilen zerlegt werden. Somit werden mögliche Probleme vorgebeugt und die anschließende Montage gestaltet sich einfacher. Gleichzeitig ist die Anlage so weit zu demontieren, dass diese auch sicher zu transportieren ist und die problematische Engstelle passiert werden kann.

Bevor mit der Demontage angefangen werden kann, müssen noch einige Vorbereitungen getroffen werden. Als erstes muss das Zeolith geladen werden, damit es seine Feuchtigkeit verliert und somit leichter wird (auch wenn der Gewichtsunterschied nicht markant ist). Anschließend sind die Dreiwegeventile in Richtung des Speichers zu schließen, so dass der Bypass offen ist. Sobald dies geschehen ist, muss die Anlage aus Sicherheitsgründen von der Stromversorgung getrennt und die Druckluftversorgung unterbrochen werden.

Um sicherzustellen, dass der Versuchsstand nach der Umpositionierung seine volle Funktionsfähigkeit wiedererlangt und dass alle Kabel im Schaltschrank wieder ordnungsgemäß platziert werden können, sollte dies durch eine dreifache Dokumentation der Kabelführung abgesichert werden: Zum einen sollten die Kabel mit einem Klebeband beschriftet werden, so dass ersichtlich ist an welcher Stelle die Kabel im Schaltschrank positioniert werden, zum anderen sollten die Kabelpositionen mit Fotoaufnahmen festgehalten werden. Zusätzlich sollte ein Modell angelegt werden, welches den Schaltkasten und deren Kabelführung beschreibt (siehe dazu Kapitel 5.2.1). Somit lässt sich jedes Kabel eindeutig seiner Position im Schaltkasten zuordnen und die Gefahr einer falschen Zuordnung ist nicht gegeben. Auch können Kabel, die aus deren Position im Schaltschrank während des Transportes abgefallen sind, wieder eindeutig zugeordnet werden.



Sobald dies geschehen ist, kann mit der eigentlichen Demontage angefangen werden. Dabei lässt sie sich in sechs Schritte zusammenfassen:

Im **ersten Schritt** müssen alle leicht zu entfernenden Teile, wie die Wasserbehälter des Dampferzeugers, die Glastüren, die Ampel, der Rechner mit den Kabeln, der Monitor mit der Monitorhalterung und die Tastatur mit deren Halterung, entfernt werden.

Im **zweiten Schritt** muss der Dampferzeuger zusammen mit dem Regler demontiert werden. Trennstellen sind die Kabelführung des Reglers direkt am Regelventil, die Kabelführung des Dampferzeugers direkt am Schaltkasten und die Rohrleitung kurz vor dem T-Stück, also an der Zusammenführung der Luftversorgung und des Wasserdampfes. Der Dampferzeuger ist vorsichtig und erschütterungsarm zu transportieren.

Im **dritten Schritt** muss das rechte Drittel des Versuchsstands demontiert werden. Die Demontage gestaltet sich dabei leicht, da das rechte Drittel nur mittels einer Schraubenverbindung befestigt ist und statisch keinen Einfluss auf die linke Seite hat. Vorher ist allerdings die jeweilige Position der Streben so zu markieren, dass diese nach der Umpositionierung wieder genauso zusammengebaut werden können. Die Markierung kann mittels eines Bleistifts durch einen Strich geschehen. Die kalkulierte Masse beträgt 28 kg und kann somit von zwei Personen transportiert werden.

Im **vierten Schritt** muss der Zeolithspeicher, der Bypass und die Ventile demontiert werden. Zuerst ist die Messtechnik aus den vorgesehenen Rohrleitungen zu entfernen. Anschließend kann der Bypass und die Ventile demontiert werden. Als letztes wird der Speicher an sich demontiert. Bei dessen Demontage und beim Transport sind ganz besonders jegliche Erschütterungen zu vermeiden!

Im **fünften Schritt** müssen die verbleibenden zwei Drittel des Versuchsstands mit dem verbleibenden Schaltkasten als Ganzes transportiert werden. Das ermittelte Gewicht beträgt dabei rund 77kg und kann somit von vier Personen bewegt werden. Die Anlage sollte auf ein Rollbrett abgelegt und liegend transportiert werden. Somit wird der Schwerpunkt herabgesetzt, was ein Umkippen der Anlage speziell auf der Treppe erschwert. Gleichzeitig ist somit auch gewährleistet, dass die Anlage durch die problematische Engstelle transportiert werden kann. Bevor mit dem Transport begonnen werden kann, müssen jedoch alle losen Gegenstände, wie Kabel, die noch am Schaltkasten hängen, gesichert werden. Die Messtechnik ist wegen ihrer Empfindlichkeit besonders und speziell vor Stößen und Erschütterungen zu sichern. Sobald dies geschehen ist, kann der Transport beginnen. Da der Versuchsstand dieses mal im Liegen transportiert wird ist ein neues Modell der Engstelle oben an der Treppe anzulegen. Diese Engstelle wird in Abbildung 26 dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass diese Engstelle kein Problem darstellt.

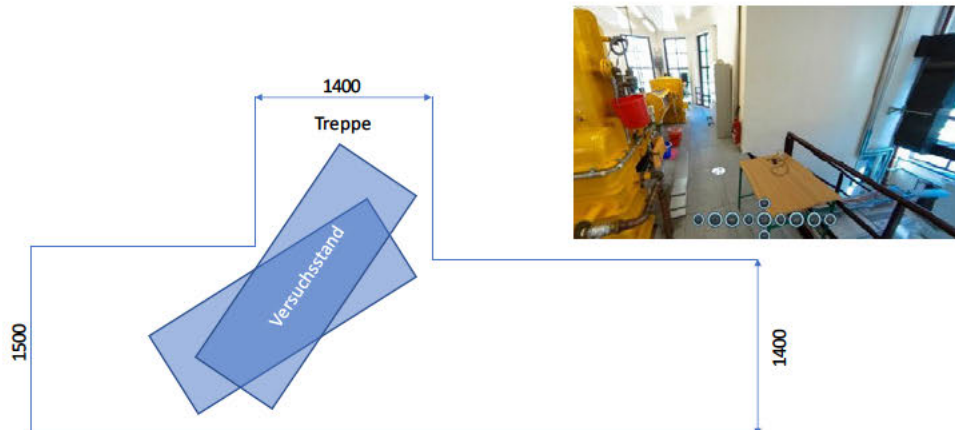


Abbildung 26: Modell der oberen Engstelle beim liegenden Transport

An der Treppe angekommen, muss die Anlage vor dem unkontrollierten Herunterrutschen mit einem Seil gesichert werden. Der Versuchsstand wird auf die Treppe gelegt, so dass dieser die Treppen herunterrutschen kann. Durch eine Handseilwinde kann nun die Anlage langsam und kontrolliert die Treppe herabgelassen werden. Unten kann die Anlage wieder auf die Rollen gelegt werden. Dabei muss es allerdings noch die Engstelle unten an der Treppe passieren. Die Abbildung 27 zeigt, dass auch dies möglich ist, wenn auch nur knapp.

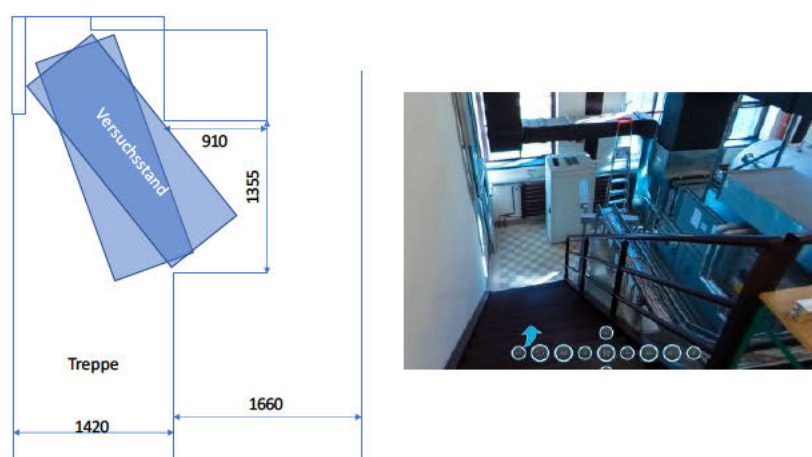


Abbildung 27: Modell der Engstelle unten an der Treppe beim liegenden Transport

Die vorher benannte, dritte Engstelle, die im montierten Zustand nicht passierbar war, kann aufgrund der beschriebenen Arbeitsschritte nun auch problemlos bewältigt werden.

Anschließend kann der Versuchsstand auf dem Rollbrett an seinen gewünschten Stellplatz transportiert werden.

Im **sechsten Schritt** wird der Versuchsstand wieder aufgebaut. Der Aufbau sollte dabei in umgekehrter Reihenfolge wie die Demontage geschehen.

Die **Lagerung** der zu transportierenden Bauteile sollte am Aufbauort direkt nach der Demontage erfolgen. Dabei ist auf eine kipp sichere Lagerung zu achten. Um dies sicherzustellen, wird eine liegende Lagerung empfohlen. Nicht eindeutig zuordenbare Gegenstände sind zu beschriften. Um Schäden an Mensch und Material zu vermeiden, ist das Abstellen von Gegenständen wie z.B. Werkzeuge oder Bauteile auf Wegen oder Treppen zu unterlassen. Bei längerem Verlassen des Versuchsstands ist der Lagerplatz bzw. der noch nicht aufgebaute Versuchsstand vor Unbefugten zu sichern. Dies kann mit Hilfe eines Schildes oder einer Absperrung geschehen.

Bei der soeben beschriebenen Konzeptidee Nr. 3 handelt es sich letztendlich um das Konzept, welches inzwischen erfolgreich umgesetzt wurde.

## 5.5. Vorbereitung und Durchführung

Damit die Umpositionierung schnell und effektiv wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben durchgeführt werden konnte, waren folgende Punkte im Vorfeld essentiell und mussten vorher organisiert werden:

- Werkzeuge für die Demontage
- Klebeband zum Sichern und Beschriften von Bauteilen und Kabeln
- Ein Rollbrett
- Vier helfende Personen

## 5.6. Fazit der Umpositionierungsmaßnahmen

Aus den Messwerten von Kapitel 6.2 kann geschlossen werden, dass diese Umpositionierung ein voller Erfolg gewesen ist. Die Anlage ist innerhalb von vier Arbeitstagen demontiert, an die vorhergesehene Stelle transportiert und wieder montiert worden. Es ist zu keinem Schaden an Mensch und Material gekommen und die Anlage ist wieder vollständig funktionsfähig. Durch eine gute Vorbereitung geschah auch der Aufbau der Anlage problemlos und alle Bauteile konnten an ihrer vorgesehenen Position eingebaut werden.

Dennoch ist die tatsächlich benötigte Zeit, die die komplette Umpositionierung in Anspruch genommen hat, größer gewesen als die erwarteten zwei Arbeitstage. Speziell die Zeit, die für die Aufnahme der Kabelführungen benötigt worden ist und zur Markierung der Positionen bei den demontierten Bauteilen war zeitintensiver als ursprünglich gedacht.

## 6. Messergebnisse

Die bei der Versuchsdurchführung aufgenommenen Messwerte werden im Folgenden dargestellt. Ziel ist es das Betriebsverhalten der Versuchsanlage zu analysieren und mögliche Probleme zu beleuchten. Auch soll untersucht werden, inwieweit sich das Betriebsverhalten vor und nach der Umpositionierung verändert hat.

### 6.1. Messergebnis vor der Umpositionierung

Um die Funktionsfähigkeit des Versuchstands vor der Umpositionierung zu untersuchen, wurde ein voller Adsorptions- und Desorptionsvorgang durchgeführt.

#### 6.1.1. Adsorptionsvorgang vor der Umpositionierung

Bei der Entladung des Zeolithspeichers vor der Umpositionierung wurde der in Abbildung 28 dargestellte Verlauf aufgenommen. Es wurde eine hohe Luftfeuchtigkeit eingestellt und eine möglichst niedrige Temperatur. In diesem Fall betrug die Eintrittstemperatur die Umgebungstemperatur von 25°C.

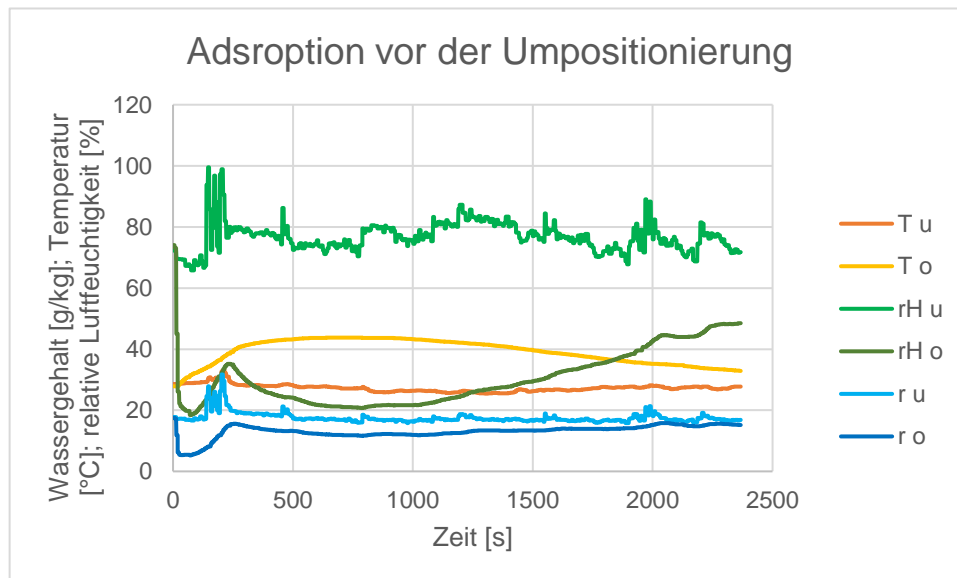


Abbildung 28: Entladung vor der Umpositionierung

Es ist zu erkennen, dass die Eintrittstemperatur nahezu konstant bleibt und es zu einem Anstieg der Temperatur am Austritt kommt. Auch ist abzulesen, dass der eingehende Wassergehalt am Eintritt  $r_u$  höher ist als am Austritt  $r_o$ . Dieses Verhalten spiegelt einen typischen Adsorptionsprozess wider, wobei das Wasser adsorbiert wird und dabei Wärme

freigegeben wird. Bei der relativen Feuchtigkeit ist ersichtlich, dass die Anlage Probleme hat, die vorgegebenen Werte einzuhalten.

### 6.1.2. Desorptionsvorgang vor der Umpositionierung

Die Messergebnisse des Desorptionsprozesses vor der Umpositionierung werden in der Abbildung 29 grafisch dargestellt.

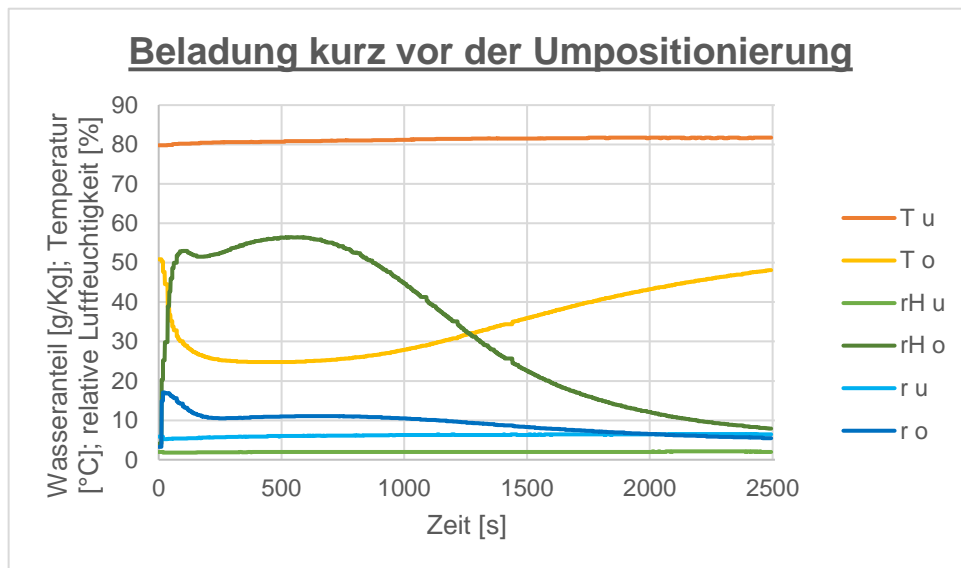


Abbildung 29: Messergebnisse der Beladung vor der Umpositionierung

Es ist zu erkennen wie eine konstante Eintrittstemperatur  $T_u$  gehalten wird. In diesem Fall liegt die Temperatur bei ungefähr  $80^\circ\text{C}$ . Auch der Wassergehalt ist konstant und weist einen konstant niedrigen Wert auf. Es ist auch zu beobachten, wie die Austrittstemperatur schon nach einigen Sekunden stark absinkt und einen minimalen Wert von knapp unter  $25^\circ\text{C}$  erreicht. Dabei entsteht ein Temperaturunterschied von  $25^\circ\text{C}$ . Gleichzeitig steigt der Wassergehalt am Austritt stark an. Dieses Verhalten ist ein typisches Verhalten eines Desorptionsprozesses und ist in Kapitel 2 hinreichend beschrieben worden. Mit der Zeit wird mit zunehmender Beladung die aufgenommene Energie immer geringer. Dies äußert sich an der immer langsamer steigenden Funktion der Austrittstemperatur. Sobald diese nicht mehr steigt und sich ein konstanter Wert eingestellt hat, ist der Desorptionsprozess beendet.

## 6.2. Messergebnis nach der Umpositionierung

Um die Funktionsfähigkeit des Versuchsstandes nach der Umpositionierung sicher zu stellen, wurde der Versuchsstand nach dieser Umpositionierung genauestens untersucht. Aus diesen ermittelten Messdaten kann dann der Einfluss dieser Umpositionierungsmaßnahmen auf die Sorptionsprozesse untersucht und das generelle Betriebsverhalten analysiert werden.

### 6.2.1. Direkt nach der Umpositionierung

Die Messergebnisse des Adsorptionsprozesses direkt nach der Umpositionierung werden in der Abbildung 30 grafisch dargestellt. Diese Messung ist direkt nach der Umpositionierung durchgeführt worden und soll verdeutlichen, dass der Speicher über den gesamten Zeitraum der Umpositionierung noch immer seine eingespeicherte Wärme zur Verfügung stellen kann. Beladen wurde der Speicher am 03.06.2022 und die Entladung geschah am 20.06.2022. Es liegen somit 17 Tage zwischen Be- und Entladung. Nach der Demontage wurde der Speicher nicht geschlossen, sondern offen gelagert, so dass Feuchtigkeit an das Zeolith kommen konnte. Dieser Umstand verfälscht die Messergebnisse etwas, zeigt aber dennoch, dass der Speicher über den gesamten Zeitraum der Umpositionierung noch immer seine eingespeicherte Wärme zur Verfügung stellen kann.

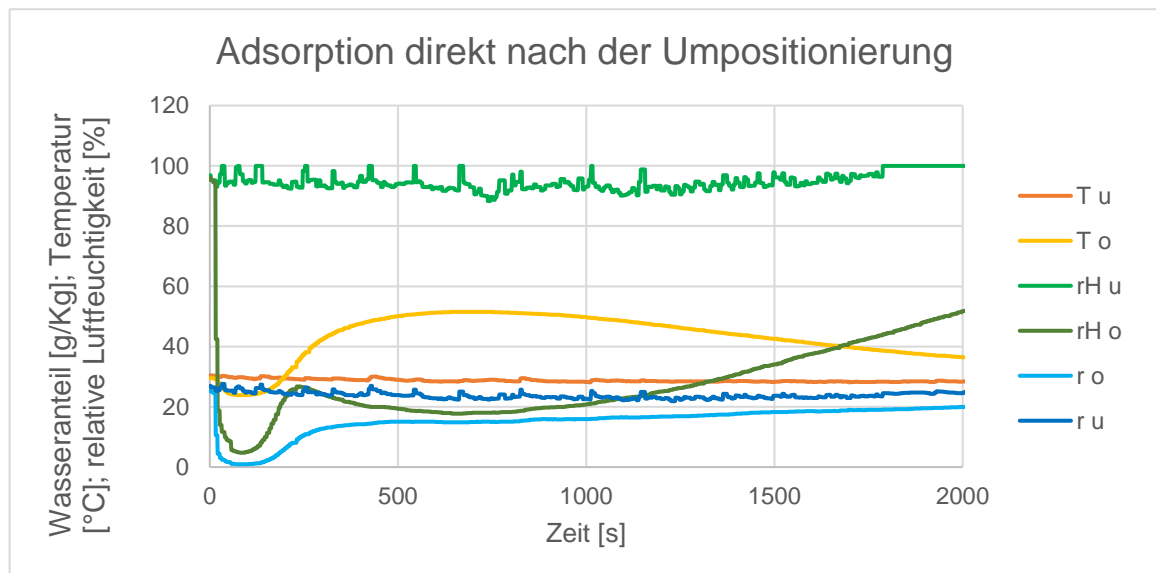


Abbildung 30: Entladung direkt nach der Umpositionierung

Es ist zu erkennen, dass die Eintrittstemperatur konstant bei um die 30°C bleibt. Die Temperatur am Ausgang hat zu Beginn die Temperatur der Eintrittstemperatur. Es fällt beim Verlauf der Austrittstemperatur auf, dass diese zu Beginn beim Entladen kurz fällt, bevor sie anfängt zu steigen. Begründen lässt sich dieser Sachverhalt durch eine niedrigere Temperatur im Speicher. Somit weisen die Luft und auch das Zeolith im Speicher Raumtemperatur auf.

Wenn nun durch den Dampferzeuger erwärmte wärmere Luft von unten durch den Speicher geleitet wird, wird die kühlere Luft, die sich im Speicher befindet, nach oben hinausgedrückt. Gleichzeitig muss das Zeolith sich sensibel auf die höhere Temperatur einstellen. Sobald dies geschehen ist, wird ein deutlicher Temperaturanstieg ersichtlich. Die maximale Temperaturerhöhung, die hierbei erreicht worden ist, liegt bei ungefähr 22°C. Es kommt dann wieder zu einem Anschmiegen an die Eintrittstemperatur.

Der Wassergehalt am Eintritt bleibt auf einem konstanten Wert. Anders der Wassergehalt am Austritt. Dieser sinkt zu Beginn stark ab, da das Zeolith das Wasser für den Adsorptionsprozess aufnimmt. Mit zunehmender Beladung steigt auch der Wassergehalt am Austritt. Dabei schmiegt sich dieser Verlauf an den Ausgangswert an.

Bei der relativen Feuchte stellt sich zum Schluss ein Wert von 100% ein. Dieser Wert ist unerwünscht und zu vermeiden. Leider war es erstmal nicht möglich diesen Wert herabzusenken. Trotz der Einstellung, keinen zusätzlichen Wasserdampf ins System hinzuzufügen, bleibt dieser Wert konstant bei 100%. Dargestellt wird dies in Abbildung 31.

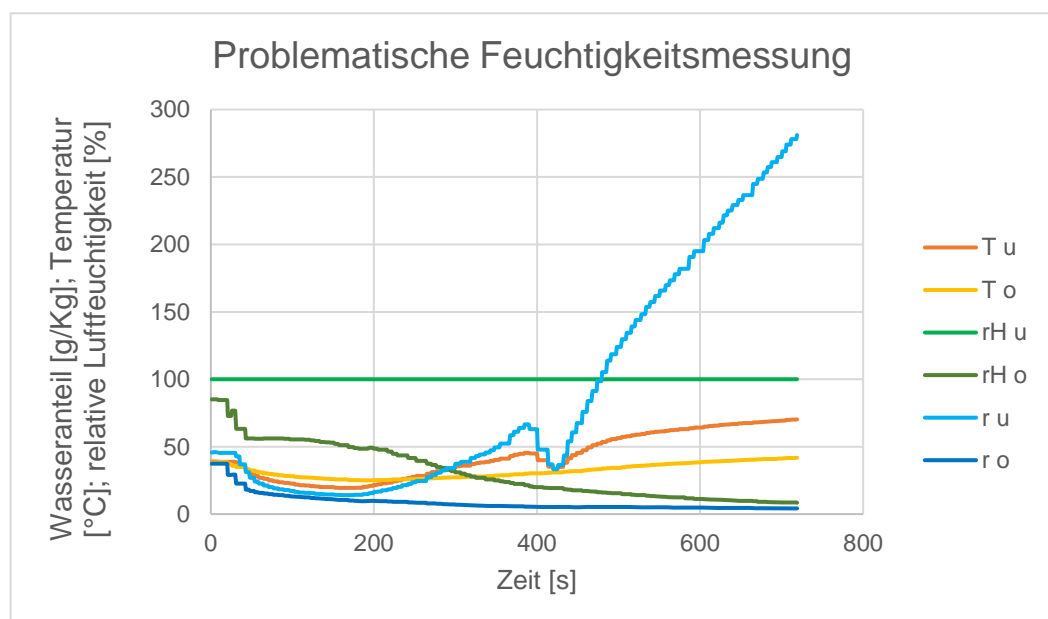


Abbildung 31: Problem bei der Feuchtigkeitsmessung

In der Abbildung ist zu erkennen, wie sich ein konstanter Feuchtigkeitsgehalt von 100% eingestellt hat. Gleichzeitig hat das Programm angezeigt, dass das Ventil, welches die Anlage mit Wasserdampf versorgt, geschlossen ist. Um den Feuchtigkeitsgehalt zu senken, wurde zusätzlich eine möglichst hohe Temperatur eingestellt. Der Wassergehalt fängt an zu steigen und erreicht bei ungefähr 400s sein lokales Maximum. Von dort sinkt der Wassergehalt etwas ab und steigt anschließend umso stärker. Da die Temperatur am Eintritt auf ein hohes Niveau gehalten wird, das Ventil des Dampferzeugers geschlossen anzeigt, wenig Kondensat sich am Kondensatablasshahn angesammelt hat (bei einem so hohen Wassergehalt ist viel Kondensat

zu erwarten) und die Luftfeuchtigkeit sowie der Wassergehalt am Austritt einen sehr niedrigen Wert aufweist, ist hierbei von einer fehlerhaften Messung auszugehen. Nach einiger Zeit hat sich das System aber wieder eingependelt und die erhobenen Messwerte waren wieder plausibel. Siehe hierzu Abbildung 32.

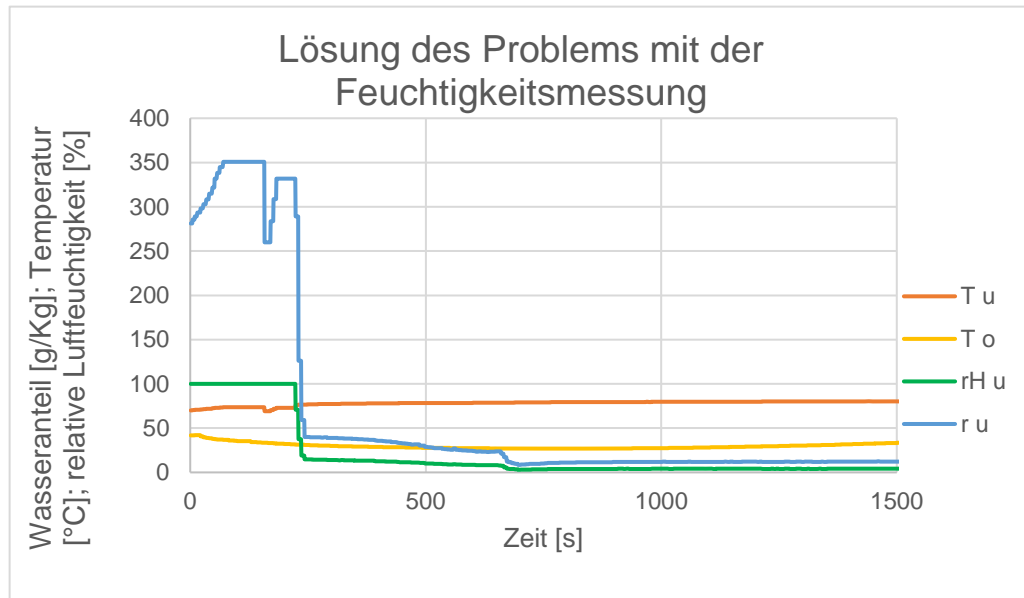


Abbildung 32: Darstellung der gelösten Problematik

Da diese Problematik nur einmal aufgetreten ist und die Feuchtigkeitsmessung vorher und nachher immer gut funktioniert hat, ist eine schadhafte Messstelle auszuschließen. Vermutet wird Kondensatansammlung an der fehlerhaften Messstelle, wodurch die falsche Messung bedingt wurde. Diese Vermutung erscheint auch insofern sinnvoll, da die Anlage mit hohen Flüchtigkeiten gearbeitet hat (siehe hierzu Abbildung 30).

### 6.2.2. Adsorptionsprozess nach der Umpositionierung

In der Abbildung 33 wird der Adsorptionsprozess nach der Umpositionierung dargestellt. Um später einen Vergleich ziehen zu können, wurde der Versuch nach den Vorgaben von Mehlaus durchgeführt. Der Luftmassenstrom wurde dabei auf  $2 \frac{g}{s}$  eingestellt und die relative Feuchtigkeit auf 80% gesetzt. [12]



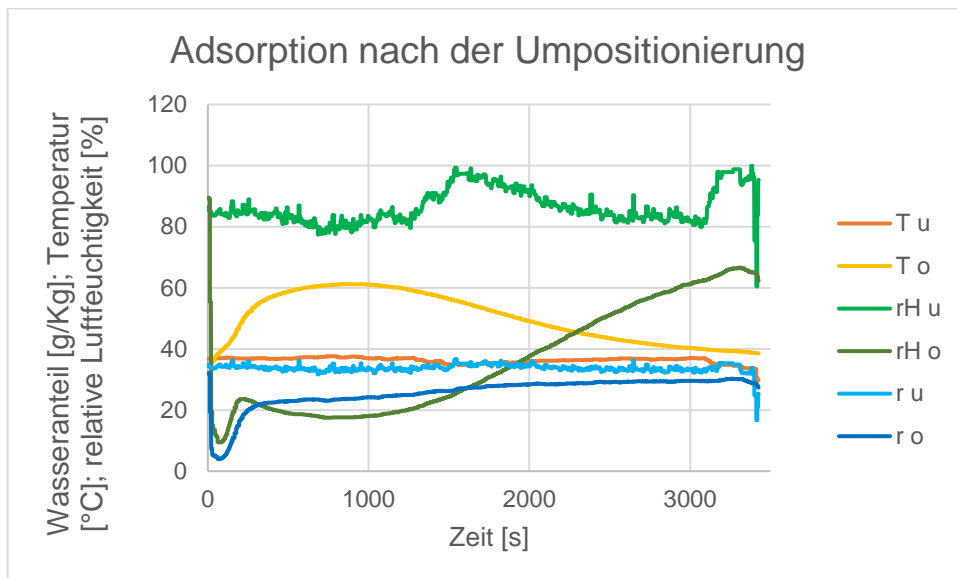


Abbildung 33: Adsorptionsvorgang nach der Umpositionierung

Es ist der zu erwartende Verlauf des Adsorptionsprozesses zu erkennen: Der Wassergehalt am Austritt nimmt ab und steigt mit der Zeit wieder an. Die Temperatur am Austritt nimmt zu Beginn stark zu und flacht dann mit der Zeit wieder ab.

### 6.2.3. Desorptionsprozess nach der Umpositionierung

In der Abbildung 34 wird der Desorptionsprozess nach der Umpositionierung dargestellt. Um später einen Vergleich ziehen zu können, wurde der Versuch nach den Vorgaben von Mehlaus durchgeführt. Der Luftmassenstrom wurde dabei auf  $2 \frac{g}{s}$  eingestellt und die Temperatur am Luftewärmer wurde auf 75°C gesetzt. [12]

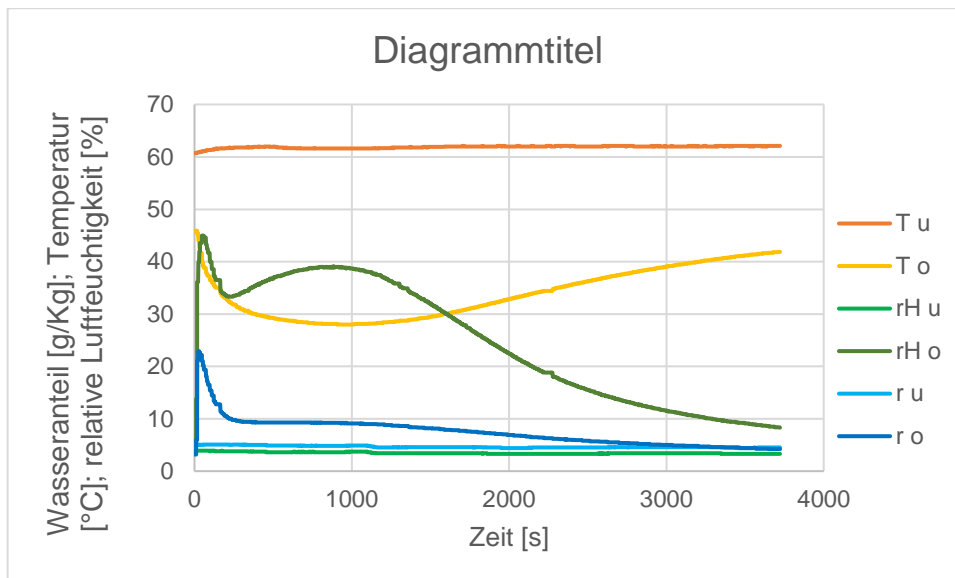


Abbildung 34: Desorptionsvorgang nach der Umpositionierung

Wie zu erkennen, stellt sich die eine Eintrittstemperatur von knapp über 60°C ein. Zu Beginn gibt es wieder einen Sprung des Wasseranteils am Austritt, ähnlich wie bei der Desorption nur dieses mal steigt der Wasseranteil. Begründet werden kann dies durch das im Speicher eingeschlossene Wasser und der hohen Luftfeuchtigkeit, welche nun rausgedrückt wird.

### 6.3. Vergleich der Messergebnisse vor und nach der Umpositionierung

Um einen aussagekräftigen Vergleich heranzuziehen, wird die Studienarbeit von Herrn Mehlaus aus dem Jahre 2021 herangezogen. Bei der Desorption wurde hierbei ein Luftmassenstrom von  $2 \frac{g}{s}$  und eine Temperatur am Luftewärmer von 75°C eingestellt. Durch die Wärmeverluste in den Rohrleitungen soll sich dadurch eine Temperatur von 60°C am Eintritt des Zeolitspeichers einstellen. Um den Zustand vor und nach der Umpositionierung vergleichen zu können, sollten möglichst dieselben Bedingung herrschen wie bei Mehlaus. Somit wird auch hier ein Luftmassenstrom von  $2 \frac{g}{s}$  und eine Temperatur von 75°C am Luftewärmer bei der Desorption eingestellt. Bei der Adsorption wird hingegen eine Temperatur auf 0 °C gestellt (es stellt sich dadurch die Umgebungstemperatur ein), der Luftmassenstrom bleibt auf  $2 \frac{g}{s}$  und es wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 80% eingestellt. Es werden hierbei die Messungen von Kapitell 6.2.2 und 6.2.3 herangezogen.

#### 6.3.1. Vergleich mit Mehlaus: Temperaturverlauf bei der Desorption

Es ist zu beobachten, dass sich nun ein Wert von knapp über 60°C einstellt. Laut Mehlaus sollte sich allerdings eine Temperatur von genau 60°C einstellen. Dies ist auch in den Messwerten von Mehlaus zu erkennen (Abbildung 36). Diese Temperaturerhöhung am

Eintritt ist auf eine höhere Umgebungstemperatur und auf das damit verbundene geringere treibende Potenzial der Wärmeverluste zurückzuführen. Es geht somit bei höherer Umgebungstemperatur weniger Wärme verloren. Die Umgebungstemperatur betrug zum Versuchszeitpunkt nach der Umpositionierung knapp 26°C, bei Mehlaus Versuchsdurchführung waren es ungefähr 18°C. [12]

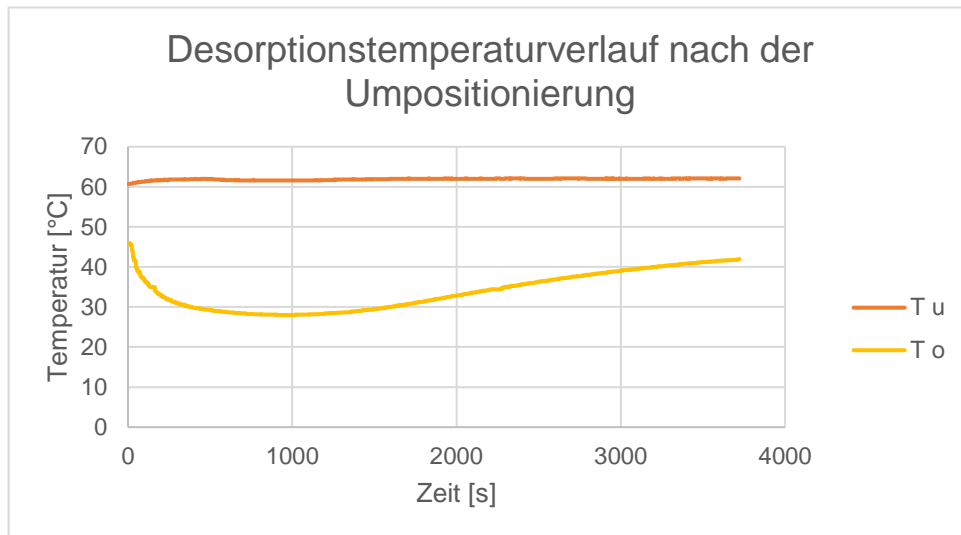


Abbildung 35: Temperaturverlauf nach der Umpositionierung bei der Desorption

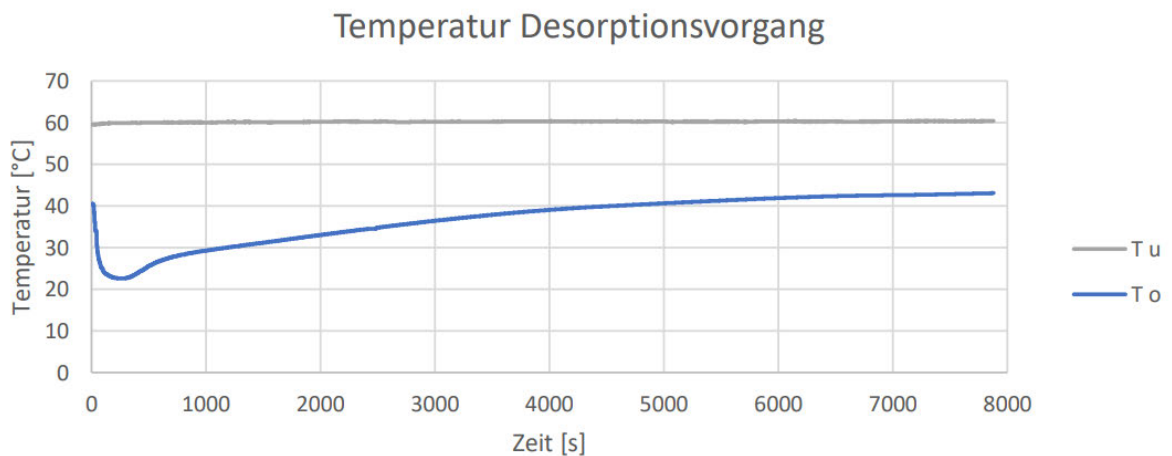


Abbildung 36: Temperaturverlauf von Mehlaus vor der Umpositionierung bei der Desorption

Es ist zu erkennen, wie die Temperatur am Austritt nach der Umpositionierung absinkt und nach ungefähr 1000s ihr Minimum erreicht. Von dort aus fängt die Temperatur wieder an zu steigen. Die Steigung flacht dabei immer weiter ab und schmiegt sich asymptotisch dem Ausgangswert an. Die Temperatur am Eintritt bleibt hierbei vor und nach der Umpositionierung bei annähernden konstanten 60°C. Es fällt allerdings auf, dass die Austrittstemperatur bei den

von Mehlaus gemessenen Werten bei 40°C liegt. Bei den Messwerten nach der Umpositionierung liegt die Austrittstemperatur allerdings bei ungefähren 45°C. Dies ist auch auf die höhere Umgebungstemperatur zurückzuführen. Auch stellen sich andere Werte ein, somit beträgt die minimale Temperatur von Mehlaus ca. 23°C und bei der Messung nach der Umpositionierung sind es ca. 28°C.

Bei der Betrachtung der Temperatur ist zudem zu erkennen, dass der Verlauf nach der Umpositionierung deutlich bauchiger ist als der von Mehlaus. Die aufgenommene Wärme ist dabei annähernd identisch und weist sogar eine leichte Verbesserung auf. Da dieses bauchige Verhalten auch vor der Umpositionierung zu erkennen ist (siehe Kapitel 6.1.2 Abbildung 29) ist ein Einfluss der Umpositionierungsmaßnahmen auf den Temperaturverlauf auszuschließen.

### 6.3.2. Vergleich mit Mehlaus: Wassergehalt bei der Desorption

Auch der Wassergehalt nach der Umpositionierung wurde mit den von Mehlaus gemessenen Werten verglichen. Dazu werden die jeweiligen Wassergehalte dargestellt: In Abbildung 37 der Wassergehalt nach der Umpositionierung und in Abbildung 38 der Wassergehalt, der von Mehlaus gemessen wurde.

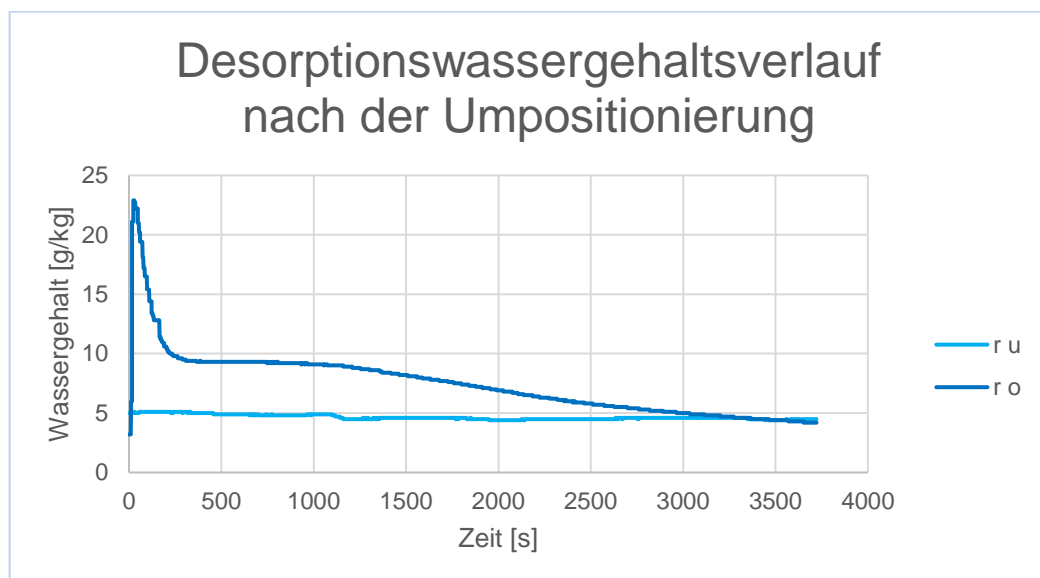


Abbildung 37: Verlauf des Wassergehalts nach der Umpositionierung bei der Desorption

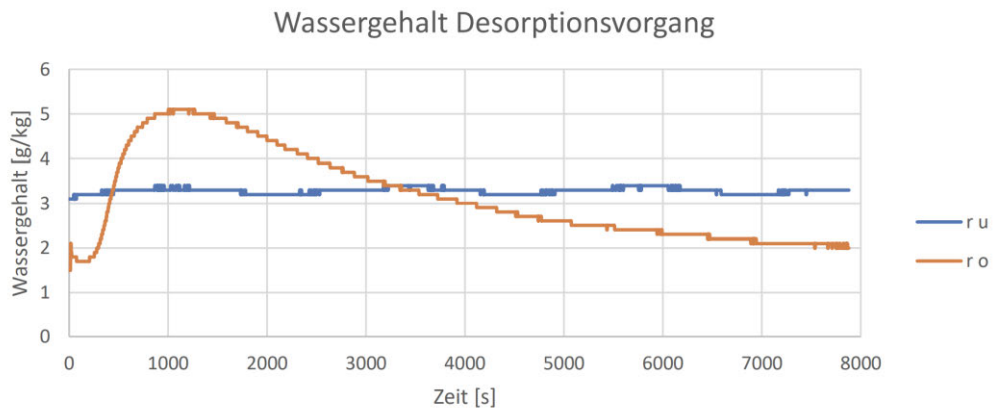


Abbildung 38: Verlauf des Wassergehalts vor der Umpositionierung von Mehlaus bei der Desorption

Bei der Messung nach der Umpositionierung (Abbildung 37) ist gleich zu Beginn ein starker und kurzer Sprung des Wassergehalts am Austritt zu erkennen. Der Wassergehalt am Austritt stabilisiert sich kurze Zeit später bei einem Wert von  $9,3 \frac{g}{kg}$  und nähert sich mit der Zeit wieder dem Ausgangswert an. Bei Mehlaus ist ein solcher sprunghafter Anstieg nicht zu erkennen. Der Wassergehalt steigt bis zu einem Maximum von  $5 \frac{g}{kg}$  und fällt dann wieder zum Ausgangswert zurück. Dabei wird ein maximaler Anstieg des Wassergehalts am Austritt von  $3 \frac{g}{kg}$  aufgenommen.

Der Wassergehalt am Eintritt ist dabei konstant auf einem niedrigen Niveau. Auch bei Mehlaus ist der Wassergehalt auf einem konstant niedrigen Niveau. Hierbei ist der Wassergehalt noch niedriger als bei der Messung nach der Umpositionierung.

### 6.3.3. Vergleich mit Mehlaus: Temperatur bei der Adsorption

Hierbei wurde der Temperaturverlauf während des Adsorptionsprozesses verglichen. Der Temperaturverlauf nach der Umpositionierung wird dabei in der Abbildung 39 und der Temperaturverlauf von Mehlaus in der Abbildung 40 aufgezeigt.

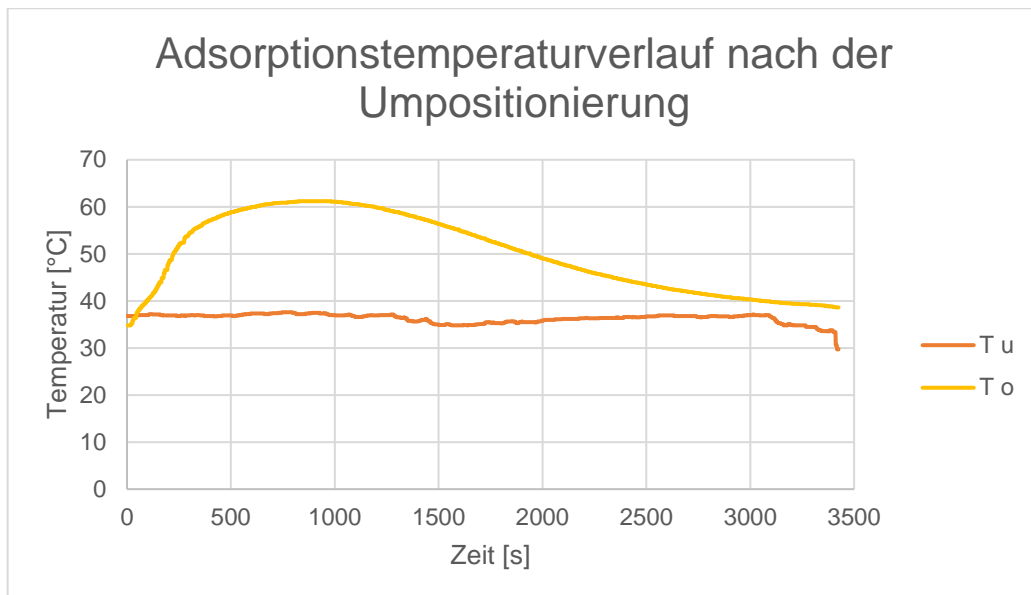


Abbildung 39: Temperaturverlauf nach der Umpositionierung bei der Adsorption

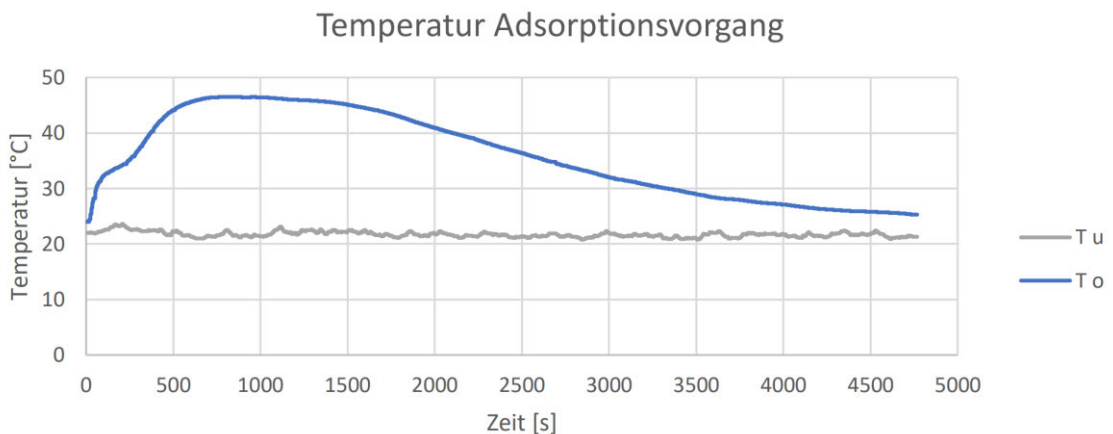


Abbildung 40: Temperaturverlauf von Mehlaus bei der Adsorption

Es ist ein sehr ähnlicher Temperaturverlauf zu erkennen. Die Eintrittstemperatur bleibt bei beiden konstant und die Austrittstemperatur steigt zu Beginn steil an bis sie ihr Maximum erreicht. Von dort an sinkt die Temperatur und schmiegt sich an den Ausgangswert an. Auch die Temperaturdifferenz zwischen Ausgangswert und Maximum beträgt nahezu bei beiden 25°C. Einzig die Temperaturen sind unterschiedlich. Somit weist der Adsorptionsprozess nach der Umpositionierung eine höhere Temperatur auf als die von Mehlaus. Dies ist auf die höhere Umgebungstemperatur während der Versuchsdurchführung zurückzuführen.

#### 6.3.4. Vergleich mit Mehlaus: Wassergehalt bei der Adsorption

Analog zum Vergleich des Wassergehalts bei der Desorption wird nun der Verlauf des Wassergehalts bei der Adsorption in den Abbildungen 41 und 42 dargestellt.

## Verlauf des Wassergehalts nach der Umpositionierung bei der Adsorption

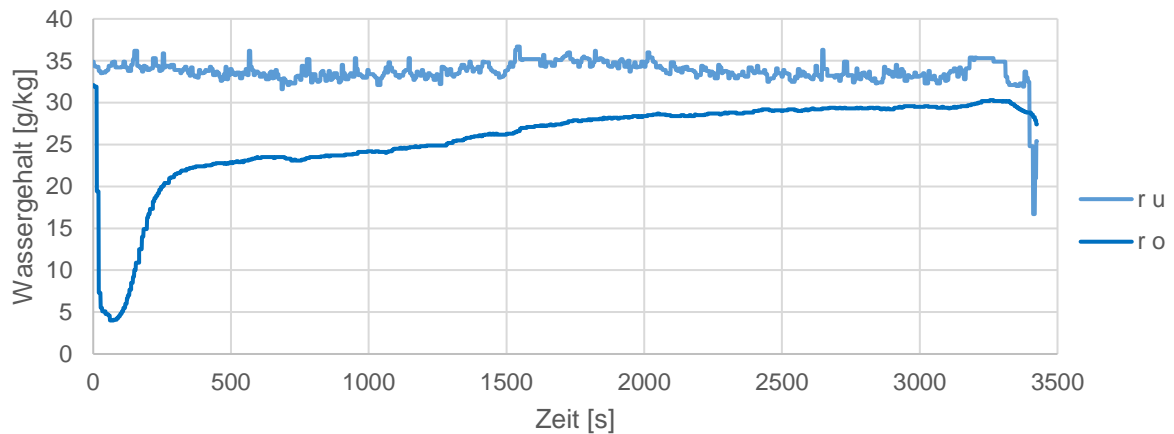


Abbildung 41: Verlauf des Wassergehalts nach der Umpositionierung bei der Adsorption

## Wassergehalt Adsorptionsvorgang

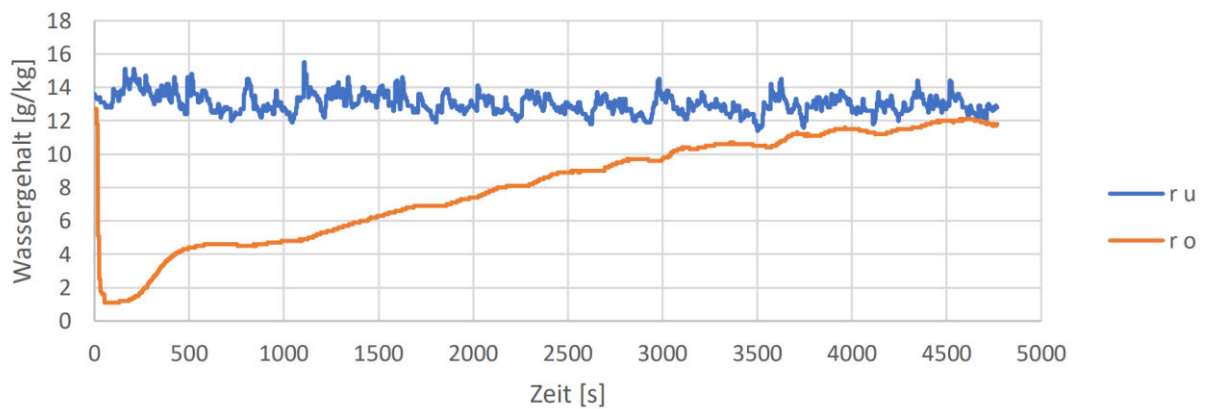


Abbildung 42: Verlauf des Wassergehalts von Mehlaus bei der Adsorption

Ähnlich wie bei der Desorption stellt sich bei der Adsorption nach der Umpositionierung zu Beginn ein kurzer sprunghafter Abfall des Wassergehalts ein, dieses mal aber in die entgegengesetzte Richtung. Es stellt sich beim Zurückspringen ein stabiler Verlauf ein. Auch bei den Messwerten von Mehlaus ist ein sprunghafter Abfall des Wassergehaltes zu erkennen. Dieser fällt allerdings deutlich geringer aus und springt auch nicht so deutlich zurück, sondern erreicht dort einen stabilen Wert. Wenn man diese sprunghaften Reaktionen und den höheren Wassergehalt vernachlässigt, sind die Verläufe nahezu identisch. Auch die aufgenommene Wassermenge ist dann ebenfalls identisch.



Es fällt jedoch auf, dass der Wassergehalt deutlich höher ist als bei dem Versuch von Mehlaus. Eine Begründung für den höheren Wassergehalt ist in der höheren Umgebungstemperatur begründet. Da eine relative Luftfeuchte von 80% eingehalten wird und die Lufttemperatur höher ist, kann die Luft auch mehr Wasser aufnehmen. Dadurch benötigt es einen höheren Wassergehalt in der Luft, um die 80% zu erreichen. Das wird im  $h_{1+x}$ -Diagramm in der Abbildung 43 verdeutlicht.

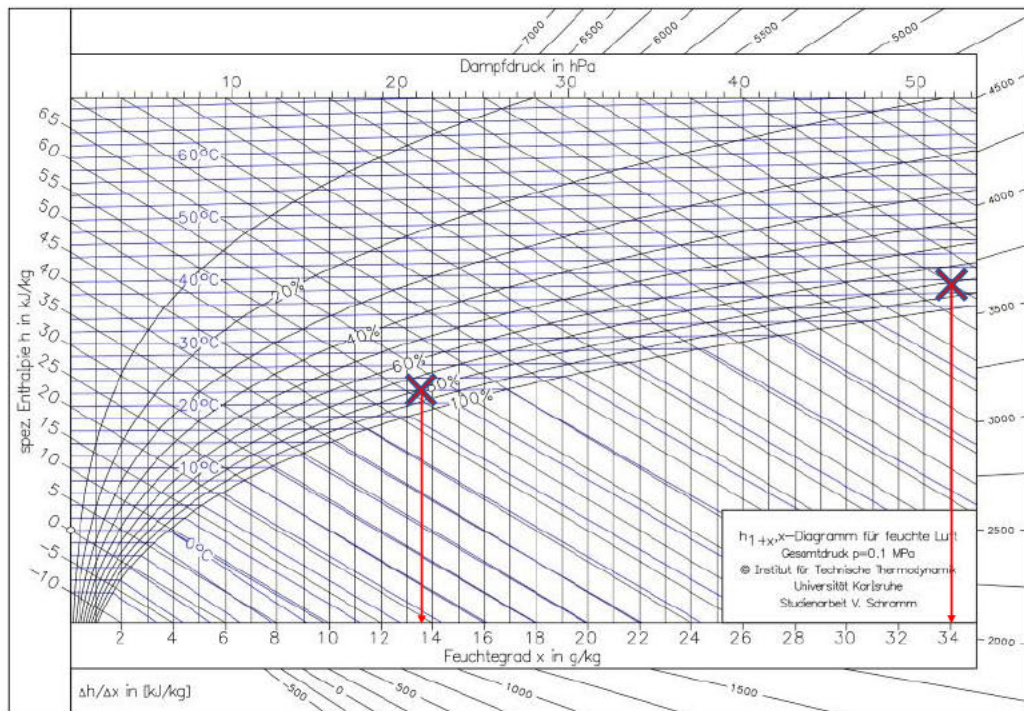


Abbildung 43:  $h_{1+x}$  Diagramm zum Einfluss der Umgebungstemperatur

Der Zusammenhang der verschiedenen Wassergehalte von der Temperatur ist somit deutlich zu erkennen. Es stellt sich somit bei einer 80%-igen Luftfeuchte und einer Temperatur von 22°C ein Wassergehalt von  $13,5 \frac{g}{kg}$  ein und bei einer Temperatur von 38°C ein Wassergehalt von  $34 \frac{g}{kg}$  ein. Diese Werte entsprechen den gemessenen Werten und es wird dadurch verdeutlicht, welchen Einfluss die Temperatur auf den Wassergehalt bei der Durchführung des Versuchs hat.



#### 6.4. Einordnung der Ergebnisse des Vergleiches

Auffällig ist der große Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Messdaten. Um einen noch qualifizierteren Vergleich durchführen zu können, sollten die Eintrittsparameter (Temperatur, Wassergehalt) während des Sorptionsvorgangs identisch mit den Werten von Mehlaus sein. Der begrenzende Faktor ist dabei die Umgebungstemperatur. Da es keine Kühleinheit gibt, ist eine Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur nicht möglich. An heißen Sommertagen kann die Umgebungstemperatur über 25°C betragen, wodurch der Temperaturbereich, in der die Anlage arbeiten kann, eingeschränkt wird. Die größten Auffälligkeiten sind die großen Sprünge beim Wassergehalt zu Beginn des Adsorptions- bzw. Desorptionsvorgangs. Dies ist auf die im Speicher eingeschlossene Luft zurückzuführen, die beim Öffnen des Ventiles fluchtartig den Speicher verlässt und somit einen Einfluss auf die Messung hat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Versuchsstand funktionsfähig ist und keine erheblichen Veränderungen festzustellen sind. Es konnten sogar einige leichte Verbesserungen der Aufnahme- bzw. Abgabeeigenschaften nach der Umpositionierung festgestellt werden. Hierauf wird in Kapitel 7.4 noch genauer eingegangen.

## 7. Analyse des Betriebsverhaltens

Um sicherzustellen, dass die Anlage nach der Umpositionierung auch funktionsfähig ist, wurde das Betriebsverhalten genauer untersucht. Dabei sind verschiedene Zustände eingestellt worden, die dann anschließend abgefahren wurden. Spezielles Augenmerk galt hierbei der Temperaturregelung und der Regelung des Dampferzeugers.

### 7.1. Temperaturregelung am Eintritt

Um die Temperaturregelung des Versuchsstands zu untersuchen sind verschiedene Soll-Temperaturen eingestellt worden. Untersucht wurden die jeweiligen Temperaturen am Eintritt und am Austritt mit der dazugehörigen Soll-Temperatur. Dabei wurde der Speicher geschlossen, so dass die Luft durch den Bypass strömt. Der Massenstrom beträgt dabei  $2 \frac{g}{s}$ . Der Temperaturverlauf bei den verschiedenen Soll-Temperaturen wird in Abbildung 44 dargestellt.

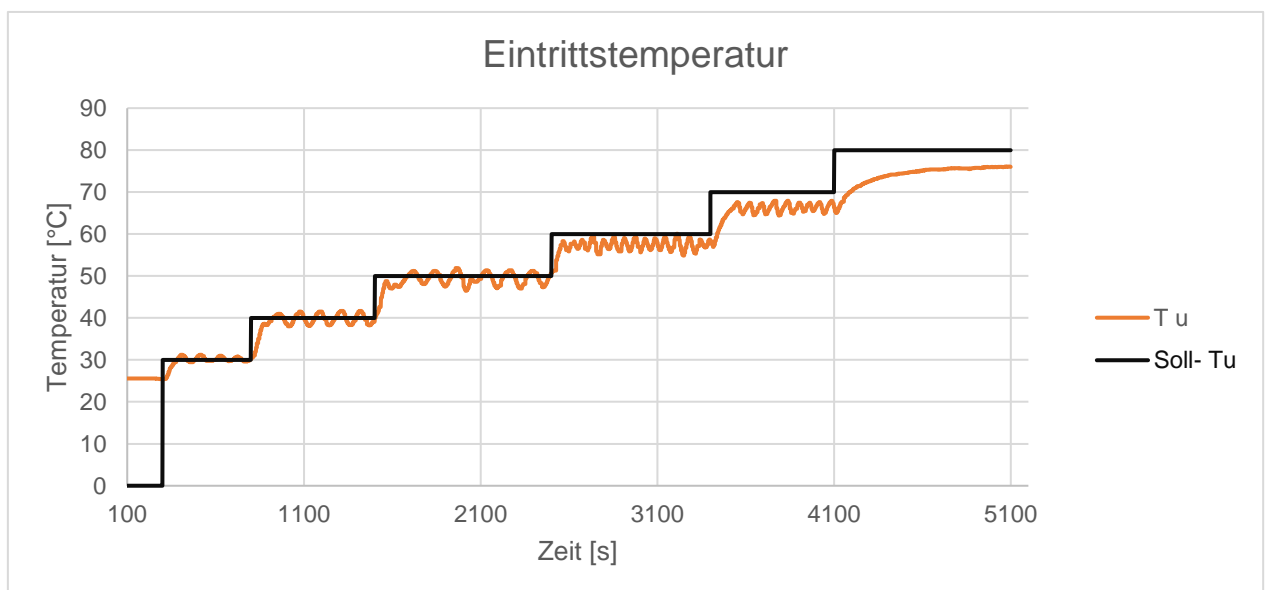


Abbildung 44: Darstellung der Regelung der Ist-Temperatur am Eintritt

Eingestellt wurden die Soll-Temperaturen 30°C; 40°C; 50°C; 60°C; 70°C; und 80°C.

Bei der Soll-Temperatur von 30 °C kommt es zu einem leichten Überschwingen. Es stellt sich ein Schwingen um die Soll-Temperatur von 30°C ein. Die Abweichung über den Sollwert beträgt dabei etwa 1°C und die Abweichung unterhalb der Soll-Temperatur etwa 0,5°C.

Bei der eingestellten Soll-Temperatur von 40°C ist ein leicht stärkeres Schwingen um den Sollwert zu beobachten. Die Abweichung oberhalb des Sollwertes beträgt dabei 1,7°C und die Abweichung unterhalb des Sollwertes 1,8°C.

Bei einer Soll-Temperatur von 50°C stellt sich ebenfalls ein Schwingen ein. Dabei verschiebt sich allerdings der Mittelwert des Schwingens unterhalb der Soll-Temperatur. Die Abweichungen betragen dabei +1,4°C und -2,9°C.

Bei einer Soll-Temperatur von 60°C wird ein deutlicher Anstieg der Frequenz ersichtlich. Es stellt sich ebenfalls eine Schwingung ein. Allerdings wird dieses mal der Sollwert nicht erreicht.

Bei einer Soll-Temperatur von 70°C schwingt die Temperatur mit einem deutlichen Abstand zur Soll-Temperatur.

Um auch den Temperaturverlauf bei einer Soll-Temperatur von 80°C beschreiben zu können, wurden noch zusätzliche Messwerte aufgenommen. Diese werden in Abbildung 45 dargestellt. Dabei schwingt die Temperatur nicht mehr und es kommt immer mal wieder zu einem leichten Einknicken der Temperatur. Auch hier ist eine Abweichung von der Soll-Temperatur zu erkennen.

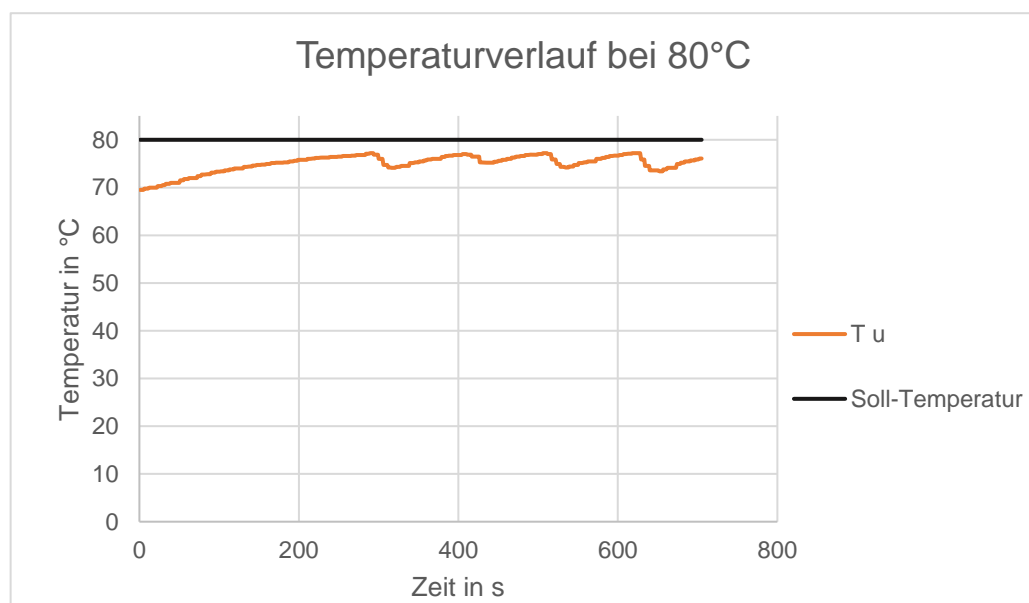


Abbildung 45: Darstellung der Regelung der Ist-Temperatur am Eintritt bei 80°C

Temperaturen deutlich oberhalb von 80°C konnten nicht erreicht werden, da die Luft am Luftherwärmer nicht über 100°C steigen soll und durch die Rohrleitungen Wärmeverluste an die Umgebung abgegeben werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit zunehmender Temperatur die Ist-Temperatur weiter von der Soll-Temperatur abweicht. Dies hat im späteren Versuchsverlauf

nicht nur einen Einfluss auf den Temperaturverlauf, sondern auch auf den Wassergehalt und somit auf den ganzen Sorptionsvorgang. Das Schwingen ist zwar unschön, stellt aber wegen der geringen und gleichbleibenden Amplitude und den daraus ergebenden Mittelwert keine signifikante Störung des Sorptionsprozesses dar.

## 7.2. Temperaturregelung am Austritt

Analog zum vorherigen Kapitel wird nun die Regelung der Austrittstemperatur untersucht. Hierbei wurde die Luft über den Bypass geleitet und ein Massenstrom von  $2 \frac{g}{s}$  eingestellt. Durch die größere Entfernung der Messstelle für die Austrittstemperatur und dadurch bedingte größere Verzögerung der Regelung, sollte sich die Temperaturregelung am Austritt schwieriger gestalten als die am Eintritt. Die gemessene Ist- Temperatur am Eintritt und am Austritt sowie die Solltemperatur am Austritt wird in der Abbildung 46 dargestellt:

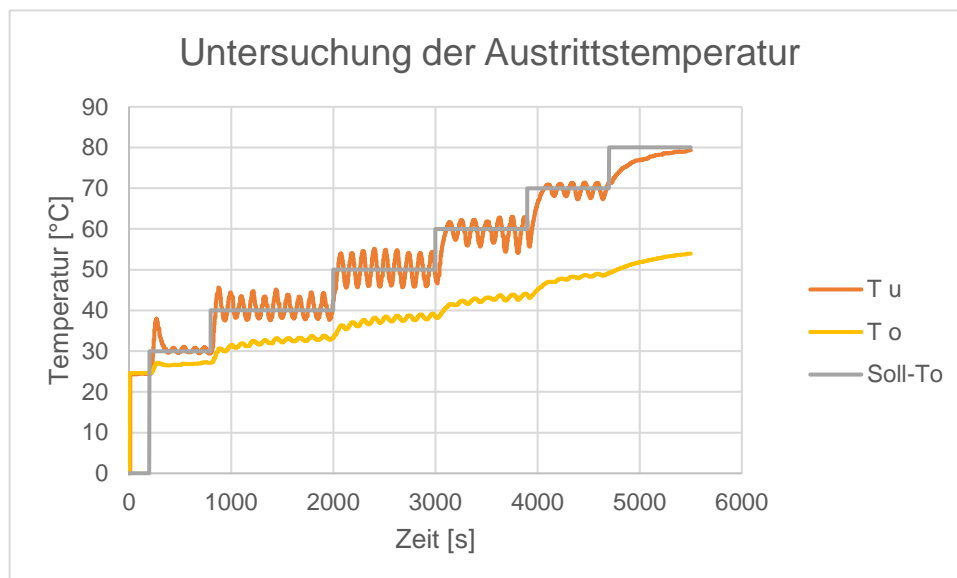


Abbildung 46: Darstellung der Regelung für die Ist-Temperatur am Austritt

Hierbei werden verschiedene Soll-Temperaturen eingestellt. Es wird untersucht, wie sich die Temperaturverlauf verhält. Bei der Betrachtung der Messergebnisse (Abbildung 46) wird deutlich, dass die eingestellten Temperaturen am Austritt nicht erreicht werden. Es stellt sich somit stetig ein Wert unterhalb der Soll--Temperatur ein.

Bei der Betrachtung der Eintrittstemperatur fällt auf, dass diese zu Beginn, als 30°C eingestellt worden sind, stark nach oben schnell und dann um die Temperatur von 30°C schwingt. Es wird auch deutlich, dass die Eintrittstemperatur immer um die Soll-Temperatur schwingt und im Vergleich mit der Untersuchung der Eintrittstemperatur im Kapitel 6.5.1 keine Regeldifferenz zu erkennen ist. Die Amplituden der Schwingungen fallen allerdings stärker

aus. Somit wird die Eintrittstemperatur, was die Regeldifferenz angeht, besser geregelt, wenn eigentlich die Ausgangstemperatur geregelt werden soll. Dieses Verhalten ist so nicht gewollt.

Da zuerkennen ist, dass die Austrittstemperatur im Laufe der Zeit minimal steigt und diese Differenz zwischen Soll-Temperatur und Ist-Temperatur nicht doch noch irgendwann, z.B. durch die Erwärmung der Rohrleitungen, erreicht wird, wurde zusätzlich das Regelverhalten in umgekehrter Reihenfolge mit immer niedrigeren Soll Temperaturen untersucht. Dies wird in Abbildung 47 dargestellt.

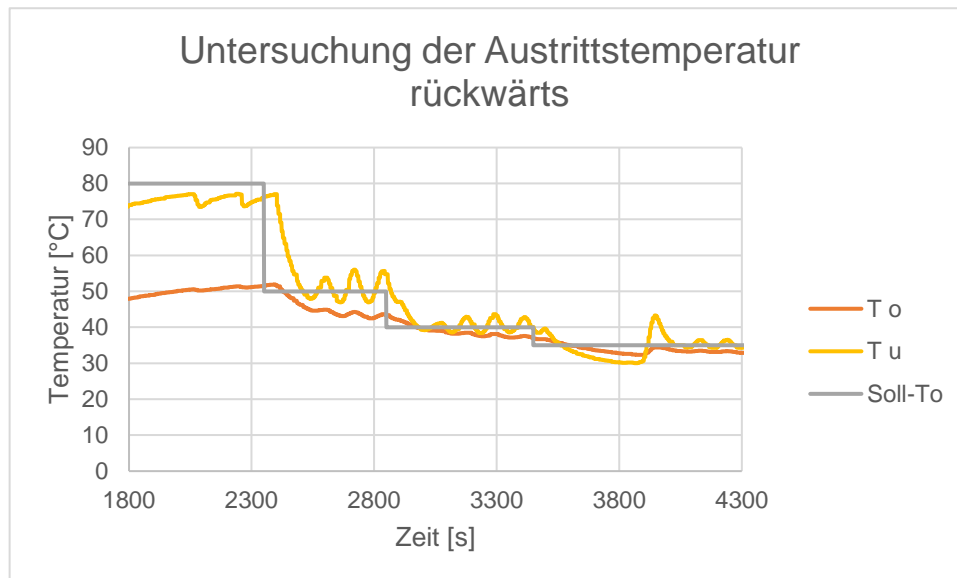


Abbildung 47: Darstellung der Regelung für die Temperatur am Austritt in umgekehrter Reihenfolge

Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie zuvor. Die Soll-Temperatur am Austritt wird nicht von der Austrittstemperatur erreicht und die Eintrittstemperatur schwingt um die Soll-Temperatur. Somit ist auszuschließen, dass nach einiger Zeit die Rohrleitungen warm genug geworden sind, um die Soll-Temperatur am Ausstieg doch noch zu erreichen.

Vermutet wird ein Fehler in der Programmierung, so dass Bezug auf die Eintrittstemperatur und nicht auf die Ausgangstemperatur genommen wird. Auch ist die Sinnhaftigkeit einer Regelung der Austrittstemperatur hinter dem Zeolithen zu überdenken.

### 7.3. Luftfeuchtigkeitsregelung

Die Besonderheit bei dem Dampferzeuger ist, dass dieser gesteuert und geregelt werden kann. Somit kann die Klappenstellung eingestellt werden, aber auch die relative Luftfeuchtigkeit am Eintritt soll dabei geregelt werden können. Die Feuchtigkeitsregelung stellt hierbei die größte Herausforderung dar. Nach der Umpositionierung wurden verschiedene Einstellungen der relativen Feuchte durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Anlage zu untersuchen. In Abbildung 48 wird die relative Feuchte am Eintritt und der dazugehörige Sollwert dargestellt.

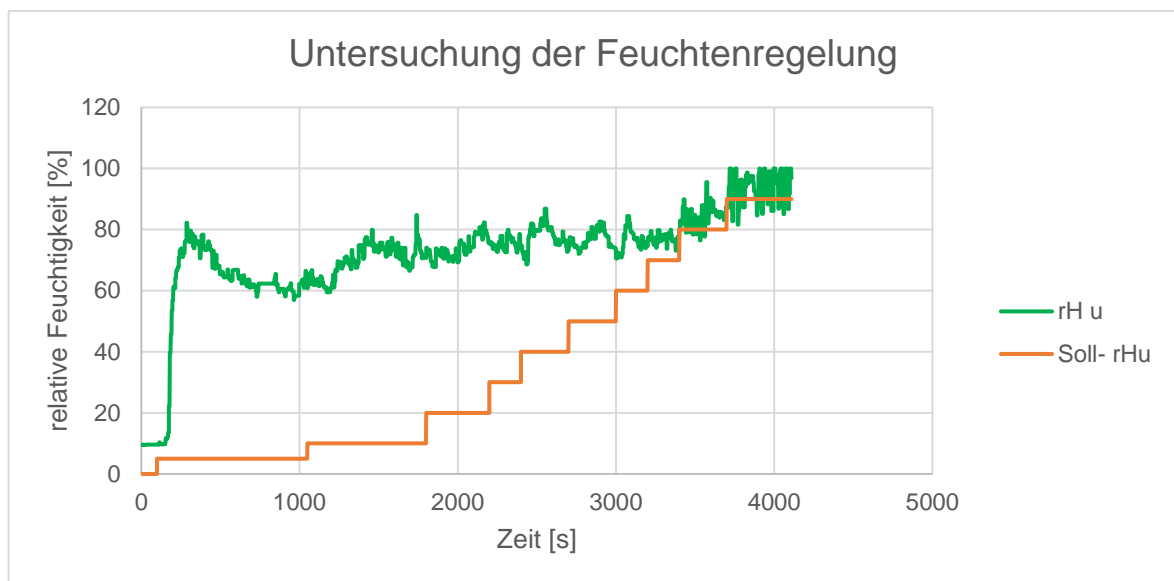


Abbildung 48: Darstellung des Regelverhaltens bei verschiedenen Soll-Werten

Begonnen hat die Untersuchung mit einem eingestellten Soll-Wert von 5%. Sobald dieser Wert eingestellt worden ist, öffnet sich das Regelventil vom Dampferzeuger und die Luftfeuchtigkeit steigt stark an. Es stellt sich eine relative Feuchtigkeit von deutlich über 5% ein. Dasselbe gilt für alle Werte bis 70%. Dabei macht es für die Regelung keinen Unterschied, ob die eingestellte Soll-Feuchtigkeit 5% oder 70% beträgt. Die Anlage ist nicht in der Lage die relative Feuchtigkeit zu drosseln. Das Ventil öffnet sich kurz und bleibt größtenteils geschlossen. Erst ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80% ist der Regler in der Lage, den Sollwert zu erreichen. Die relative Feuchtigkeit schwankt während des gesamten Versuchs ständig.

Somit ist es nicht möglich von dem Versuchsstand mit einem eingestellten Feuchtegehalt von unter 70% relativer Feuchte verlässliche Messwerte zu erhalten. Da es auch vor der Umpositionierung Probleme mit der Feuchtigkeitsregelung gab, ist ein Einfluss durch die Umpositionierungsmaßnahmen auf die Feuchtigkeitsregelung nicht ersichtlich. Diese ist in Abbildung 28 zu sehen. Um diese Problematik zu lösen kann überlegt werden, einen leistungsschwächeren Dampferzeuger zu verwenden, somit könnte das Ventil länger offenbleiben und die Feuchtigkeit würde langsamer steigen, wodurch speziell niedrigere

Temperaturen besser angesteuert werden können. Auch stellt sich dabei ein nicht so hoher Sprung der Feuchtigkeit ein.

#### 7.4. Wasserbilanzierung

Um zu ermitteln wie viel Wasser bei dem Adsorptionsprozess aufgenommen wird und wie viel bei der Desorption abgegeben wird, muss zuerst bestimmt werden, welche Wassermenge ins System einströmt und welche Wassermenge aus dem System herausströmt. Da der Wassergehalt  $r_u$  und der Massenstrom der trockenen Luft  $\dot{m}_l$  bekannt sind, kann dies mit folgender Formel bestimmt werden.

Für den Wassermassenstrom am Eintritt  $\dot{m}_{w,u}$  gilt somit:

$$\dot{m}_l(t) \cdot r_u(t) = \dot{m}_{w,u}(t) \quad (7.1)$$

Am Austritt gilt:

$$\dot{m}_l(t) \cdot r_o(t) = \dot{m}_{w,o}(t) \quad (7.2)$$

Die Differenz aus dem einströmenden Wasser und dem ausströmenden Wasser gibt die eingespeicherte Wassermasse bzw. die abgegebene Wassermenge für einen betrachteten Wert wieder. Um den gesamten Wassergehalt der Anlage zu betrachten, muss dies noch mit der Zeit integriert werden. Somit ergibt sich für die aufgenommen e bzw. abgegebene Wassermasse  $m_{w,sp}$  folgende Formel:

$$\int_{t_0}^{t_{ende}} (\dot{m}_{w,o}(t) - \dot{m}_{w,u}(t)) dt = m_{w,sp} \quad (7.3)$$

Grafisch kann die Desorption wie in den Abbildungen 49 und die Adsorption wie in Abbildung 50 beschrieben werden.

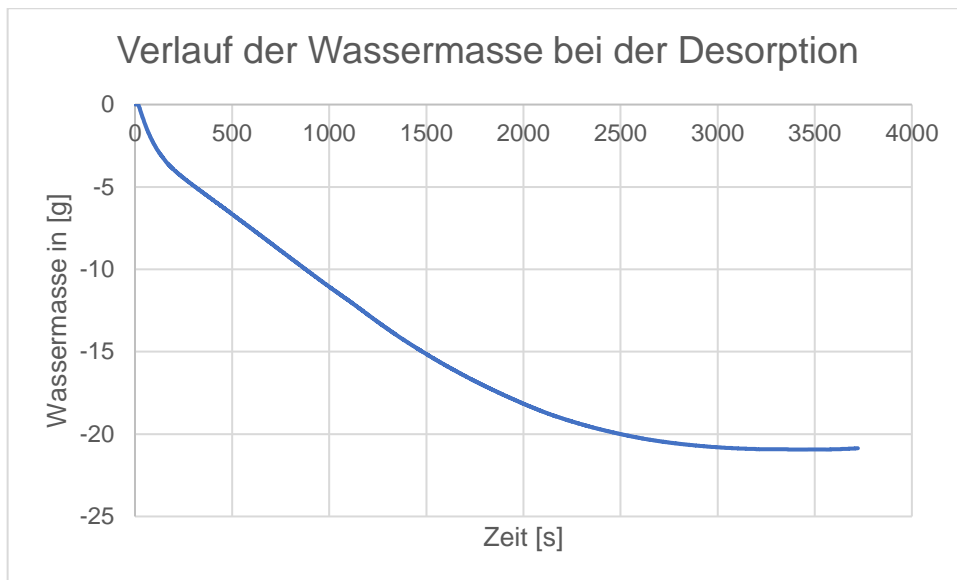


Abbildung 49: Darstellung der abgegebenen Wassermassen bei der Desorption

In Abbildung 49 ist zu erkennen, dass der Wassergehalt im Speicher bei der Desorption mit der Zeit immer weiter abflacht und bei einem Wert von knapp unter -20g nicht mehr steigt. Bei diesem Desorptionsvorgang wurde somit rund 20g Wasser abgegeben. Zum Vergleich bei Mehlaus waren es nur 14g. Somit konnte nach der Umpositionierung mehr Wasser abgegeben werden.

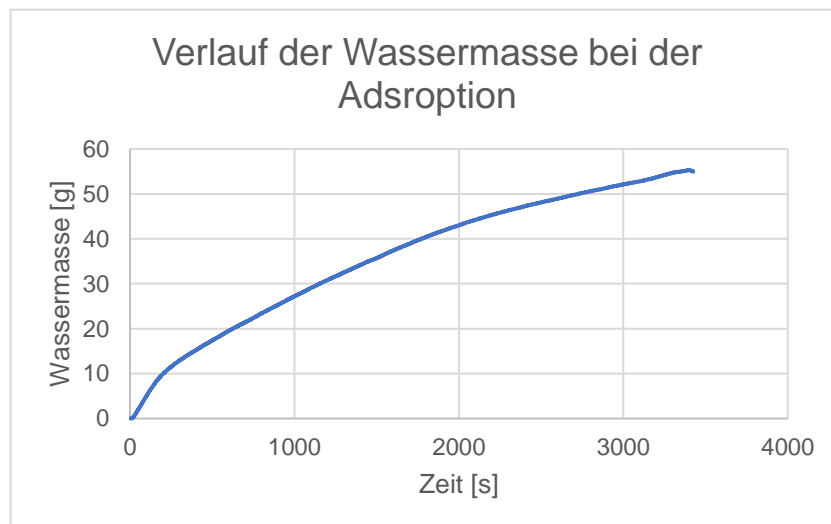


Abbildung 50: Darstellung der aufgenommenen Wassermasse während der Adsorption

Die Abbildung 50 beschreibt die aufgenommene Wassermasse bei der Adsorption. Es ist zu erkennen, dass sich kein fester Wert eingestellt hat und der Adsorptionsprozess noch nicht ganz abgeschlossen zu sein scheint. Es wird sich hierbei ein Wert von über 55g einstellen.



Zum Vergleich: Mehlaus hatte bei seiner Auswertung eine Wassermasse von unter 50g angegeben. [12]

Theoretisch muss die abgegebene Wassermenge gleich der eingespeicherten Wassermasse sein. Dies ist hier nicht der Fall, was aufzeigt, dass die Messung nicht genau ist. Auch bei Mehlaus gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen aufgenommener Wassermasse bei der Adsorption und abgegebener Wassermasse bei der Desorption.

## 7.5. Bestimmung der Wärmemenge

Um eine Aussage bezüglich der eingespeicherten Wärmeenergien beim Sorptionsprozess treffen zu können, werden die Zustände am Eintritt und am Austritt miteinander verglichen.

Für die trockene Luft gilt dabei folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_L(t) = \dot{m}_L(t) \cdot c_{p,l}(T_0(t) - T_u(t)) \quad (7.4)$$

Für das Wasser gilt analog folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_w(t) = \dot{m}_{w;o}(t) \cdot c_{p,d} \cdot T_0(t) - \dot{m}_{w;u}(t) \cdot c_{p,d} \cdot T_u(t) \quad (7.5)$$

In Kapitel 7.4 wurde bereits beschrieben, wie  $\dot{m}_{0;w}$  und  $\dot{m}_{u;w}$  berechnet werden können. Um nun den gesamten Wärmestrom, der bei der Desorption bereitgestellt wird, zu bestimmen, kann der Wärmestrom der trockenen Luft mit dem Wärmestrom des Wassers addiert werden. Dies wird im Folgenden beschrieben:

$$\dot{Q}_{ges}(t) = \dot{Q}_w(t) + \dot{Q}_L(t) \quad (7.6)$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{ges}(t) = \dot{m}_{0;w}(t) \cdot c_{p,d} \cdot T_0(t) - \dot{m}_{u;w}(t) \cdot c_{p,d} \cdot T_u(t) + \dot{m}_L(t) \cdot c_{p,l}(T_0(t) - T_u(t)) \quad (7.7)$$

Hierbei ergibt sich für den Wärmestrom bei der Desorption der in der Abbildung 51 dargestellte Verlauf.

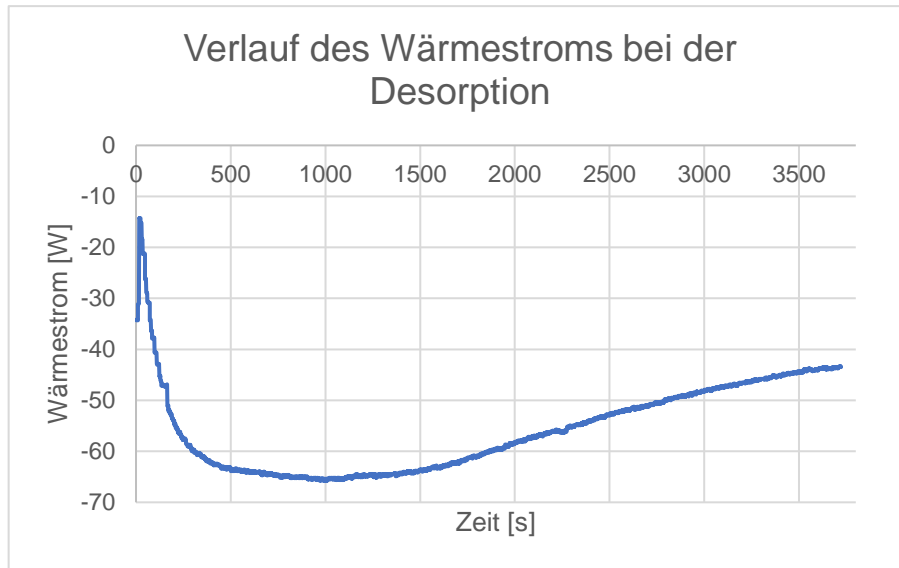


Abbildung 51: Darstellung des Wärmestroms bei der Desorption

Am Vorzeichen ist zu erkennen, dass Wärme aus der durchströmenden Luft entzogen wird. Es bildet sich der zu erwartende Verlauf. Nach der Sprungreaktion fällt die Funktion bis zu einem Wert von knapp unter  $-60 \frac{J}{s}$ . Mit zunehmender Beladung steigt dieser Wert wieder an und schmiegt sich asymptotisch seinem Ausgangswert an. Zu erwarten ist allerdings ein Anschmiegen an den Null-Wert. Dieses ist auf die Wärmeverluste zurückzuführen, die mit in die Rechnung einfließen. Erkennen lässt sich dies durch die Temperaturdifferenz im eingeschwungenen Zustand. Es ergeben sich hierbei eine Eintrittstemperatur von  $62^{\circ}\text{C}$  und eine Austrittstemperatur von  $42^{\circ}\text{C}$ . Dies ist in Abbildung 34 zu erkennen.

Durch Rausziehen der Wärmeverluste stellt sich der in Abbildung 51 für den Desorptionsvorgang dargestellte Verlauf ein.

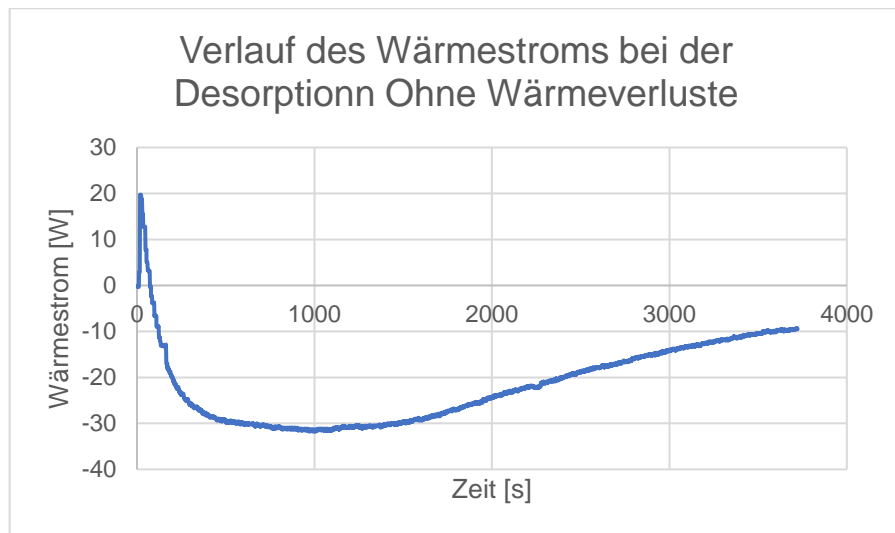


Abbildung 52: Darstellung des Wärmestroms bei der Desorption ohne Wärmeverluste

Es stellt sich hierbei der zu erwartende Verlauf ein und es kommt zum Anschmiegen an den Nullwert.

Bei der Adsorption ergibt sich für den Wärmestrom der in der Abbildung 53 dargestellte Verlauf.

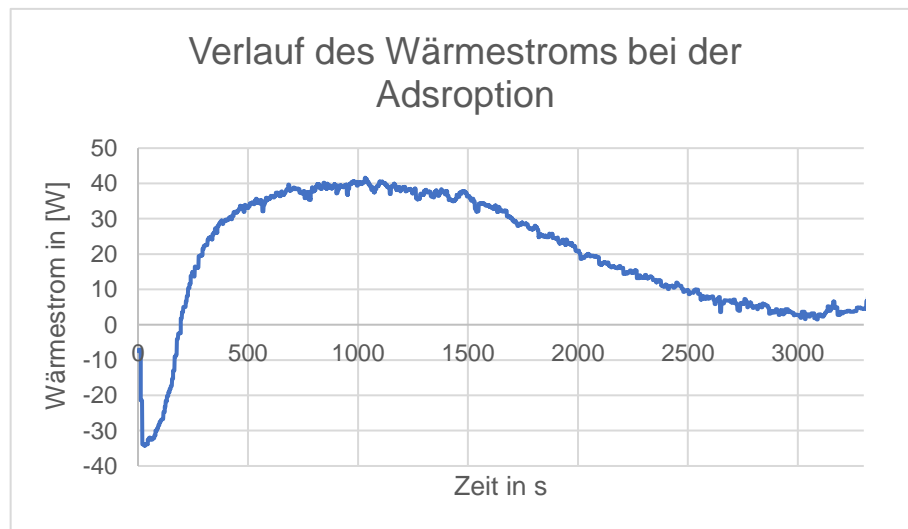


Abbildung 53: Darstellung des Wärmestroms bei der Adsorption

Nach dem negativen Anfangssprung steigt der Verlauf des Wärmestroms. Am Vorzeichen lässt sich erkennen, dass der durchströmenden Luft Wärme zugefügt wird. Der Verlauf steigt an, flacht an seinem Maximum ab und schmiegt sich an den Nullwert an.

Wird dies noch über die Zeit integriert, ergibt sich die zugeführte Wärmemenge. Beschrieben werden kann dies wie folgt:

$$Q = \int_{t_0}^{t_{ende}} (\dot{Q}_{Des}(t)) dt \quad (7.8)$$

$$Q = \int_{t_0}^{t_{ende}} (\dot{m}_{0;w}(t) \cdot c_{p,d} \cdot T_0(t) - \dot{m}_{u;w}(t) \cdot c_{p,d} \cdot T_u(t) + \dot{m}_L(t) \cdot c_{p,l} \cdot (T_0(t) - T_u(t))) dt \quad (7.9)$$

Die abgegebene Wärmemenge über der Zeit wird für den Adsorptionsvorgang in Abbildung 54 dargestellt.

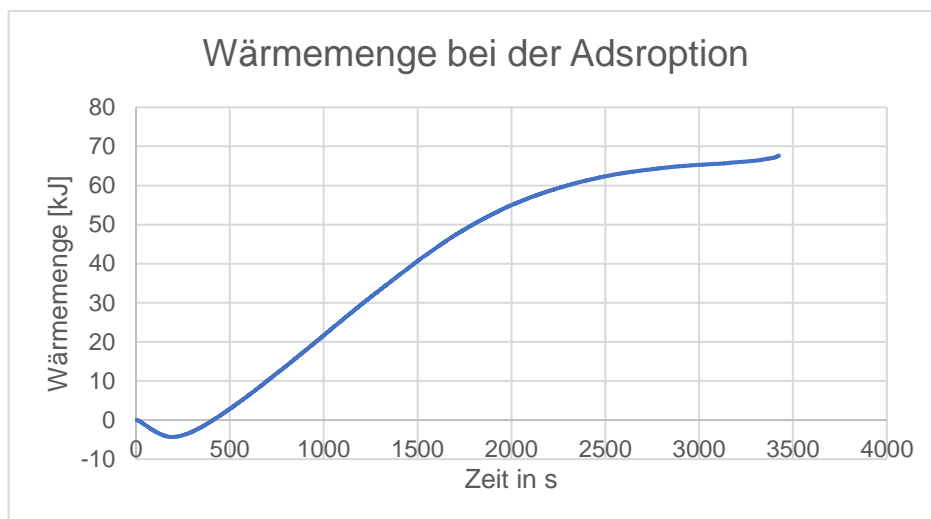


Abbildung 54: Darstellung der Wärmemenge bei der Adsorption

Hierbei ist ein Abflachen der Steigung zu erkennen. Diese verdeutlicht das Ende des Adsorptionsprozesses. Es stellt sich somit eine Wärmemenge von knapp unter 70kJ ein.

Bei der Desorption hingegen stellt sich nach dem rechnerischen Herausziehen der Wärmeverlust eine Wärmemenge von -80kJ ein.

Diese Werte sind allerdings mit Vorsicht zu betrachten, da die Wärmeverluste nicht eindeutig bestimmt werden konnten. Speziell bei der Desorption kommt es auch nach der Anpassung der Wärmeverluste noch immer zu einem stetigen Abtransport an Wärme, die über die Zeit das Ergebnis verfälscht.

## 8. Optimierung

Um den Versuchsstand in Zukunft noch besser aufstellen zu können, benötigt es einige Verbesserungen. In den vorherigen Kapiteln wurde bereits auf einige Punkte Bezug genommen, weshalb darauf im Folgenden nicht weiter eingegangen wird. Dies gilt vor allem für die Feuchtigkeitsregelung und der Temperaturregelung, die noch großen Verbesserungsbedarf aufweisen.

### 8.1. Stolperfalle Kabelführung

Die Kabelführung der Anlage ist teilweise unübersichtlich und da der Rechner sich außerhalb des Versuchsstandes befindet, liegen auch einige Kabel außerhalb des Versuchsstandes. Dies sieht nicht nur unschön aus, sondern beinhaltet bei Unachtsamkeit die Gefahr des Stolperns. Somit besteht eine Gefahr für Mensch und Material. Diese Gefahr gilt es zu minimieren.

Bei der neuen Kabelführung ist darauf zu achten, dass diese verdeckt ist, so dass versehentliche Berührungen ausgeschlossen werden. Auch sollte die Kabelführung folgendermaßen gestaltet werden, dass wenn der Dampferzeuger Wasser ablassen sollte, oder Kondensat austritt oder die Wasserkanister Wasser verlieren, dieses Wasser nicht zum Schaden an der Elektrik führen kann. Weiterhin ist zu vermeiden, dass die Kabel in Kontakt mit heißen Gegenständen kommen. Dies gilt insbesondere für den Dampferzeuger und die Rohrleitungen.

Somit ist eine Führung der Kabel auf dem Boden direkt hinter dem Dampferzeuger des Versuchsstandes nicht zu empfehlen. Dort kann unbemerkt Wasser auf die Kabel und Anschlüsse tropfen. Besser eignet sich der Platz hinter dem Versuchsstand. Dort kann kein Wasser auf die Kabel tropfen. Der Bereich ist gut einsehbar und wenn etwas geändert bzw. angepasst werden sollte, kann dies ohne großen Aufwand geschehen. Der Rechner ist dabei im Inneren des Versuchsstands links neben dem Dampferzeuger zu platzieren. Dabei sollte dieser mit einem möglichst großen Abstand zum Dampferzeuger aufgestellt werden, da der Rechner sich sonst zu sehr aufheizen kann.

### 8.2. Sicherung der Wasserkanister

Bei den Wassertanks, von denen einer für die Wasserzufuhr des Dampferzeugers verwendet wird und der andere als Auffangbehälter für die Abschlammung des Dampferzeugers fungiert, besteht bei Unaufmerksamkeit die Gefahr des Umkippen. Dadurch kann es zur Beschädigung des Versuchsstandes kommen.

Um diese Gefahr zu minimieren, können feste Halterungen in dem Versuchsstand integriert werden. Auch eine Konstruktion zum Festbinden/ Fixieren der Kanister ist durchaus denkbar. Somit werden diese vorm Umkippen geschützt und die Betriebssicherheit verbessert sich.

### 8.3. Temperaturbereich

Aus den aus Kapitel 2.3 erworbenen Kenntnissen der Abhängigkeit des Adsorptionsprozesses von Temperatur und Partialdruck, kann darauf geschlossen werden, dass nicht das ganze Potential bei der Desorption ausgeschöpft wird. Somit ist es möglich, durch eine höhere Temperatur den Desorptionsvorgang zu beschleunigen oder eine tiefere Entladung zu gewährleisten. Zurzeit ist die Temperatur am Lufterwärmer auf 100°C begrenzt. Durch die Verluste in den Rohrleitungen beträgt die Temperatur am Eintritt nur noch 80°C. Um nun eine noch höhere Temperatur bereitstellen zu können, kann die Begrenzung von 100°C nach oben heraufgesetzt werden oder die Rohrleitung besser isoliert werden. Empfohlen wird ein leichtes Heraufsetzen der maximalen Temperatur um 10°C auf 110°C und gleichzeitig eine verbesserte Isolierung der Rohrleitungen. Somit werden die Wärmeverluste verringert und dadurch die Temperatur am Eintritt heraufgesetzt.

Bei der Adsorption ist dies schwieriger. Somit wird mit einer tieferen Temperatur der Adsorptionsvorgang generell beschleunigt bzw. kommt es zu einer tieferen Entladung. Allerdings ist der Partialdruck durch die niedrigeren Temperaturen auch geringer. Die Luft kann somit nur so viel Wasser aufnehmen, bis diese gesättigt ist (100% relative Feuchte). Bei niedrigen Temperaturen kann weniger Wasser aufgenommen werden und somit senkt sich der Partialdruck. Es muss somit ein Optimum zwischen Temperatur und Luftfeuchtigkeit gefunden werden. Die begrenzende Temperatur ist hierbei die Umgebungstemperatur. Aus diesen Gründen ist es zurzeit nicht möglich, Temperaturen unterhalb dieser Umgebungstemperatur zu erreichen. Sollte sich das ermittelte Optimum unterhalb von 28°C befinden, kann über einen Luftkühler nachgedacht werden, um auch im Sommer ein solches mögliches Optimum zu erreichen.

### 8.4. Temperaturreglung am Austritt

Bei der Temperaturreglung kann über die Sinnhaftigkeit einer Regelung der Temperatur am Austritt nachgedacht werden. Somit ist die Sinnhaftigkeit der Regelung der Austrittstemperatur nicht bei der Durchströmung des Bypasses gegeben. Anders beim Eintritt, hierbei ist es sinnvoll vor dem Sorptionsprozess eine gewünschte Temperatur einzustellen, um diese dann gleich zu Beginn der Versuchsdurchführung bereitstellen zu können. Während der Durchströmung des Zeolithes ist eine funktionierende Regelung der Austrittstemperatur umso komplexer. Somit müssen hierfür der Ladezustand und die Umgebungstemperatur mit einfließen. Auch die sich einstellende Regelverzögerung ist hierbei größer. Allerdings ist eine solche Regelung der Austrittstemperatur nach dem Durchströmen des Zeolithspeichers in Zukunft durchaus denkbar, wenn auch aufwändig.

## 8.5. Erhöhung des Massenstromes

Durch eine Erhöhung des Massenstroms kann mehr Wasser und Wärme transportiert werden. Somit kann bei der Adsorption in einem kürzeren Zeitraum dem Zeolithen mehr Wasser zugeführt werden. Dadurch erhöht sich auch der Partialdruck im Inneren des Zeoliths, wodurch dieser schneller entladen werden kann. Bei der Desorption hingegen kann somit dem Zeolith mehr Wärme zugefügt werden, wodurch dies die Beladung des Zeoliths beschleunigt bzw. kann dadurch das freigesetzte Wasser so schneller abtransportiert werden, was auch den Desorptionsvorgang beschleunigt.

Auch eine Verbesserung des Feuchtigkeitsverhaltens ist dadurch denkbar. Bei der Beobachtung des Regelventils bei niedrigen Soll-Feuchtigkeiten fällt auf, dass dieses nur kurz geöffnet wird und die größte Zeit geschlossen bleibt. Die Feuchtigkeit schnell dabei nach oben und stabilisiert sich bei einer Feuchtigkeit oberhalb der Soll-Feuchtigkeit. Die Regelung hat dann Probleme, die Feuchtigkeit wieder herabzusetzen. Durch einen höheren Luftmassenstrom wird der Abtransport der feuchten Luft beschleunigt, wodurch die Feuchtigkeit schneller wieder sinkt. Somit ist auch von einem verbesserten Verhalten der Regelung für die relative Luftfeuchtigkeit auszugehen.

## 9. Fazit und Zusammenfassung

Bei den Sorptionsspeichern handelt es sich um eine neue Technologie, die in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewinnt. Speziell bei dem Wechsel der Energien von deterministischen zu volatilen Energieformen spielen thermische Speicher eine immer wichtiger werdende Rolle. Die Sorptionsspeicher stechen dabei durch ihre hohen Speicherdichten und der Möglichkeit, diese auch reversibel nutzen zu können, heraus. Dabei sind sie nicht nur in der Lage Wärme zu speichern und abzugeben, sondern können dabei auch andere Stoffe, wie z.B. Wasser, aufnehmen bzw. abgeben. Dies macht Sorptionsprozesse auch für Trocknungsanwendungen interessant. Die Beladung ist abhängig vom Partialdruck und von der Temperatur. Bei der Temperatur gilt, desto höher die Temperatur, desto niedriger die Beladung. Bei dem Partialdruck gilt hingegen, desto höher der Partialdruck, desto höher die Beladung. Bei dem behandelten Versuchsstand handelt es sich um einen offenen Zeolithspeicher, der mit feuchter Luft durchströmt werden kann. Die Luft dient dabei als Transportmedium für das Wasser. Das Wasser wird wegen der unterschiedlichen Ladungen am Zeolith adsorbiert und gibt dabei Wärme an die Umgebung ab. Durch das Erwärmen kann dieser Prozess rückgängig gemacht werden. Dabei wird Wärme aufgenommen. Die aufgenommene oder auch abgegebene Wärme setzt sich hierbei aus der sensiblen Wärme, der Kondensations-/ Verdampfungswärme und der Bindungswärme zusammen. Bei offenen Sorptionsprozessen befindet sich das System bei Umgebungsdruck. Bei geschlossenen Systemen hingegen ist das System von außen abgeschlossen. Es befindet sich nur noch das Adsorbens und das Adsorptiv im System. Das Adsorbens weist dabei eine besonders große innere Oberfläche auf, weshalb dieses auch besonders viel vom Adsorptiv aufnehmen kann.

Bei dem betrachteten Versuchsstand handelt es sich um ein offenes System. Dieser Versuchsstand wurde zur zentraleren Aufstellung aller Versuchsstände des Institutes umpositioniert. Dazu wurde der Versuchsstand in möglichst große Teile zerlegt und über die Treppe zu seiner neuen Position transportiert und dort wieder aufgebaut. Nach einigen anfänglichen Problemen mit der Messung des Wassergehaltes konnte mit der Untersuchung des Versuchsstandes begonnen werden. Bei der Untersuchung ist aufgefallen, dass die Regelung der Temperatur am Eintritt mit zunehmender Temperatur eine immer größere Regelabweichung aufzeigt. Bei der Regelung der Temperatur am Austritt fällt auf, dass diese nicht wie gewollt die Austrittstemperatur, sondern die Eintrittstemperatur wiedergibt. Dies ist so nicht gewollt. Da hierbei die Eintrittstemperatur sogar noch besser wiedergegeben wird als bei der Regelung für die Eintrittstemperatur, kann überlegt werden, dies für die Eintrittstemperatur zu verwenden. Bei der Regelung der Luftfeuchtigkeit fällt hingegen auf, dass diese vor allem Probleme mit relativen Feuchten von unter 70% hat. Die Anlage ist hierbei nicht in der Lage, die Luftfeuchtigkeit runter zu regeln, somit bleibt eine stetige hohe Luftfeuchtigkeit erhalten.

Bei der Untersuchung des Adsorptionsprozesses ergibt sich der erwartete Verlauf. Dasselbe gilt für den Desorptionsprozess. Um mögliche Einflüsse der Umpositionierung zu überprüfen, sind diese mit den Messungen von Mehlaus verglichen worden. Hierbei sind nur kleine



Abweichungen des Temperaturverlaufes und des Wassergehaltsverlaufes zu erkennen. Was auffällt ist, dass alle Temperaturen am Eintritt nach der Umpositionierung nach oben verschoben sind. Dies ist auf die höhere Umgebungstemperatur während der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Auch sind zu Beginn der Messungen Sprünge, die nach der Umpositionierung stärker ausfallen, festzustellen. Diese Sprünge verfälschen etwas den Vergleich und entstehen durch das plötzliche Öffnen des Versuchstandes und das dadurch plötzliche Freisetzen der eingelagerten Luft und des Wassers. Bei der Ermittlung der Wassermassen ist aufgefallen, dass diese leicht die Werte von Mehlaus überschreiten, was bedeutet, dass der Versuchstand bei der Versuchsdurchführung mehr Wasser auf beziehungsweise abgibt als es bei Mehlaus der Fall war. Wassermassen von Desorption und Adsorption sollten hierbei identisch sein, dies ist nicht der Fall und kann auf ungenaue Feuchtigkeitsmessungen zurückgeführt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Versuchstand erfolgreich an seinen vorgesehenen Platz umpositioniert worden ist, der Versuchstand bezüglich seiner Regelungstechnik untersucht worden ist und mit diesem Versuchstand ein vollständiger Adsorptions- und Desorptionsprozess gefahren werden kann. Die Messergebnisse geben dabei plausible Messergebnisse wieder. Somit ist der Versuchstand bereit, in Zukunft für Studierende im Rahmen eines Laborversuches betrieben zu werden. Dennoch gibt es einiges an Verbesserungspotential. Das größte Verbesserungspotential geht hierbei von der Regelung der Luftfeuchte aus.

## Quellen

- [1] G. Gysel, *Zweiter Teil Solarenergie*, Gysel Haustechnik AG Horgen , 2019.
- [2] Kesselheld, „Sorptionspeicher: Kosten, Funktion & Anwendungsbereiche,“ [Online]. Available: <https://www.kesselheld.de/sorptionspeicher/>. [Zugriff am 22 08 2022].
- [3] M. B. Dieter Bathen, *Adsorptionstechnik*, Berlin, Heidelberg, NewYork: Springer, 2001.
- [4] A. Hauer, S. Hiebler und M. Reuß, *Wärmespeicher*.
- [5] M. Funk, *Hysteresis der Feuchtespeicherung in Porösen Materialien*, Dresden : TU Dresden, 2012.
- [6] C. Arnold, „Dr. Arnold Chemie beratung,“ 01 02 2017. [Online]. Available: <https://www.arnold-chemie.de/2017/02/hysteresese-bei-der-adsorption-und-desorption-teil-ii/>. [Zugriff am 28 06 2022].
- [7] J. G. C. Storch, *Materialwissenschaftliche Untersuchungen an zeolithischen Adsorbentien für den Einsatz in offenen Sorptionssystemen zur Wärmespeicherung*, Technische Universität München , 2009.
- [8] A. Hauer, *Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen*, Berlin : Technische Universität Berlin , 2002.
- [9] I. C. V. P. Dragutin Tušek, „Suvremena sredstva za dekontaminaciju bojnih otrova,“ *Semantic Scholar* , 31 12 2019. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Suvremena-sredstva-za-dekontaminaciju-bojnih-otrova-Tu%C5%A1ek-Cetina/e040ca72824aa3c00e5ee0d25de9b0fd04d96d69/figure/3>. [Zugriff am 17 03 2022].
- [10] R. Rinaldi, „ResearchGate,“ *ResearchGate GmbH*, 2007. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Unita-costruttive-secondarie-Secondary-Building-Units-SBU-delle\\_fig1\\_259398154](https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Unita-costruttive-secondarie-Secondary-Building-Units-SBU-delle_fig1_259398154). [Zugriff am 04 03 2022].

- [11] K. Rächle, Untersuchung an nickelhaltigen ZSM-5-Zeolith-Katalysatoren zur simultanen Stickoxidreduktion mit Poren, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, 2005.
- [12] wikiwand, „Kieselgel,“ [Online]. Available: <https://www.wikiwand.com/de/Kieselgel>. [Zugriff am 23 08 2022].
- [13] item Industrietechnik GmbH, „www.item24.com,“ item Industrietechnik GmbH, 2022. [Online]. Available: <https://www.item24.com/de-de/mb-systembaukasten/aluminiumprofile-und-zubehoer/profile/profile-6/konstruktionsprofile-6/>. [Zugriff am 10 08 2022].
- [14] L. Mehlaus, Qualifizierung eines neu gebauten Zeolithspeichers, Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften , 2021.
- [15] Abtei-Apotheke e. Kfm, „Ortho Zeolith,“ [Online]. Available: <https://www.abtei-apo.de/content/leistungen/orthomolekularika/orthozeolith.html>. [Zugriff am 24 02 2022].
- [16] M. Sterner und I. Stadler, „Energiespeicher- Bedarf, Technologien, Integration,“ in *Energiespeicher*, Berlin, Springer Vieweg, 2014, pp. 557-575.

## Anhang-A: secondary building units (SBUs)

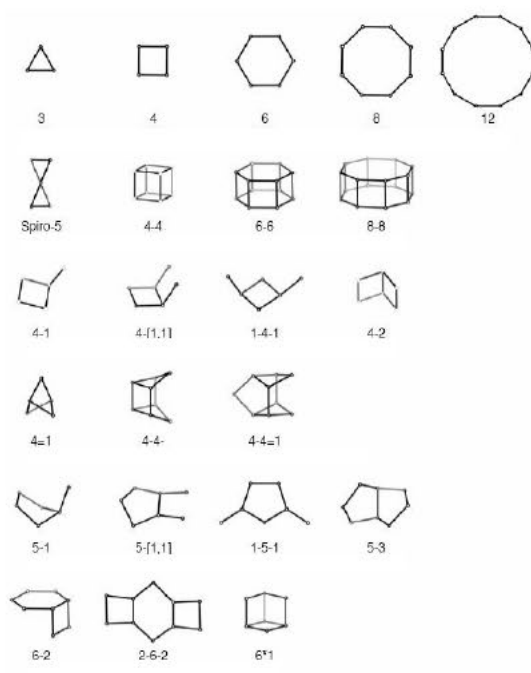


Abbildung 55: Überblick der gängigsten secondary building units (SBUs). [7]



# Anhang C: R&I

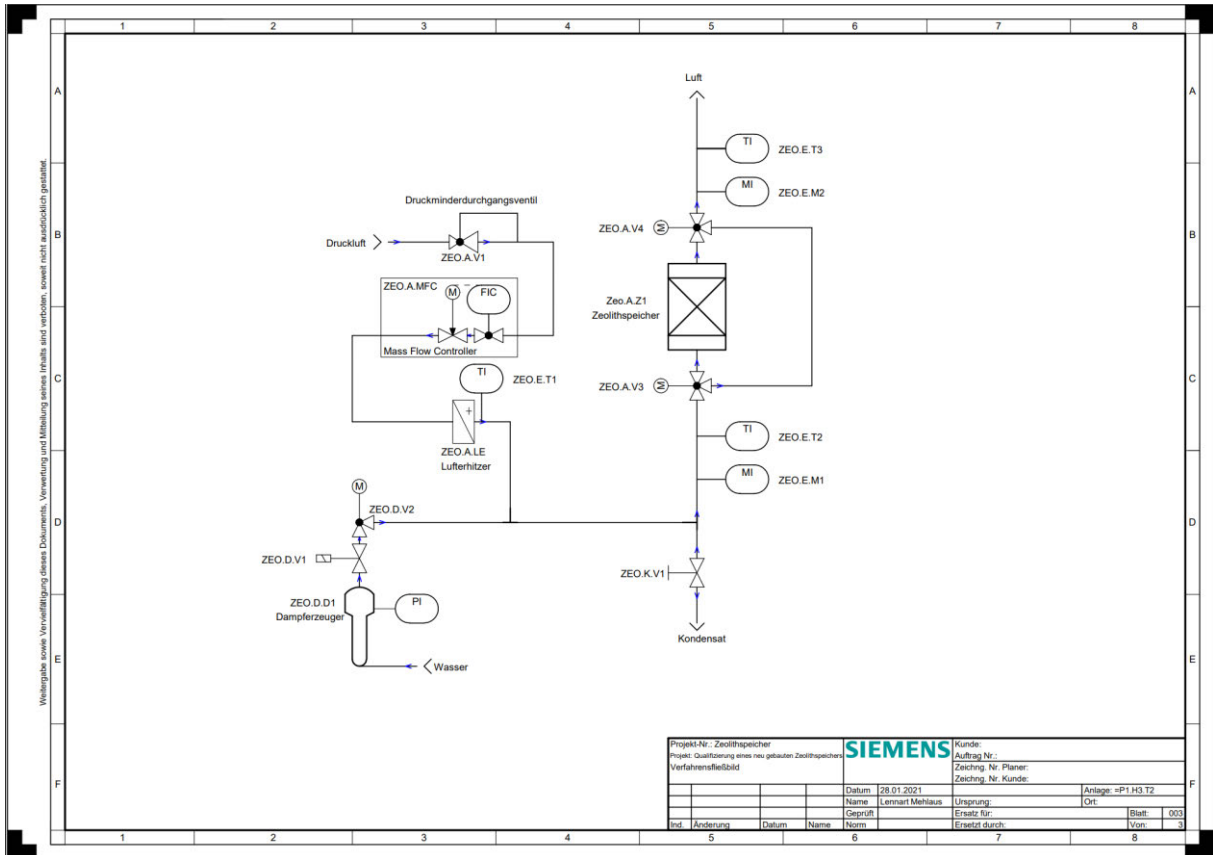


Abbildung 57: R&I des Versuchsstandes [11]

# Anhang D: Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<b><u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u></b>	
Hiermit versichere ich,	
Name:	<u>Schröder</u>
Vorname:	<u>Aarin</u>
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit <input type="checkbox"/> bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema: Umsetzung und Wiederinbetriebnahme eines Zeolithspeichers	
ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.	
<i>- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -</i>	
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- <input type="checkbox"/> ist erfolgt durch:	
<u>Hamburg</u> Ort	<u>23.08.2022</u> Datum