



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

# **Bachelorarbeit**

Jörn Malte Hoff

## **Untersuchung der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge eines thermochemischen Speichers**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Jörn Malte Hoff**

**Untersuchung der Adsorptions- und  
Desorptionsvorgänge eines  
thermochemischen Speichers**

Bachelor-/Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelor-/Masterprüfung

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

Erstprüferin: Prof. Dr.- Ing. H. Frischgesell

Zweitprüfer: M.Eng. Nestorius Wiegandt

Abgabedatum: 24.09.2015

# **Zusammenfassung**

## **Name des Studenten**

Jörn Malte Hoff

## **Thema der Bachelorthesis**

Untersuchung der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge eines thermochemischen Speichers

## **Stichworte**

Adsorption; Desorption; Versuchsstand; Messgeräte; Messdaten; Rechenwerte

## **Kurzzusammenfassung**

Ein Zeolithspeicher, der nach dem Prinzip der thermochemischen Speicherung funktioniert, soll als Laboranlage verwendet werden. Dazu ist das Speicher- und Betriebsverhalten zu untersuchen. Es wird erklärt, wie sich die Zeolithe für den Gebrauch an Adsorptionssystemen zusammensetzen. Die Adsorptionsvorgänge werden mathematisch beschrieben und mit den experimentell gewonnenen Daten eines im Rahmen dieser Arbeit modifizierten Versuchsstands verglichen. Es werden die für den Versuch benötigten Messgeräte vorgestellt. Außerdem werden die Messdaten in einem Programm aufgenommen. In dem Programm werden die Messdaten ausgewertet und die für den Versuch relevanten Rechenwerte ermittelt.

**Name of Student**

Jörn Malte Hoff

**Title of the paper**

Study of the adsorption- and desorption process on a thermochemical storage

**Keywords**

Adsorption, desorption, test station, measuring devices, calculation value, measured data

**Abstract**

A Zeolith storage working at the principle on a thermochemical storage is being assembled in a test station. The reaction and its operation need to be examined. It is being explained how the Zeolith is assembled for its use during the system adsorption. The adsorption process is being explained as well as mathematically described and compared with the results received during the operation. The experiment and its components had to be modified for optimization of the process. The measuring devices within the whole device and its components were explained. The results were used and evaluated in order to investigate the correct calculation value.

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	X
Abkürzungen, verwendete Formelzeichen und Symbole: .....	XI
1 Einleitung.....	1
2 Einführung in das Wissensgebiet .....	2
2.1 Energiespeicherung mittels Zeolith .....	2
2.1.1 Aufbau der Zeolithe .....	2
2.1.2 Eigenschaften der Zeolithe.....	4
2.1.3 Systeme zur Energiespeicherung mittels Zeolith .....	9
2.2 Messtechnik .....	11
2.2.1 Messung der Geschwindigkeit .....	11
2.3.1 Messung der Relativen Feuchte .....	12
2.3.2 Messung der Temperatur.....	13
3 Ausgangszustand des Versuchsstands .....	14
3.1 Hardware.....	14
3.2 Software .....	18
4 Erwartung zum Speicherverhalten.....	20
4.1 Grundlagen feuchter Luft.....	20
4.2 Adsorption.....	23
4.3 Desorption.....	26
5 Optimierung des Versuchsstands.....	27
5.1. Konstruktive Änderungen .....	27
5.1.1 Durchführung der Adsorption .....	28
5.1.2 Durchführung der Desorption .....	30
5.2 Einbindung der Messgeräte in Labview .....	31
6 Versuchsdurchführung / Aufnahme Messdaten .....	39
6.1 Messwerte .....	39
6.1.1 Adsorption.....	39
6.1.2 Desorption .....	43
7. Auswertung.....	45
7.1 Untersuchungen der Druckverluste.....	45
7.1.1 Druckverluste der Schüttung.....	45
7.1.2 Druckverluste des Rohrleitungssystem .....	48
7.1.3 Druckbestimmung durch U-Rohr.....	49

7.2 Untersuchung der Wärmeverluste.....	51
7.3 Adsorption.....	54
7.4 Desorption.....	63
8 Schlussbetrachtung .....	67
8.1 Zusammenfassung.....	67
8.2 Ausblick .....	67
9 Quellen.....	69
Anhang.....	71
A 1 Analyse der Datensätze .....	71
A 2 Adsorption.....	72
A 2.1 Messwerte des zweiten Versuchs .....	72
A 2.2 Rechenwerte des zweiten Versuchs .....	73
A 2.3 Messwerte des dritten Versuchs .....	74
A 2.4 Rechenwerte des dritten Versuchs .....	75
A 2.5 Messwerte des vierten Versuchs .....	75
A 2.6 Rechenwerte des vierten Versuchs.....	76
A 2.7 Messwerte des fünften Versuchs.....	77
A 2.8 Rechenwerte des fünften Versuchs .....	77
A 3 Desorption.....	78
A 3.1 Messwerte des zweiten Versuchs .....	78
A 3.2 Rechenwerte des zweiten Versuchs .....	79
A 3.3 Messwerte des dritten Versuchs .....	79
A 3.4 Rechenwerte des dritten Versuchs .....	80
A 3.5 Messwerte des vierten Versuchs .....	81
A 3.6 Rechenwerte des vierten Versuchs.....	81
A 3 Technische Zeichnungen.....	83
A 3.1 Adapter .....	83
A 3.2 Anschluss für Ventile .....	85
A 3.3 Halterung .....	87
A 4 Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit.....	90

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entstehung von Zeolith A, Sodalith und Zeolith X,Y (MMCh, 2015) .....	3
Abbildung 2: Wichtige Teilschritte bei der Adsorption (Gromes 1995, S.6).....	4
Abbildung 3: Darstellung des thermodynamischen Gleichgewichts bei der Adsorption (Steinweg 1996 in Bathen und Breitbach 2001, S.50) .....	5
Abbildung 4: Klassifizierung der Isothermentypen (Ulbig 1999, in Bathen und Breitbach 2001, S.53).....	6
Abbildung 5: Gemessene Isotherme von Wasserdampf an Zeolith 13X Pellets (Storch 2009, S.19).....	7
Abbildung 6: Charakteristische Kurve im Trägergassystem gemessen (Hauer 2002, S.37). 8	
Abbildung 7: Geschlossene Adsorptionssysteme (Hauer 2009, S.6) .....	10
Abbildung 8: Offener Adsorptionsprozess (Hauer 2009, S.5) .....	10
Abbildung 9: Flügelradanemometers (Peak Tech Prüf- und Messtechnik, 2015) .....	11
Abbildung 10: Messtoleranz der Temperatur über dem Messbereich (E+E Elektronik 2015a, S.15).....	13
Abbildung 11: Zustand des Zeolithspeichers zu Beginn der Bachelor Arbeit .....	14
Abbildung 12: Zeolithspeicher .....	15
Abbildung 13: Verfahrensfließbild Desorption Anfangszustand .....	15
Abbildung 14: Verfahrensfließbild Adsorption Anfangszustand.....	16
Abbildung 15: Einlesen der Messwerte .....	18
Abbildung 16: Auswerten der Messwerte .....	19
Abbildung 17: Ein- und Austrittslufttemperaturen bei Adsorption für Zeolith (Hauer 2002, S.52).....	23
Abbildung 18: Gemessene Temperaturverläufe bei der Adsorption von Wasserdampf am Sorptionsmaterial Zeolith 4A, Zeolith 13X und Zeolith 13XBF, Wasserdampfpartialdrücke 10 mbar oder 20 mbar [22] (Weber R. et al. 2013, S.6) .....	24
Abbildung 19: Experimenteller Zusammenhang zwischen Temperaturhub und Veränderung des Wassergehalts der Luft während der Adsorption (Hauer 2002, S. 86) ...	24
Abbildung 20: Ein- und Austrittslufttemperaturen bei Desorption für Zeolith (Hauer 2002, S.52).....	26
Abbildung 21: Zustand des Zeolithspeichers zum Ende der Bachelor Arbeit .....	27
Abbildung 22: Verfahrensfließbild Adsorption.....	28
Abbildung 23: Einstellen eines stationären Zustands für die Desorption .....	29
Abbildung 24: Verfahrensfließbild Desorption .....	30
Abbildung 25: Einlesen der Eingangssignale .....	31
Abbildung 26: Auslesen COM 7 .....	32
Abbildung 27: Umwandlung Hex zur Dezimalzahl .....	33
Abbildung 28: Sättigungsdampfdruck mit Hilfe linearer Interpolation .....	34
Abbildung 29: Temperaturen über Numeric .....	35
Abbildung 30: Relative Feuchten über Numeric .....	36
Abbildung 31: Rechenwerte .....	37
Abbildung 32: Frontpanel Labview.....	38
Abbildung 33: Temperaturen des ersten Versuchs für die Adsorption .....	40
Abbildung 34: Relative Feuchten des ersten Versuchs für die Adsorption.....	40

Abbildung 35: Absolute Feuchten des ersten Versuchs für die Adsorption.....	41
Abbildung 36: Geschwindigkeitsverlauf des ersten Versuchs für die Adsorption.....	41
Abbildung 37: Temperaturen des ersten Versuchs für die Desorption .....	43
Abbildung 38: Relative Feuchte des ersten Versuchs für die Desorption .....	43
Abbildung 39: Austretender Geschwindigkeitsverlauf des ersten Versuchs für die Desorption .....	44
Abbildung 40: Strömung durch Schüttung (Wagner 2012, S143) .....	45
Abbildung 41: Strömungskanal .....	48
Abbildung 42: Schematische Darstellung U-Rohr .....	49
Abbildung 43: Druckbestimmung mit Hilfe eines U-Rohrs.....	50
Abbildung 44: Differenz der spez. Enthalpie über Differenz der Umgebungstemperatur zur Austritts Temperatur.....	53
Abbildung 45: Temperaturverlauf des ersten Versuchs für die Adsorption.....	54
Abbildung 46: Relative Feuchten des ersten Versuchs bei der Adsorption nach Bereinigung der Messdaten.....	55
Abbildung 47: Enthalpie des ersten Versuchs für die Adsorption .....	55
Abbildung 48: Wasserdampfbeladung des ersten Versuchs für die Adsorption .....	56
Abbildung 49: Beladung des ersten Versuchs für die Adsorption .....	57
Abbildung 50: Temperaturhub über Veränderung der Wasserdampfbeladung des ersten Versuchs für die Adsorption.....	57
Abbildung 51: Experimenteller Zusammenhang des ersten Versuchs für die Adsorption .	58
Abbildung 52: Messwerte/Rechenwerte des ersten Versuchs für die Adsorption .....	59
Abbildung 53: Experimenteller Zusammenhang zwischen maximalen Temperaturhub und Veränderung der Wasserdampfbeladung für alle Versuche bei der Adsorption. ....	62
Abbildung 54: Beladung des ersten Versuchs für die Desorption.....	63
Abbildung 55: Bereinigte Temperatur des ersten Versuchs für die Desorption.....	64
Abbildung 56: Bereinigte relative Feuchte des ersten Versuchs für die Desorption.....	64
Abbildung 57: Vergleich Temperatur und Geschwindigkeit am Austritt des ersten Versuchs für die Desorption.....	65
Abbildung 58: Temperaturen des zweiten Versuchs für die Adsorption .....	72
Abbildung 59: Relative Feuchten des zweiten Versuchs für die Adsorption.....	72
Abbildung 60: Absolute Feuchte des zweiten Versuchs für die Adsorption.....	72
Abbildung 61: Spezifische Enthalpien für die Adsorption des zweiten Versuchs .....	73
Abbildung 62: Beladung des zweiten Versuchs für die Adsorption .....	73
Abbildung 63: Temperaturhub über Veränderung des Wassergehaltes des zweiten Versuchs für die Adsorption.....	73
Abbildung 64: Experimenteller Zusammenhang des zweiten Versuchs für die Adsorption .....	74
Abbildung 65: Temperaturen des dritten Versuchs für die Adsorption .....	74
Abbildung 66: Relative Feuchten des dritten Versuchs für die Adsorption.....	74
Abbildung 67: Beladung des dritten Versuchs für die Adsorption .....	75
Abbildung 68: spezifische Enthalpie des dritten Versuchs für die Adsorption.....	75
Abbildung 69: Temperatur des vierten Versuchs für die Adsorption .....	75
Abbildung 70: Relative Feuchte des vierten Versuchs für die Adsorption .....	76
Abbildung 71: Spezifische Enthalpie des vierten Versuchs für die Adsorption .....	76
Abbildung 72: Beladung des vierten Versuchs für die Adsorption.....	76
Abbildung 73: Temperatur des fünften Versuchs der Adsorption .....	77

Abbildung 74: Relative Feuchte des fünften Versuchs für die Adsorption.....	77
Abbildung 75: Enthalpie des fünften Versuchs für die Adsorption .....	77
Abbildung 76: Beladung des fünften Versuchs für die Adsorption .....	78
Abbildung 77: Temperaturen des zweiten Versuchs für die Desorption.....	78
Abbildung 78: Relative Feuchte des zweiten Versuchs für die Desorption .....	78
Abbildung 79: Spez. Enthalpie des zweiten Versuchs für die Desorption .....	79
Abbildung 80: Beladung des zweiten Versuchs für die Desorption.....	79
Abbildung 81: Temperatur des dritten Versuchs für die Desorption .....	79
Abbildung 82: Relative Feuchte des dritten Versuchs für die Desorption .....	80
Abbildung 83: Spez. Enthalpie des dritten Versuchs für die Desorption .....	80
Abbildung 84: Beladung des dritten Versuchs für die Desorption.....	80
Abbildung 85: Temperatur des vierten Versuchs für die Desorption.....	81
Abbildung 86: Relative Feuchte des vierten Versuchs für die Desorption .....	81
Abbildung 87: Spez. Enthalpie des vierten Versuchs für die Desorption .....	81
Abbildung 88: Beladung des vierten Versuchs für die Desorption .....	82

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Kennwerte von Zeolith (Storch 2009, S.14) .....	3
Tabelle 2: Specifications (Peak Tech Prüf- und Messtechnik, 2015).....	12
Tabelle 3: Messfehler Relativer Feuchte (E+E Elektronik 2015a, S.15) .....	12
Tabelle 4: Messpunkte für Kalibrierung.....	35
Tabelle 5: Anfangs- und Randbedingungen des ersten Versuchs für die Adsorption.....	39
Tabelle 6: Zusammenfassung der Messwerte der Adsorption.....	42
Tabelle 7: Anfangs und Randbedingungen Desorption.....	43
Tabelle 8: Messdaten der Desorption .....	44
Tabelle 9: Berechnung am Strömungskanal .....	49
Tabelle 10: Berechnung am U-Rohr.....	50
Tabelle 11: Wärmebetrachtung .....	52
Tabelle 12: Zusammenhang zwischen der Differenz der Wasserdampfbeladung und Versuchsdauer .....	58
Tabelle 13: Mess- und Rechenwerte am Austritt bei der Adsorption .....	59
Tabelle 14: Zusammenfassung für die Auswertung der Adsorption .....	61
Tabelle 15: Messwerte Geschwindigkeit und Temperatur am Austritt .....	65
Tabelle 16: Auswertung der Desorption.....	66
Tabelle 17: Analyse der Datensätze .....	71

## Abkürzungen, verwendete Formelzeichen und Symbole:

Zeichen	Einheit	Erläuterung
$A$	$m^2$	Fläche
$C$	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{Sorbit}}$	Wasserbeladung des Adsorbens
$c_{Sorb}$	$\frac{kJ}{kg K}$	spezifische Wärmekapazität des trockenen Adsorbens
$c_{p,l}$	$\frac{kJ}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität der Luft
$c_{p,d}$	$\frac{kJ}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes
$D$	m	Außendurchmesser
$d$	m	Innendurchmesser
$g$	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
$h_{1+X}$	$\frac{kJ}{kg}$	Spezifische Enthalpie der feuchten Luft
$h_d$	$\frac{kJ}{kg}$	Spezifische Enthalpie des Wasserdampfes
$h_l$	$\frac{kJ}{kg}$	Spezifische Enthalpie der trockenen Luft
$\Delta h_{v,0}$	$\frac{kJ}{kg}$	Spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser
$H$	kJ	Enthalpie Feuchten Luft
$H_{Ads}$	$\frac{kJ}{kg_{H_2O}}$	Adsorptionenthalpie
$k$	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmedurchgangswiderstand
$L$	m	Länge
$\dot{m}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
$\dot{Q}$	kW	Wärmestrom
$p_w$	Pa	Partialdruck des Wasserdampfes
$p_s$	Pa	Sättigungsdampfdruck
$Re$	[-]	Reynoldszahl
$R_w$	$\frac{J}{kg K}$	Gaskonstante für Wasserdampf

$R_l$	$\frac{J}{kg K}$	Gaskonstante für Luft
$t$	s	Zeit
$T$	K	Temperatur
$\Delta T$	K	Temperaturhub
$V$	$m^3$	Volumen
$w$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
$z$	-	Anzahl der Pellets
$\Delta x$	m	Höhendifferenz
$X$	$\frac{kg}{kg}$	Wasserdampfbeladung
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
$\rho_w$	$\frac{kg}{m^3}$	Absolute Feuchte
$\rho_{1+X}$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte der Feuchten Luft
$\varphi$	%	Relative Feuchte
$\Psi$	-	Hohlraumanteil
$\zeta$	-	Widerstandsbeiwert
$\lambda$	-	Rohrreibungszahl
$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	Kinematische Viskosität
$\mu$	$\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Dynamischen Viskosität

Abkürzungen:

MTZ	Mass Transfer Zone
SBUs	Secondary building units
Labview	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
MMCh	Moderne Materialien im Chemieunterricht
DIN	Deutsches Institut für Normung
ca.	circa
z.B.	zum Beispiel

# 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund, Anlagen energieeffizienter zu nutzen, sind innovative Lösungsansätze gefragt. Ein wichtiger Punkt der Energieeffizienz ist die Wärmespeicherung. Da bei vielen Anlagen Wärme als Nebenprodukt anfällt, sind nachhaltige Speicherkonzepte zu entwickeln. So könnte die Wärme später eingesetzt und wieder verwendet werden. Bei konventionellen Wärmespeichern, z.B. einem Pufferspeicher, kann die Wärme nicht langfristig ohne Wärmeverluste gespeichert werden, da eine perfekte Isolierung nicht zu realisieren ist (Daniel, 2015). In dieser Arbeit wird die thermochemische Wärmespeicherung mittels Zeolith betrachtet. Neben ca. 40 natürlich vorkommenden Zeolithen werden die ca. 200-300 synthetisch hergestellten Zeolithe für industrielle Zwecke verwendet, wobei nur ca. 36 von den synthetisch hergestellten Zeolithen für die Wärmespeicherung geeignet sind (Bathen 2001, S.30). Für die technische Anwendung wird Zeolith in Kombination mit Luft-Wasser verwendet, um die Adsorptionsenthalpie, welche für die Wärmefreisetzung verantwortlich ist, freizusetzen. Die technische Anwendung lohnt sich erst dann, wenn der Prozess mehrmals im Jahr stattfindet. Findet diese Art der Wärmespeicherung nur ein bis zwei Mal jährlich ihre Anwendung sind die Kosten bezogen auf die bereitgestellte Energie pro Jahr sehr hoch. Wird der Wärmespeicher jedoch sehr häufig im Jahr verwendet verringern sich die spezifischen Kosten entsprechend (Hauer 2002, S.61). Die Stoffpaarung Zeolith-Luft-Wasser ist sehr interessant, weil sie ungiftig, nicht brennbar, nicht korrosiv und in ausreichenden Mengen vorhanden ist (Striker 2003, S.3).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Eigenschaft von Zeolith als thermochemischer Wärmespeicher in einer Versuchsanlage untersucht. Wichtige Bestandteile der Arbeit sind Erläuterungen zu den physikalischen und chemischen Abläufen während den Desorptions- und Adsorptionsvorgängen, die mit dem Praxistest untermauert werden.

## 2 Einführung in das Wissensgebiet

In diesem Kapitel wird Zeolith als Wärmespeicher näher erläutert. Es werden die Eigenschaften von Zeolith und das thermodynamische Gleichgewicht der Adsorption und Desorption vorgestellt. Die Umsetzung der Systeme zur Energiespeicherung mit Hilfe des Zeoliths kann auf verschiedenen Wegen erfolgen und wird anhand von Beispielen erklärt. Des Weiteren werden die für diese Arbeit verwendeten Messgeräte vorgestellt.

### 2.1 Energiespeicherung mittels Zeolith

Ein mögliches Verfahren zur Energiespeicherung ist die thermochemische Wärmespeicherung mittels Zeolith. Dieser Prozess wird durch Adsorption und Desorption umgesetzt.

#### 2.1.1 Aufbau der Zeolithe

Bei der Nutzung von Zeolith zur Wärmespeicherung spielt der Aufbau eine wesentliche Rolle und bestimmt somit die Eigenschaften des Zeoliths.

Die Gitterstruktur von Zeolith setzt sich aus  $\text{SiO}_4$  und  $\text{AlO}_4$  Tetraedern zusammen. Diese sind die Primärbausteine. Die Primärbausteine verbinden sich über Sauerstoffkanten zu Sekundärbausteinen und es entsteht ein dreidimensionales Gebilde. Ein sogenannter Sodalith-Käfig oder  $\beta$ -Käfig entsteht durch die Kombination von 4-Ringen und 6-Ringen. Die Sodalith-Käfige sind über Vierer- oder Sechserdoppelringe verbunden, sodass diese Strukturen zur Größe der Fenster beitragen und sich damit die Zeolithtypen A, X und Y zusammensetzen lassen (MMCh, 2015).

Als effektiver Porendurchmesser wird der kleinste Abstand gegenüberliegender Porenwände bezeichnet (Storch 2009, S.13).



## Entstehung von Zeolith A, Sodalith und Zeolith X,Y

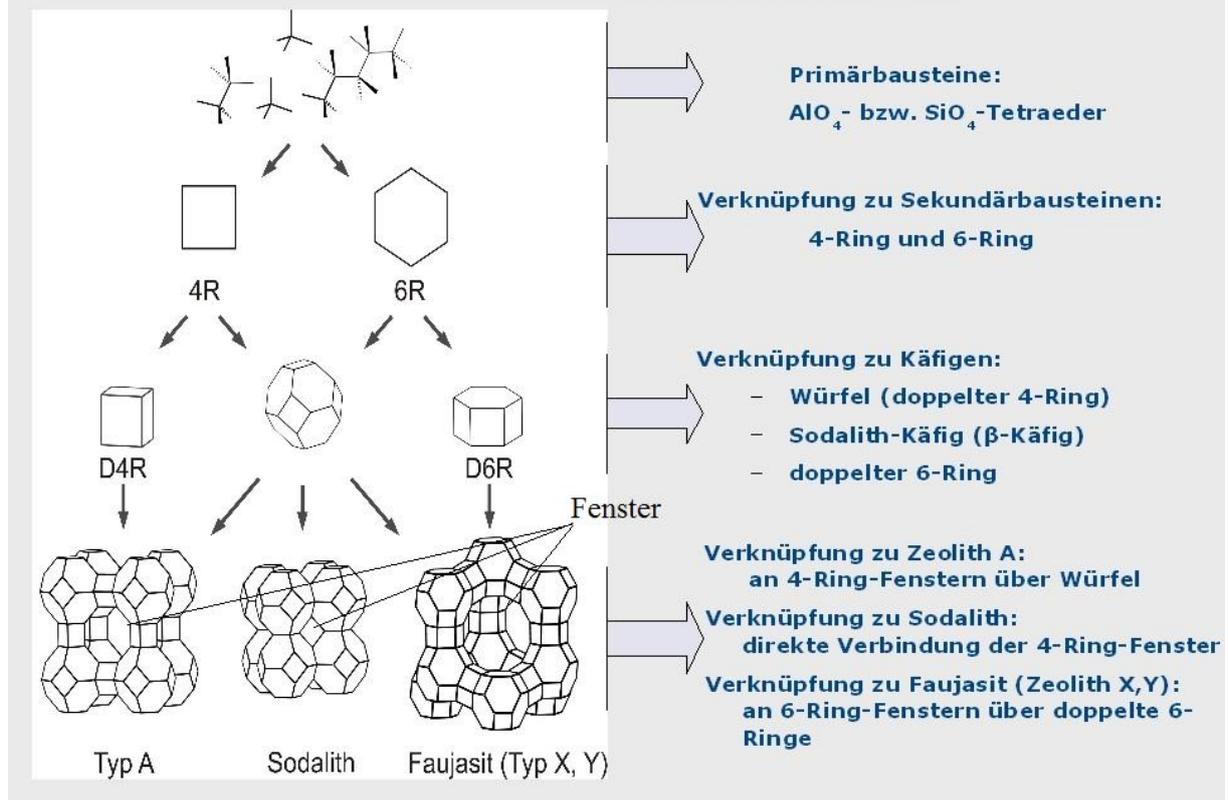


Abbildung 1: Entstehung von Zeolith A, Sodalith und Zeolith X,Y (MMCh, 2015)

In Abbildung 1 ist ein Sodalith Käfig dargestellt. Die Zeolithe vom Typ LTA (a) und FAU (b) setzen sich aus solchen Sodalith Käfigen zusammen. Nach Hauer und Storch eignen sich für die Energiespeicherung die Zeolithtypen „X“ und „A“. Diese Typen sind besonders hydrophil bzw. haben eine hohe Wechselwirkung mit Wasser. Deswegen eignen sich die Typen A und X besonders gut für die Wasserdampfadsorption (Hauer 2002, Storch 2009). In Tabelle 1 sind die wesentlichen Kennwerte der Zeolithe A, X und Y zusammengefasst.

Tabelle 1: Typische Kennwerte von Zeolith (Storch 2009, S.14)

	innere Oberfläche (m <sup>2</sup> /g)	Schüttdichte (kg/m <sup>3</sup> )	typ. Porendurchmesser (nm)	hydrophil?	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Zeolith A	800 ... 1000	750	0,4	ja	2
Zeolith X	800 ... 1000	700	0,74 ... 1,0	ja	2,0 ... 3,0
Zeolith Y				je nach Si-Al-Verhältnis	3,0 ... 6,0

## 2.1.2 Eigenschaften der Zeolithe

Zeolithe haben die Eigenschaft der geometrischen Selektivität. Das heißt, dass nur solche Moleküle adsorbiert werden können, deren Durchmesser kleiner ist als die Fenster.

Im Folgenden wird der adsorbierende Feststoff als „Adsorbens“ bezeichnet. Die zu adsorbierende Komponente in der Gasphase ist das „Adsorptiv“. In der gebundenen adsorbierten Form ist diese Komponente das „Adsorbat“ (Kast 1988, S.3).

### Adsorption:

Adsorption ist die Anreicherung von einem Adsorptiv an einem Adsorbens. Bei hochporösen Materialien ist die Adsorptionskapazität besonders groß, da sie eine extrem große innere Oberfläche aufweisen. Die Adsorption darf nicht mit der Absorption verwechselt werden. Absorption ist die Lösung von Gasen in Flüssigkeiten unter Bildung einer homogenen Lösungsphase (Nunez 2001, S.2). In Abbildung 2 ist ein Bruchstück eines Adsorbenskorns dargestellt.

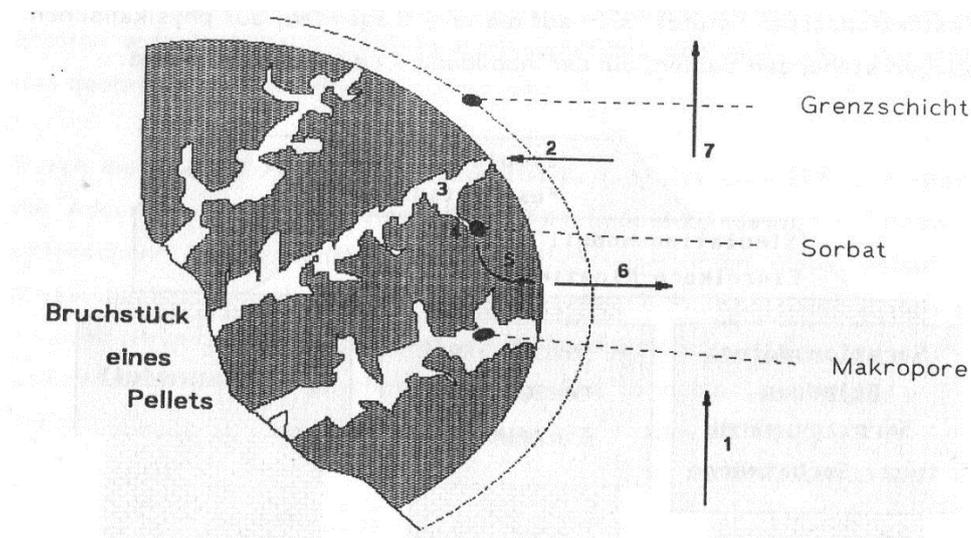


Abbildung 2: Wichtige Teilschritte bei der Adsorption (Gromes 1995, S.6)

- 1.) Ein Zuluftstrom befördert das Adsorptiv zu den Pellets.
- 2.) Auf der Grenzschicht erfolgt der Stoffübergang von der gasförmigen in die flüssige Phase des Adsorbats.
- 3.) Innerhalb des Pellet erfolgt der Stofftransport in die Makro- und Mikroporen.
- 4.) Durch physikalische Kräfte wie Van-der-Waals-Dispersionskräfte und elektrostatische Wechselwirkungen erfolgt die Wärmeabgabe.
- 5.) Die Wärme wird durch das Pellet zum Rand des Korns transportiert.
- 6.) Es erfolgt der konvektive Wärmeübergang zu dem Gasstrom.
- 7.) Die Wärme wird von dem veränderten Gasstrom abtransportiert.

Dieser Vorgang ist exotherm. Die chemische Reaktion für Wasser kann dabei wie folgt aufgestellt werden:



### Desorption:

Die Desorption stellt den umgekehrten Prozess der Adsorption dar. Die angelagerten Moleküle werden aus dem Feststoff ausgetrieben. Die Desorption erfolgt durch Wärmezufuhr oder über Absenkung des Adsorptiv-Partialdrucks in der Gasphase durch Evakuieren (Storch 2009 S.7). Diese endotherme Reaktion lautet:



Das thermodynamische Gleichgewicht der Ad- und Desorption kann nach der Phasenregel von Gibbs beschrieben werden, wenn zwei Größen bekannt sind (Hauer 2002, S. 6):

$$F(C, P, T) = 0 \quad (1)$$

Die Sorbensbeladung  $C$  in  $[\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Adsorbat}}]$  repräsentiert die adsorbierte Menge Wasser  $x_s$  auf die „trockene Masse“ Zeolith.  $P$  ist der Wasserdampfpartialdruck und  $T$  die Reaktionstemperatur. Wird eine der Größen konstant gehalten erhält man:

Isothermen für  $T = \text{konstant}$   $C = f(P)$

Isosteren für  $C = \text{konstant}$   $P = f(T)$

Isobaren für  $p = \text{konstant}$   $C = f(T)$

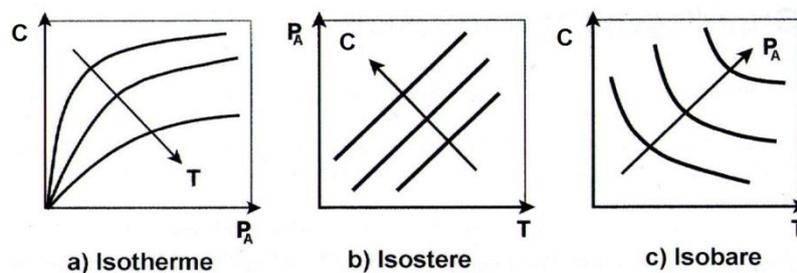


Abbildung 3: Darstellung des thermodynamischen Gleichgewichts bei der Adsorption (Steinweg 1996 in Bathen und Breitbach 2001, S.50)<sup>1</sup>

Der Verlauf der Isothermen gibt Auskünfte über die Wechselwirkung zwischen Adsorptiv und Adsorbens. In Abbildung 4 sind verschiedene Typen der Isothermen, je nach Adsorbens,

<sup>1</sup> Ursprünglich war die Sorbensbeladung  $C$  in diesem Diagramm das adsorbierte Volumen  $X$

dargestellt. Auf der Ordinate befindet sich das Verhältnis des Partialdrucks zum Sättigungsdampfdruck, auf der Abszisse die adsorbierte Gasmenge.

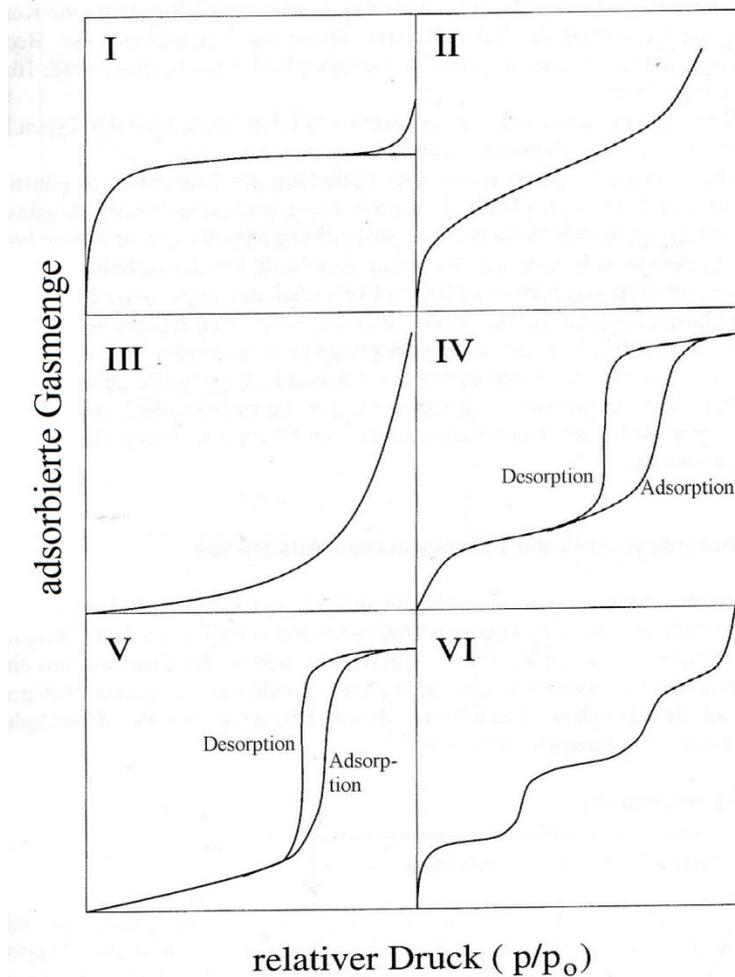


Abbildung 4: Klassifizierung der Isothermentypen (Ulbig 1999, in Bathen und Breitbach 2001, S.53)

Zur Bestimmung der Isothermen wird der Partialdruck  $p$  stufenweise von 0 bis zum Sättigungsdampfdruck  $p_0(T)$  des reinen Adsorptivs erhöht. Die adsorbierte Gasmenge wird über eine Mikrowaage gemessen. Eine genaue Beschreibung des Verfahrens wird in der DIN ISO 9277 vorgestellt (DIN 2014, S.15).

Bei der Adsorption an Zeolithen sind die Isothermen der Kategorie I aus Abbildung 4 zuzuordnen (Storch 2009, S.19). In Abbildung 5 ist der Verlauf der Isothermen der Kategorie I aufgetragen.

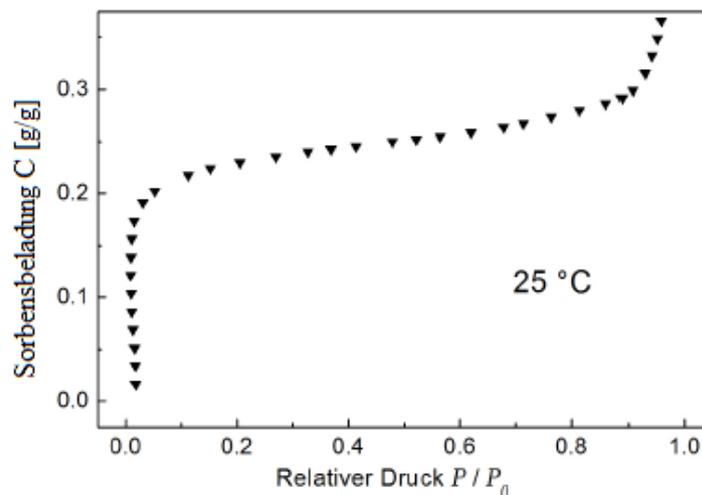


Abbildung 5: Gemessene Isotherme von Wasserdampf an Zeolith 13X Pellets (Storch 2009, S.19)<sup>2</sup>

Bei porösen Adsorbenten wie Zeolith beobachtet man mit zunehmender Beladung einen kontinuierlichen Übergang von der Adsorption zur Kapillarkondensation (Hauer 2002, S.17). Die bei unterschiedlichen Temperaturen gemessenen Isothermen können in einer „Charakteristische Kurve“ zusammengefasst werden. Diese setzt sich folgendermaßen zusammen.

Auf der Abszisse wird die freie Energie  $\Delta F$  aufgetragen. Diese kann bestimmt werden, wenn für die feuchte Luft das ideale Gasgesetz angenommen wird (Hauer 2002, S.20):

$$\Delta F = RT \ln \frac{P_s}{P_x} \quad (2)$$

Die freie Energie  $\Delta F$  kann direkt aus den Isothermen bestimmt werden. Dabei ist  $P_x$  der (Wasser) Dampfdruck über dem Adsorbens bei der Beladung  $x_s$ ,  $P_s$  ist der Sättigungsdruck für die Temperatur  $T$  und  $R$  die Gaskonstante von Wasser (Hauer 2002, S.20).

<sup>2</sup> Ursprünglich war die Sorbensbeladung  $C$  in diesem Diagramm die Wasserbeladung  $x_s$  (g/g)

Auf der Ordinate wird anstatt der Beladung  $x_s$  eine Hilfsgröße, das adsorbierte Volumen  $W$  aufgetragen. Wobei  $C_{max}$  die maximale Beladung  $x_s$  bezogen auf die Menge an Zeolith darstellt. Damit ergibt sich nach Hauer (2002, S.26):

$$W = \frac{C_{max}(T)}{\rho} \quad (3)$$

Die Dichte kann nach Hauer wie folgt genähert werden (Hauer 2002, S.27):

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha(T - T_0)) \quad (4)$$

Mit  $\rho_0$  : Dichte bei  $T_0$

$\alpha$  : Thermischer Ausdehnungskoeffizient

In Abbildung 6 ist die von Hauer entwickelte charakteristische Kurve zu sehen.

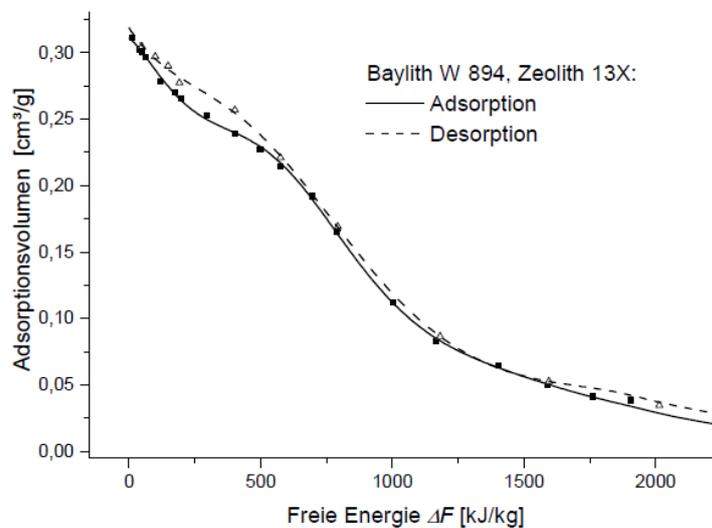


Abbildung 6: Charakteristische Kurve im Trägergassystem gemessen (Hauer 2002, S.37)

Aus der charakteristischen Kurve kann eine differenzielle Adsorptionseenthalpie  $\Delta H_d$  bestimmt werden. Die Gewinnung der Adsorptionseenthalpie ist ausschlaggebend für das Erwartungsverhalten der Temperatur, wie später gezeigt wird. Dabei gilt für die Adsorptionseenthalpie  $\Delta H_d$  nach Hauer (2002, S.29):

$$\Delta H_d = L + \Delta F - T\alpha'W \left. \frac{\partial \Delta F}{\partial W} \right|_T \quad (5)$$

„Die Adsorptionseenthalpie setzt sich aus drei Teilen zusammen: Der Verdampfungswärme  $L$ , der freien Energie  $\Delta F$  und einem Term  $T\alpha'W \left. \frac{\partial \Delta F}{\partial W} \right|_T$  der anschaulich gesprochen der festeren „Bindung“ der adsorbierten Phase (im Vergleich zur freien Flüssigkeit) Rechnung trägt. Die beiden rechten Terme werden im Folgenden häufig zur sogenannten „Bindungseenthalpie“ zusammengefasst.“ (Hauer 2002, S.29)

Hauer (2002, S.84) beschreibt, dass sich die auf die Adsorbensmenge bezogene integrale Adsorptionseenthalpie  $\Delta H_{Ads}$  [kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>] berechnen lässt, wenn die Adsorptionseenthalpie  $\Delta H_d$ , die bei einem Adsorptionsvorgang von  $C_{Ads} = 0$  bis  $C_{Des} = C_{max}$  umgesetzt wird, auf integriert wird:

$$\Delta H_{Ads} = \frac{\int_{C_{Ads}}^{C_{Des}} \Delta H_d(C) \cdot dC}{(C_{Ads} - C_{Des})} \quad (6)$$

### 2.1.3 Systeme zur Energiespeicherung mittels Zeolith

#### Offene und geschlossene Adsorptionssysteme

In geschlossenen Adsorptionsprozessen verlässt die adsorbierende Komponente das System nicht. Auch der Betriebsdruck kann variabel eingestellt werden. Die technische Umsetzung eines solchen Systems unterscheidet sich jedoch grundlegend von dem eines offenen Adsorptionssystems.

Bei der Desorption muss die Wärme über Wärmetauscher direkt in den Zeolithspeicher gebracht werden. Alternativ führt auch das Absenken des Betriebsdrucks in den Bereich des Unterdrucks dazu, dass das Adsorbat im Adsorbens/Zeolith verdampft. Das dampfförmige Adsorbens muss anschließend in einem Kondensator aufgefangen werden. Dabei kann die Kondensationswärme genutzt werden.

Bei der Adsorption wird mit Hilfe eines Verdampfers das Medium verdampft und dem Zeolithspeicher zugeführt. Dieser Prozess des Zuführens des Mediums kann solange wiederholt werden bis das Medium total getrocknet, oder der Zeolithspeicher voll beladen ist.

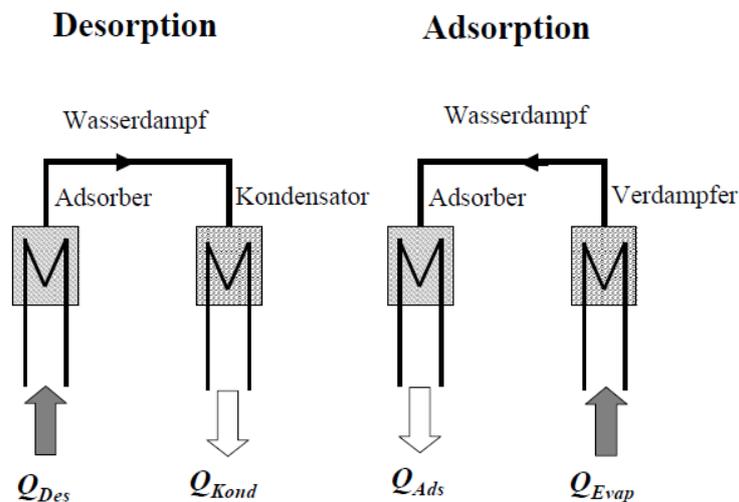


Abbildung 7: Geschlossene Adsorptionssysteme (Hauer 2009, S.6)

Bei offenen Adsorptionssystemen ist das Adsorbens mit der Umgebung in direktem Kontakt. Es wird daher bei Umgebungsdruck betrieben (Hauer 2009, S.4). In Abbildung 8 sind die De- und Adsorptionsprozesse eines offenen Systems abgebildet.

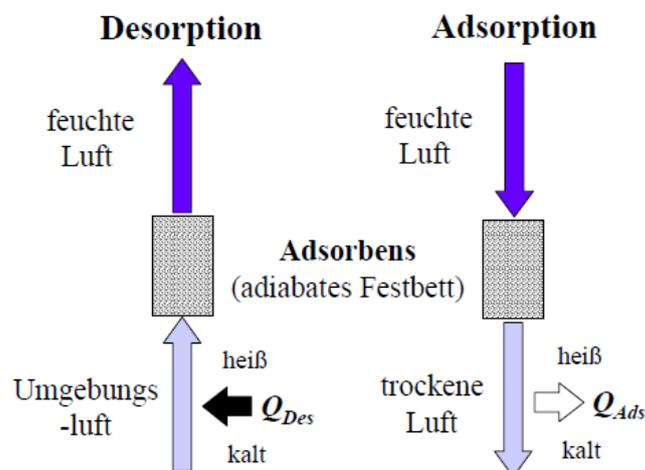


Abbildung 8: Offener Adsorptionsprozess (Hauer 2009, S.5)

Bei der Desorption wird trockene und heiße Luft zum Entfeuchten des Zeolithspeichers genutzt. Das Wasser wird dabei verdampft. Der austretende Luftstrom wird dadurch abgekühlt.

Bei der Adsorption wird dem getrockneten Speicher feuchte Luft zugeführt. Der Wasserdampf wird dabei von dem Zeolithspeicher adsorbiert. Durch die frei werdende Adsorptionswärme wird der Luftstrom erwärmt, sodass die austretende Luft den Zeolithspeicher nun trocken und heiß verlässt.

## 2.2 Messtechnik

Damit aus der Zu- und Abluft des Zeolithspeichers die Wärmemengen bestimmt werden können sind verschiedenste Messdaten zu erfassen. Um Aussagen bezüglich der Wärmemengen machen zu können wird die Temperatur, relative Feuchte und Geschwindigkeit des Luftstromes benötigt. Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Messgeräte beschrieben, ihr Aufbauprinzip kurz erläutert und die Messtoleranzen aus den Herstellerunterlagen angegeben.

### 2.2.1 Messung der Geschwindigkeit

In Abbildung 9 ist das eingebaute Flügelradanemometer sowie das Bedienelement zu sehen.



Abbildung 9: Flügelradanemometers (Peak Tech Prüf- und Messtechnik, 2015)

Ein Flügelrad wird durch den Luftstrom in Rotation versetzt. Aus der Drehzahl kann das Messgerät die Geschwindigkeit ermitteln.

Die durchströmte Fläche durch das Flügelradanemometer ist:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2 - d^2}{4} \quad (7)$$

Hier bildet der äußere Durchmesser  $D$  und der innere Durchmesser  $d$  die Kreisringfläche des Flügelrads. Für den Einbau in den Versuchsstand muss ein Adapter gebaut werden, der das Gehäuse des Anemometers mit dem bestehenden Strömungskanal verbindet.

Dieses Verfahren erwies sich als kostengünstig und kann mit der vorhandenen USB Schnittstelle mit einem PC ausgelesen werden.

Zusätzlich erfasst das Gerät die Temperatur der austretenden Luft und besitzt einen Infrarot Laserstrahl zur Erfassung der Temperatur, welche im Rahmen dieser Arbeit irrelevant ist. In Tabelle 2 sind die zugehörigen Messtoleranzen angegeben.

**Tabelle 2: Specifications (Peak Tech Prüf- und Messtechnik, 2015)**

	Messbereich	Messtoleranzen
Geschwindigkeit	0,40 m/s – 30,00 m/s	$\pm 3\% \pm 0,20$ m/s
Lufttemperatur	-10-60°C	$\pm 2^\circ\text{C}$
IR-Temperatur	-50 – 500°C	$\pm 2\%$

Mit Hilfe eines Labview Programms konnten die Daten ausgelesen werden. Die Einbindung des Messgerätes in das Labview Programm wird in Kapitel 5.2 vorgestellt.

### 2.3.1 Messung der Relativen Feuchte

Die Messzellen, die zur Messung der relativen Feuchten erforderlich sind, wurden an einem Messumformer der Serie EE33 (E+E Elektronik 2015a) angeschlossen. Im Versuchsaufbau wurde eine Messzelle zur Messung der relativen Feuchte der Firma E+E Elektronik® Ges.m.b.H. eingebaut. Das Aufbauprinzip der Messung der relativen Feuchte besteht in einer „beheizten, monolithischen Messzelle HMC1“ mit einem Filter aus Edelstahldrahtgewebe (E+E Elektronik 2015b). Im Datenblatt des Messgerätes sind folgende Toleranzbereiche angegeben.

**Tabelle 3: Messfehler Relativer Feuchte (E+E Elektronik 2015a, S.15)**

Messbereich	Messtoleranzen
-40...180°C	$\pm (1,5 + 1,5\% * MW) \% \text{ rF}$

### 2.3.2 Messung der Temperatur

Die Messzellen, die zur Messung der Temperaturen erforderlich sind, wurden an einen Messumformer der Serie EE33 (E+E Elektronik 2015a) angeschlossen. Die Messung der Temperaturen erfolgte durch eine „monolithische Messzelle HMC1“. Die zu erwartenden Messtoleranzen bei einer bestimmten Temperatur sind im folgenden Diagramm dargestellt.

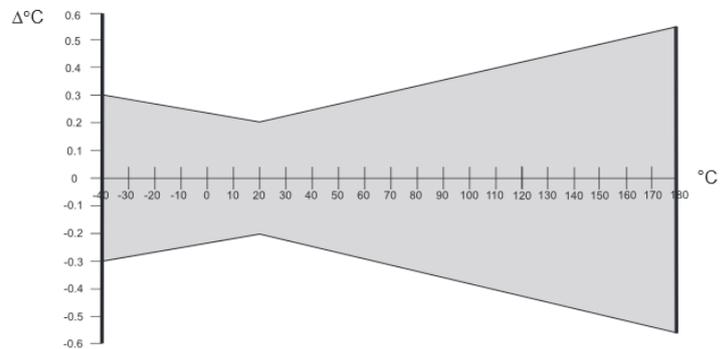


Abbildung 10: Messtoleranz der Temperatur über dem Messbereich (E+E Elektronik 2015a, S.15)

### 3 Ausgangszustand des Versuchsstands

Bei dem Versuch handelt es sich um ein offenes Adsorptionssystem. Im Folgenden wird dargestellt, wie der Versuchsstand in seiner Hard- und Software zu Beginn der Bachelor Arbeit übernommen wurde.

#### 3.1 Hardware

In Abbildung 11 ist dargestellt wie der Versuchsstand in seiner Hardware zu Beginn der Bachelor Arbeit aufgebaut war.

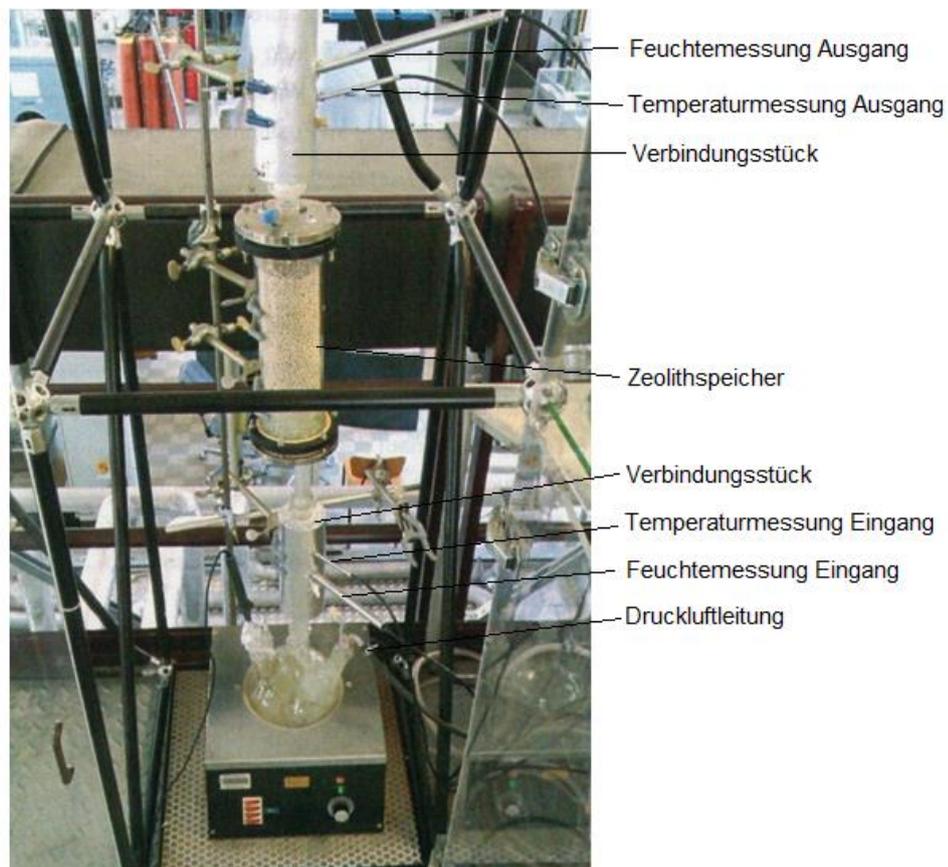
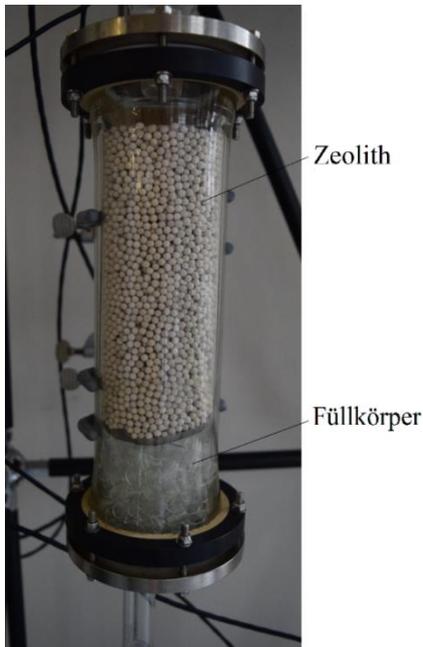


Abbildung 11: Zustand des Zeolithspeichers zu Beginn der Bachelor Arbeit

Der Zuluftstrom wird aus einer Druckluftleitung entnommen. Über einen Druckreduzierer kann der Druck der Zuluft eingestellt werden. Der Dreihalskolben wird mit Hilfe einer Heizhaube beheizt, damit die ca. 10°C einströmende Druckluft für die Ad- und Desorptionsvorgänge auf ein höheres Temperaturniveau gehoben werden kann. In den Verbindungsstücken vor und hinter dem Zeolithspeicher sind Feuchte- und Temperatursonden angebracht.

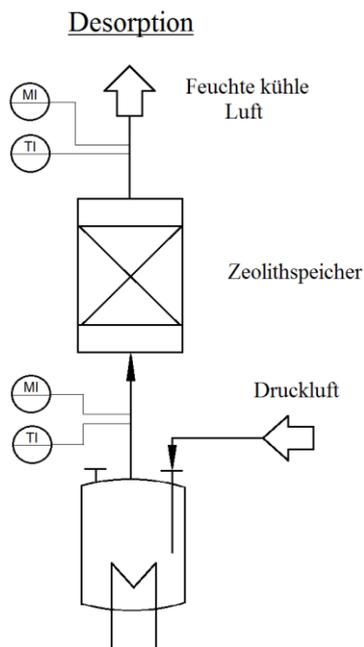


Der Wärmespeicher in Abbildung 12 besteht aus einem Glaszylinder, der 680g Zeolith enthält. Eine Schicht von Füllkörpern im Bereich der Einströmung des Zeolithspeichers sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Zuluftstroms.

Abbildung 12: Zeolithspeicher

Der Ablauf der Ad- und Desorption wird anhand von Fließbildern dargestellt.

Die Desorption wird in Abbildung 13 dargestellt.



Legende:

M: Moisture indicator (Relative Feuchte Anzeige)

T: Temperature indicator (Temperatur Anzeige)

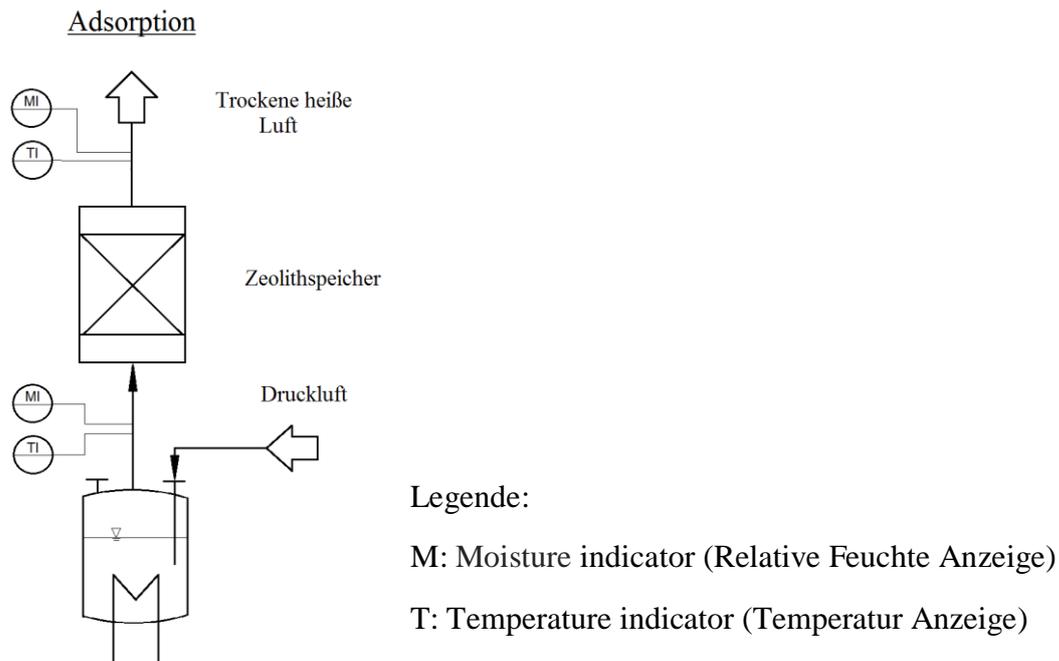
Abbildung 13: Verfahrensflißbild Desorption

Die Verfahrensflißbilder in Abbildung 13 und Abbildung 14 wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN 10628 gezeichnet (DIN 2013).

Über einen Wärmetauscher wird die trockene Luft erhitzt. Die trockene und heiße Luft wird anschließend in den Zeolithspeicher eingeleitet. Der Speicher ist zu Beginn mit Wasser

gesättigt. Die trockene und heiße Luft nimmt das Wasser auf und wird dann an die Umgebung abgeführt.

Die Adsorption ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Verfahrensfließbild Adsorption Anfangszustand**

Zum Befüllen des Behälters (Dreihalskolben) mit Wasser muss der Behälter (Dreihalskolben) abgebaut werden. In dem mit Wasser gefüllten Behälter wird Druckluft zugeführt. Dadurch kann die Druckluft mit Wasserdampf nahezu gesättigt werden. Die Temperatur und Feuchte der Luft wird über Messsonden gemessen. Im Anschluss wird die gesättigte feuchte Luft in den Zeolithspeicher zugeführt. Das Zeolith, welches durch die Desorption getrocknet wurde, kann nun die Wassermoleküle adsorbieren. Dadurch wird der Luftstrom zum einen getrocknet und zum anderen erwärmt. Die aus dem Zeolithspeicher austretende Luft ist nun trocken und heiß. Auch hier wird der Luftstrom auf Feuchte und Temperatur gemessen.

Bei dem Versuchsaufbau waren folgende Probleme zu erkennen:

- Die Heizhaube und die einströmende Druckluft benötigen eine gewisse Zeit, bevor sie sich auf ein konstantes Temperaturniveau eingeregelt haben. Dadurch ist es mit diesem Versuchsaufbau schwer, zu Beginn der Messwertaufnahme des Versuchs einen stationären Zustand zu erreichen.
- Des Weiteren ist es nötig den Speicher, nachdem er getrocknet oder mit Wasser beladen wurde, vor der Umgebung zu schützen. Zum einen kann die feuchte Luft der Umgebung dazu führen, dass das Zeolith unkontrolliert mit Wasserdampf beladen wird. Zum anderen führt trockene Luft in der Umgebung zu einem Abtransport des Wassers im Zeolith.
- Die Strömungsgeschwindigkeit wurde nur zu Beginn des Versuchs gemessen. Jedoch kann sich die Strömungsgeschwindigkeit über die Dauer des Versuchs ändern.
- Die jetzigen Messgeräte befinden sich auf einem Tisch neben dem Versuchsstand.
- Der Versuchsstand weist noch Undichtigkeiten auf, sodass bei Drücken von 1,5 bar Wasser aus dem Zeolithspeicher tropft.
- Das Befüllen des Behälters (Dreihalskolben) mit Wasser ist umständlich und kann beim Demontieren die Glasteile beschädigen.

## 3.2 Software

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie die Messwerte der relativen Feuchte und Temperatur zu Beginn der Bachelor Arbeit von dem Labview Programm eingelesen und verarbeitet wurden.

In Abbildung 15 wird dargestellt, wie die Daten aus der COM4 Schnittstelle ausgelesen werden. Dafür wurde ein Eingangsstring eingelesen, der die Informationen der Eingangs- und Ausgangswerte der Temperatur und relativen Feuchte enthält. Diese Werte sind numerische Größen und müssen über eine Geradengleichung in repräsentative Größen für Temperatur [°C] und relative Feuchte [%] umgerechnet werden.

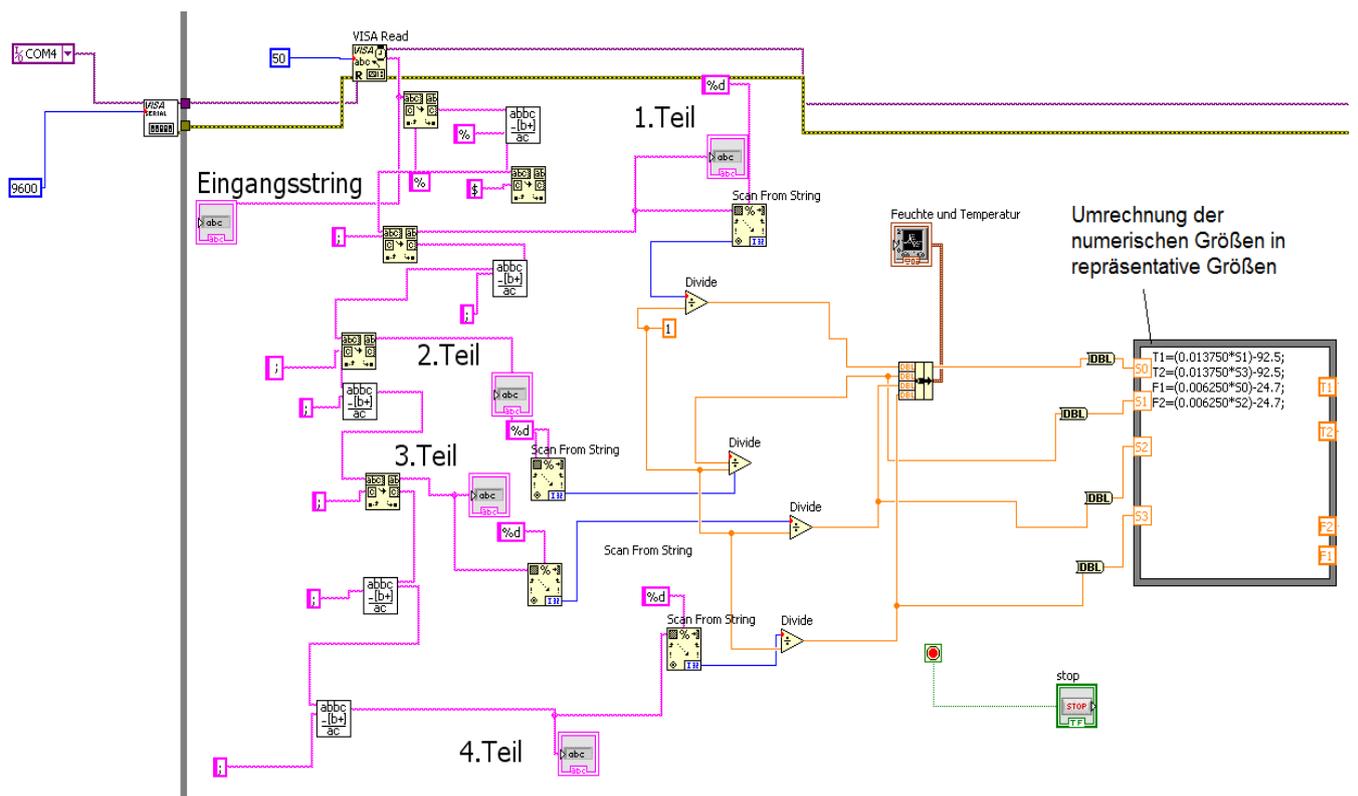


Abbildung 15: Einlesen der Messwerte

Abbildung 16 ist die Fortsetzung von Abbildung 15. Hier werden die Messwerte in einem Mathscript eingelassen und die für das Speicherverhalten nötigen Rechengrößen berechnet.

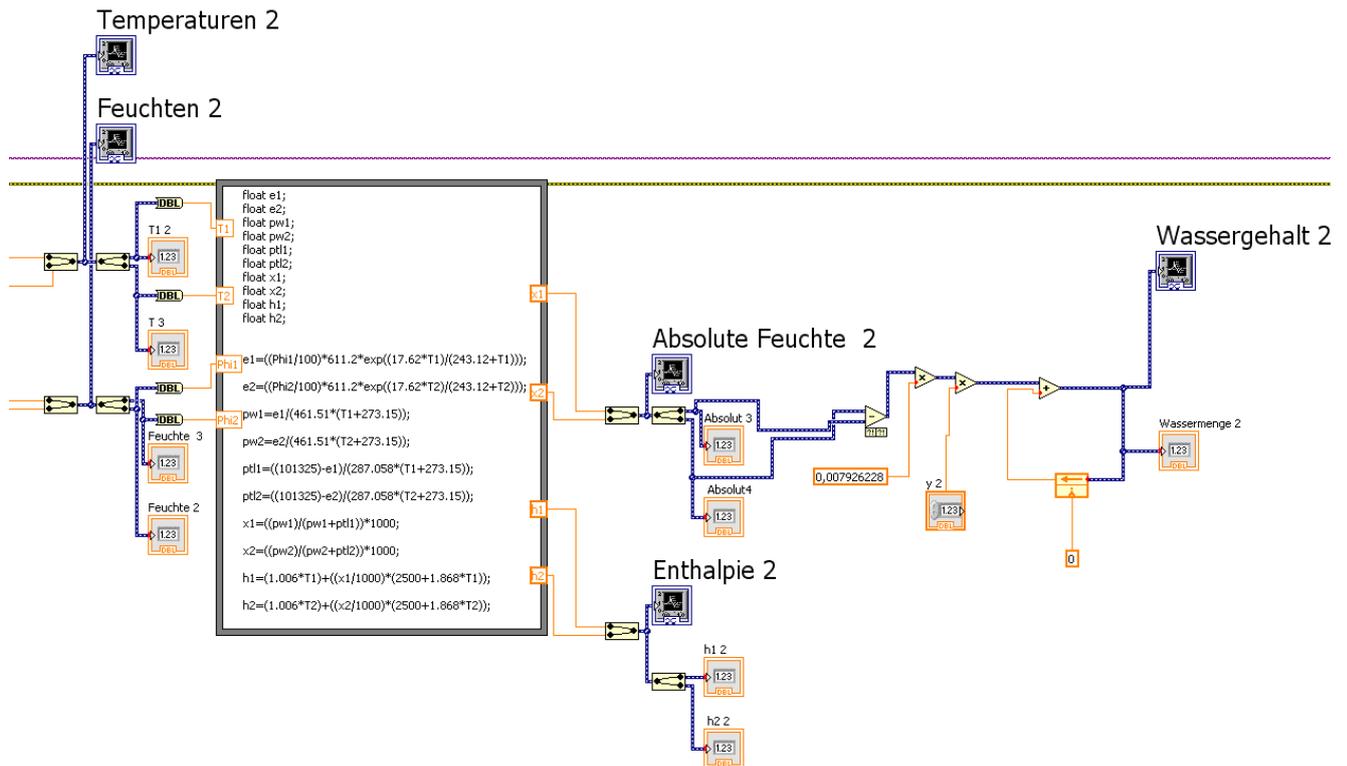


Abbildung 16: Auswerten der Messwerte

Bei der Software waren folgende Probleme zu erkennen.

- Das Labview Programm ist sehr unübersichtlich.
- Bei der Umrechnung der numerischen Größen in Temperatur [°C] sind noch deutliche Abweichungen beim Vergleichen der Anzeigewerte der Messgeräte mit den vom Programm berechneten Werten zu verzeichnen.
- Auch die Umrechnung der Messwerte in Rechenwerte ist in Frage zu stellen.
- Es ist nicht ersichtlich, dass eine von der Temperatur abhängige Dichte berechnet wurde.
- Die Geschwindigkeit am Austritt wurde bisher nur einmal zu Beginn des Versuchs gemessen und manuell eingegeben. Jedoch kann sich die Geschwindigkeit über die Dauer des Versuchs ändern.

## 4 Erwartung zum Speicherverhalten

Im folgenden Kapitel wird gezeigt, welche Gleichungen benötigt werden, um das Speicherverhalten zu beschreiben. Dabei wurden für die Adsorption und Desorption verschiedene Berechnungsansätze in der Literatur gefunden. Der Ad- und Desorption gemeinsam ist, dass die thermodynamischen Zustände vor und hinter dem Zeolithspeicher bestimmt werden müssen.

### 4.1 Grundlagen feuchter Luft

Gegeben ist die Temperatur  $\vartheta$  [°C] und die relative Feuchte  $\varphi$  [%] am Eintritt und Austritt des Versuchsstands. Des Weiteren ist die austretende Geschwindigkeit  $v$  [m/s] am Austritt des Versuchsstands gegeben.

Mit Hilfe von linearer Interpolation kann aus der Dampf tabel der Sättigungsdruck  $p_s$  [bar] bestimmt werden. Aus dem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck  $p_s$  [N/m<sup>2</sup>] und der relativen Feuchte  $\varphi$  [-] kann nach Gleichung (8) der Partialdruck des Wasserdampfes  $p_w$  [N/m<sup>2</sup>] berechnet werden. Die gegebene Größe relative Feuchte  $\varphi$  [%] muss in eine dimensionslose Größe und der Partialdruck des Wasserdampfes  $p_w$  [bar] in die Einheit [N/m<sup>2</sup>] umgerechnet werden:

$$p_w = \frac{\varphi}{100} \cdot p_s \cdot 100000 \quad (8)$$

Die absolute Feuchte  $\rho_w$  [g/m<sup>3</sup>] ist:

$$\rho_w = \frac{p_w \cdot 1000}{R_w \cdot T} \text{ mit } R_w = 461,5 \frac{J}{kg K} \quad (9)$$

Der Faktor 1000 in Gleichung (9) ist die Umrechnung von kg in g. Die Wasserdampfbeladung  $X$  [kg/kg] der feuchten Luft wird aus dem Quotient der Masse des Wassers  $m_w$ , zur Masse der trockenen Luft  $m_l$  gebildet:

$$X = \frac{m_w}{m_l} = 0,622 \cdot \frac{p_s}{\frac{p}{\varphi} - p_s} \quad (10)$$

Für die Dichte der feuchten Luft gilt:

$$\rho_{1+X} = \frac{p}{R_l \cdot T} \left( \frac{1}{1+1,608 \cdot X} \right) \text{ mit } R_l = 287,1 \frac{J}{kg K} \quad (11)$$

Der Massenstrom der feuchten Luft  $\dot{m}_{aus}$  kann aus dem Querschnitt der durchströmten Fläche  $A$  nach Gleichung (7), der gemessenen Geschwindigkeit  $w$  und der Dichte der feuchten Luft  $\rho_{1+X}$  nach Gleichung (11) berechnet werden zu:

$$\dot{m}_{aus} = A \cdot w \cdot \rho_{1+X} \quad (12)$$

Der Massenstrom der Luft  $\dot{m}_l$  kann dann mit Hilfe der Wasserdampfbeladung berechnet werden:

$$\dot{m}_l = \frac{\dot{m}_{aus}}{X_{aus} + 1} \quad (13)$$

Nach dem Massenerhaltungssatz ist der austretende gleich dem eintretenden trockenen Luftstrom. Da der Zeolithspeicher je nach Adsorption- oder Desorptionsprozess Wasser aufnimmt oder abgibt, werden die Massenströme des Wassers für unterschiedliche Wasserdampfbeladungen  $X_1/X_2$  differenziert:

$$\dot{m}_w = X_{1/2} \cdot \dot{m}_l \quad (14)$$

Die aufgenommene Menge an Wasser im Zeolithspeicher wird nach Gleichung (15) bestimmt. Zunächst wird die Differenz des eintretenden Wassermassenstromes zum austretenden Wassermassenstrom ermittelt. Um aus dem Massenstrom die Menge an Wasser zu bestimmen, muss die Zeit  $t$  [s], die zum Durchlaufen der Schleife benötigt wird, dazu multipliziert werden:

$$m_w = (\dot{m}_{w,aus} - \dot{m}_{w,ein}) \cdot t \quad (15)$$

Die spezifische Enthalpie  $h_{1+X}$  [kJ/kg] kann berechnet werden nach:

$$h_{1+X} = h_l + X \cdot h_w \quad (16)$$

$$h_w = \Delta h_v + c_{p,d} \cdot \vartheta \quad (17)$$

$$h_l = c_{p,l} \cdot \vartheta \quad (18)$$

Einsetzen der Gleichung (17) und (18) in Gleichung (16) mit den Konstanten

$$c_{p,l} = 1,004 \frac{kJ}{kg K}, c_{p,w} = 1,86 \frac{kJ}{kg K} \text{ und } \Delta h_v = 2500 \frac{kJ}{kg}$$

ergibt sich die spezifische Enthalpie zu:

$$h_{1+X} = 1,004 \frac{kJ}{kg K} \cdot \vartheta + X \cdot \left[ 2500 \frac{kJ}{kg} + 1,86 \frac{kJ}{kg K} \cdot \vartheta \right] \quad (19)$$

Die Enthalpie  $\Delta H$  der feuchten Luft wird berechnet zu:

$$\Delta H = m_l \cdot \Delta h_{1+X} \quad (20)$$

Die Masse der trockenen Luft  $m_l$  ergibt sich beim Durchlaufen der Schleife. Der Wert  $\Delta h_{1+X}$  ergibt sich aus der Differenz der eintretenden spezifischen  $h_{1+X,1}$  zur austretenden spezifischen Enthalpie  $h_{1+X,2}$  nach:

$$\Delta h_{1+X} = h_{1+X,2} - h_{1+X,1} \quad (21)$$

Die hier vorgestellten Formeln müssen in das Labview Programm eingearbeitet werden.

## 4.2 Adsorption

Bei der Adsorption strömt feuchte Luft in die Schüttung. Trifft diese feuchte Luft bzw. das Adsorptiv auf die Fläche der Schüttung, wird der Wasserdampf von dem Zeolith bzw. dem Adsorbens adsorbiert. Der Bereich, in dem die Adsorption stattfindet, wird Mass Transfer Zone kurz MTZ genannt. Das Adsorbat unterhalb der MTZ ist mit seiner maximalen Beladung an Wasser gesättigt. Nach der MTZ erwärmt der trockene und heiße Luftstrom das dahinterliegende Festbett. Nach einer Aufheizphase des Festbetts stellt sich ein stationärer Zustand ein. Dies verdeutlicht sich durch einen konstanten maximalen Temperaturhub  $\Delta T$ , der sich über eine gewisse Zeit halten kann:

$$\Delta T = T_{\text{aus}} - T_{\text{ein}} \quad (22)$$

In Abbildung 17 ist der Verlauf der Ein- und Austrittslufttemperaturen bei der Adsorption für Zeolith über die Versuchszeit dargestellt.

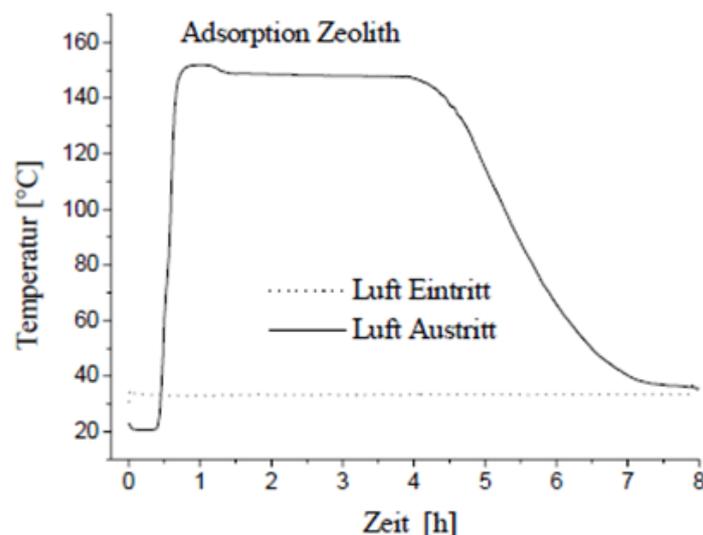


Abbildung 17: Ein- und Austrittslufttemperaturen bei Adsorption für Zeolith (Hauer 2002, S.52)

Nach der Aufheizphase, bei der die austretende Luft immer größer wird, ist ein Plateau zu erkennen, welches den maximalen Temperaturhub darstellt. Bricht dieser Temperaturhub  $\Delta T$  ab, wird diese Veränderung als Durchbruchkurve bezeichnet. Ab diesem Zeitpunkt nimmt der Temperaturhub ab. Damit die Maximaltemperatur gehalten werden kann sind Festbettschüttungen mit einer großen Menge an Zeolith nötig.

Bei der Darstellung in Abbildung 17 wurde der Versuch mit einer Zeolithmenge von 39,13 kg durchgeführt. Für Versuche mit weniger Zeolith wird der Temperaturverlauf eher dem Kurvenverlauf in Abbildung 18 entsprechen. Diese Versuche wurden mit einer Zeolithmenge von 2,6 kg durchgeführt (Weber R. et al. 2013, S.11).

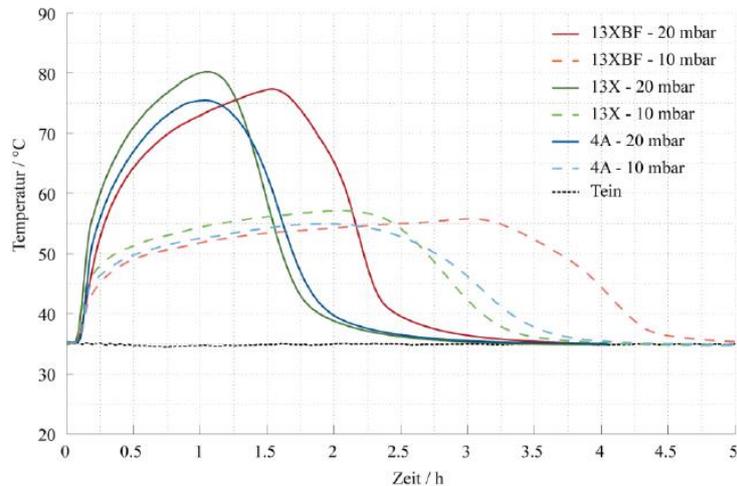


Abbildung 18: Gemessene Temperaturverläufe bei der Adsorption von Wasserdampf am Sorptionsmaterial Zeolith 4A, Zeolith 13X und Zeolith 13XBF, Wasserdampfpartialdrücke 10 mbar oder 20 mbar [22] (Weber R. et al. 2013, S.6)

Bei den experimentellen Versuchen von Hauer (2002, S.86) ergaben sich bei dem Temperaturhub  $\Delta T$  zur Differenz des Wassergehaltes  $\Delta X$  eine Gerade. Wie in Abbildung 19 dargestellt.

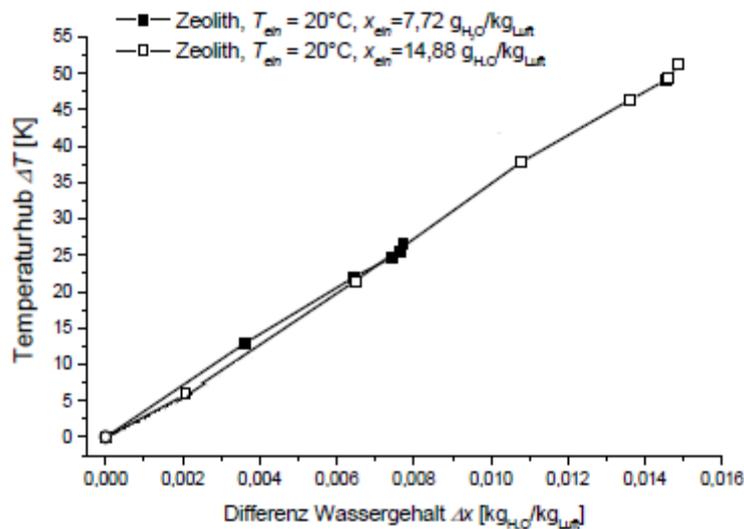


Abbildung 19: Experimenteller Zusammenhang zwischen Temperaturhub und Veränderung des Wassergehaltes der Luft während der Adsorption (Hauer 2002, S. 86)

Für den linearen Zusammenhang zwischen Temperaturhub und Veränderung des Wassergehalts gilt (Hauer 2002, S.87):

$$\frac{\Delta T}{\Delta X} = \text{Konstant.} \quad (23)$$

Für den Temperaturhub stellt Hauer (2002, S.78) den folgenden Zusammenhang fest:

$$\Delta T = \Delta X \cdot \frac{\Delta H_{\text{Ads}}}{c_{p\text{Luft}} - \frac{\Delta X}{\Delta C} \cdot c_{\text{sorb eff}}} \quad (24)$$

Die effektive spezifische Wärmekapazität  $c_{\text{sorb eff}}$  ist von der Beladung des Adsorbens abhängig und wird genähert mit (Hauer 2002, S.87):

$$c_{\text{sorb eff}} = c_{\text{sorb}} \cdot (C \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (25)$$

Die Wasserbeladung des Adsorbens  $\Delta C \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sorb}}}$  stellt das Verhältnis der Beladung an Wasser zur Menge an Zeolith im Speicher dar (Hauer 2002, S.87).

Für die Auslegung offener Sorptionssysteme ist der maximale Temperaturhub von entscheidender Bedeutung. Bei ausreichend langen Sorptionssystemen kann davon ausgegangen werden, dass die Luft vollständig entfeuchtet wird.

Dann gilt  $X_{\text{aus}} = 0 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Luft}}$  und daraus folgt  $\Delta X = X_{\text{ein}}$ . Die effektive spezifische Wärmekapazität  $c_{\text{sorb eff}}$ , die über der Mass Transfer Zone (MTZ) erwärmt werden muss, reduziert sich auf die trockene Zeolithmasse und wird somit zu  $c_{\text{sorb}}$ . Unter diesen Annahmen lässt sich der maximale Temperaturhub berechnen (Hauer 2002, S.88):

$$\Delta T_{\text{max}} = X_{\text{ein}} \cdot \frac{(\Delta H_{\text{Ads}})C_{\text{max}}}{c_{p\text{Luft}} - \frac{X_{\text{ein}}}{C_{\text{max}}} \cdot c_{\text{sorb}}} \quad (26)$$

### 4.3 Desorption

In Abbildung 20 ist der Verlauf der Ein- und Austrittslufttemperaturen bei der Desorption für Zeolith über die Versuchszeit dargestellt.

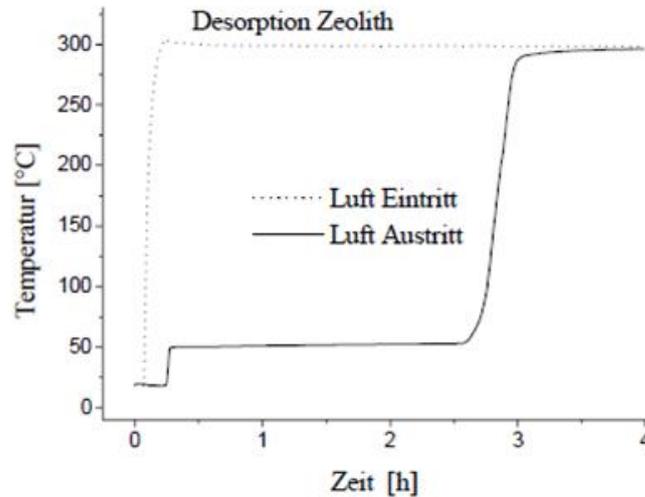


Abbildung 20: Ein- und Austrittslufttemperaturen bei Desorption für Zeolith (Hauer 2002, S.52)

Bei der Desorption wird mit einem heißen Luftstrom das Zeolith getrocknet. Die Temperatur der eintretenden trockenen Luft ist durch die prozessspezifischen Randbedingungen gegeben. Deswegen sollte die eintretende Luft nicht oberhalb der Schmelztemperatur der verwendeten Bauteile liegen. Für die Dauer der Desorption werden in der Literatur unterschiedliche Zeiten angegeben. So berichtet Hauer (2002, S.32), dass die Dauer bis zum Gleichgewicht nach (1) bis zu 24 Stunden dauern kann und verweist auf Toda (1970 S.565), der berichtet, dass bis zum Einstellen eines Gleichgewichts bis zu einem Monat vergehen kann. Nach Weber (et. al. 2013, S.12) wird die Dauer der Desorption von 32 Stunden bei einer Eintrittstemperatur von 180°C bzw. 200°C angegeben.

Der Energiebedarf für die Desorption kann berechnet werden zu (Bathen et al. 2001, S.149):

$$\dot{Q}_{Des} = \dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,l} \cdot (T_{ein} - T_{aus}) \quad (27)$$

Der Wasseranteil im Luftstrom wird für die Berechnung vernachlässigt (Weber et. al. 2013, S.28).

## 5 Optimierung des Versuchsstands

Um den Versuchsstand zu verbessern, wurde an den Änderungen und Erweiterungen der Hardware und Software gearbeitet. Dabei wurde, ausgehend von den in Kapitel 3 „Ausgangszustand des Versuchsstands“ beschriebenen Problemen, Lösungsansätze entwickelt und umgesetzt.

### 5.1. Konstruktive Änderungen

In diesem Kapitel werden die konstruktiven Änderungen dargestellt. Im Anschluss wird erklärt, wie der Prozess der Ad- und Desorption mit dem Versuchsstand durchgeführt wird. In Abbildung 21 ist der Zustand des Zeolithspeichers gegen Ende der Bachelor Arbeit dargestellt.

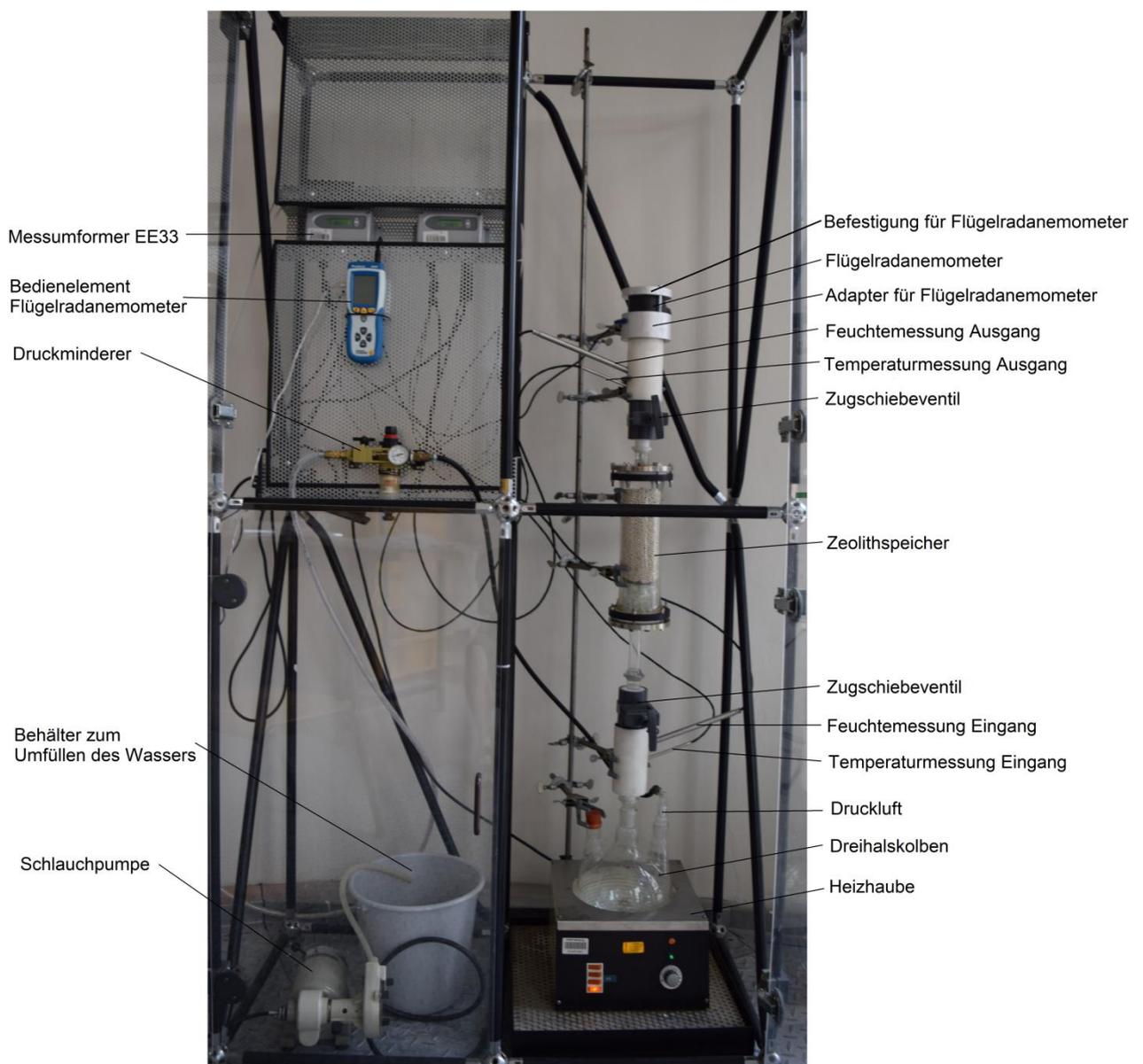


Abbildung 21: Zustand des Zeolithspeichers zum Ende der Bachelor Arbeit

Es wurde ein Flügelradanemometer zum Messen der austretenden Geschwindigkeit verbaut, der die austretende Geschwindigkeit über die gesamte Dauer des Versuchs messen kann. Für das Flügelradanemometer wurde ein Adapter gefertigt, der einen Übergang vom Durchmesser des Flügelradanemometers zu dem Durchmesser des Anschlussstücks, in welchem die Messgeräte verbaut sind, gewährleistet. Zusätzlich wird das Messgerät von einem Deckel mit zwei Schrauben fixiert. Angebrachte Zugschiebeventile in den Anschlussstücken sorgen dafür, dass der Zeolithspeicher nach der Desorption abgesperrt werden kann. Damit wird gewährleistet, dass keine Feuchtigkeit eindringen kann. Für das Bedienelement des Flügelradanemometers, die Messumformer der Feuchte- und Temperaturanzeige sowie dem Druckminderer wurde eine Halterung konstruiert und gefertigt. Eine Fertigungszeichnung zu der Halterung, dem Adapter sowie dem Umbau der Halterungen der Messgeräte sind im Anhang (Kapitel A3) beigelegt. Der untere Teil des Zeolithspeichers wurde abgedichtet. Weiterhin wurde der Versuchsstand durch den Einbau einer Schlauchpumpe optimiert. Dadurch muss der Behälter (Drehhalskolben) zum Be- und Entladen des Wassers nicht mehr demontiert werden.

### 5.1.1 Durchführung der Adsorption

Der Prozess der Adsorption ist in dem Fließbild Abbildung 22 dargestellt.

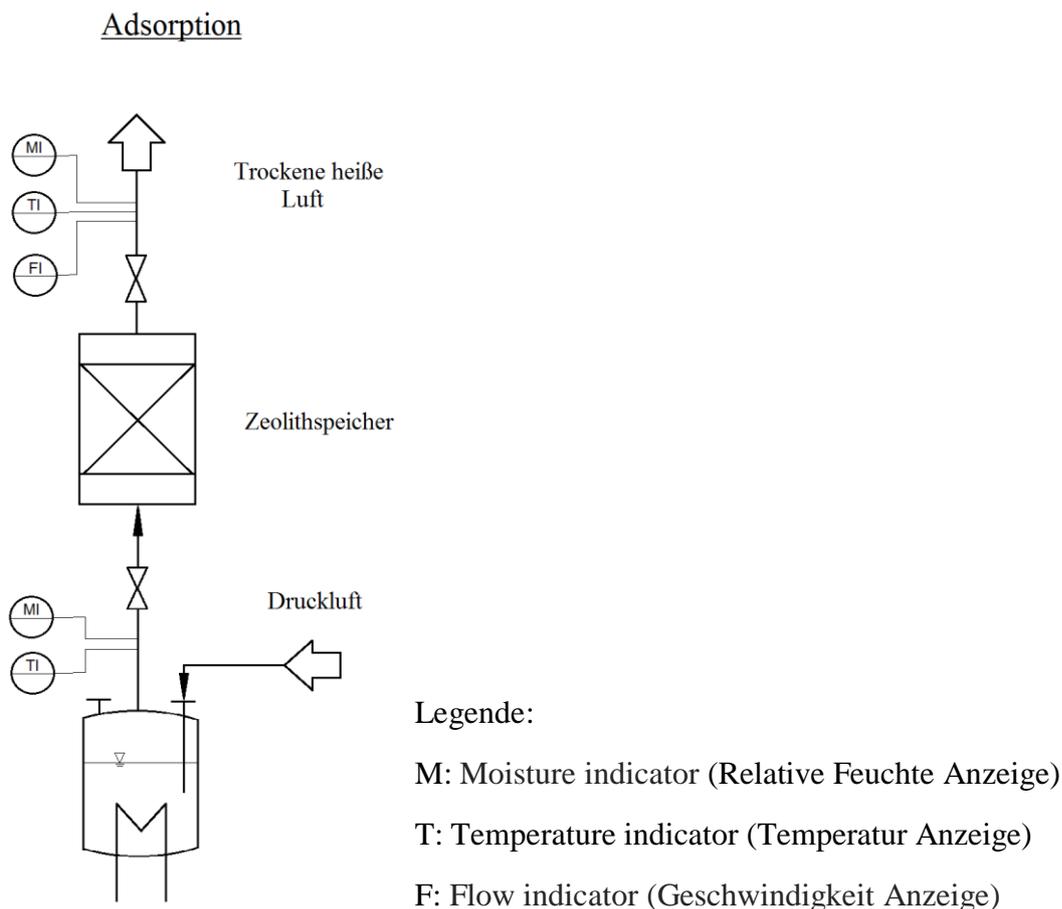


Abbildung 22: Verfahrensfließbild Adsorption

Der Vorgang der Adsorption beginnt mit dem Befüllen von ca. 1 ½ Liter Wasser in den Behälter (Dreihalskolben) mit Hilfe einer Schlauchpumpe. Die Schlauchpumpe ist an einem mit Wasser gefüllten Vorratsbehälter angeschlossen. Die Druckluft kann beim Durchströmen des Wassers mit Wasserdampf nahezu gesättigt werden. Damit sich ein stationärer Zustand einstellt, muss das Zugschiebeventil vor dem Zeolithspeicher, wie in Abbildung 23 dargestellt, geschlossen werden.

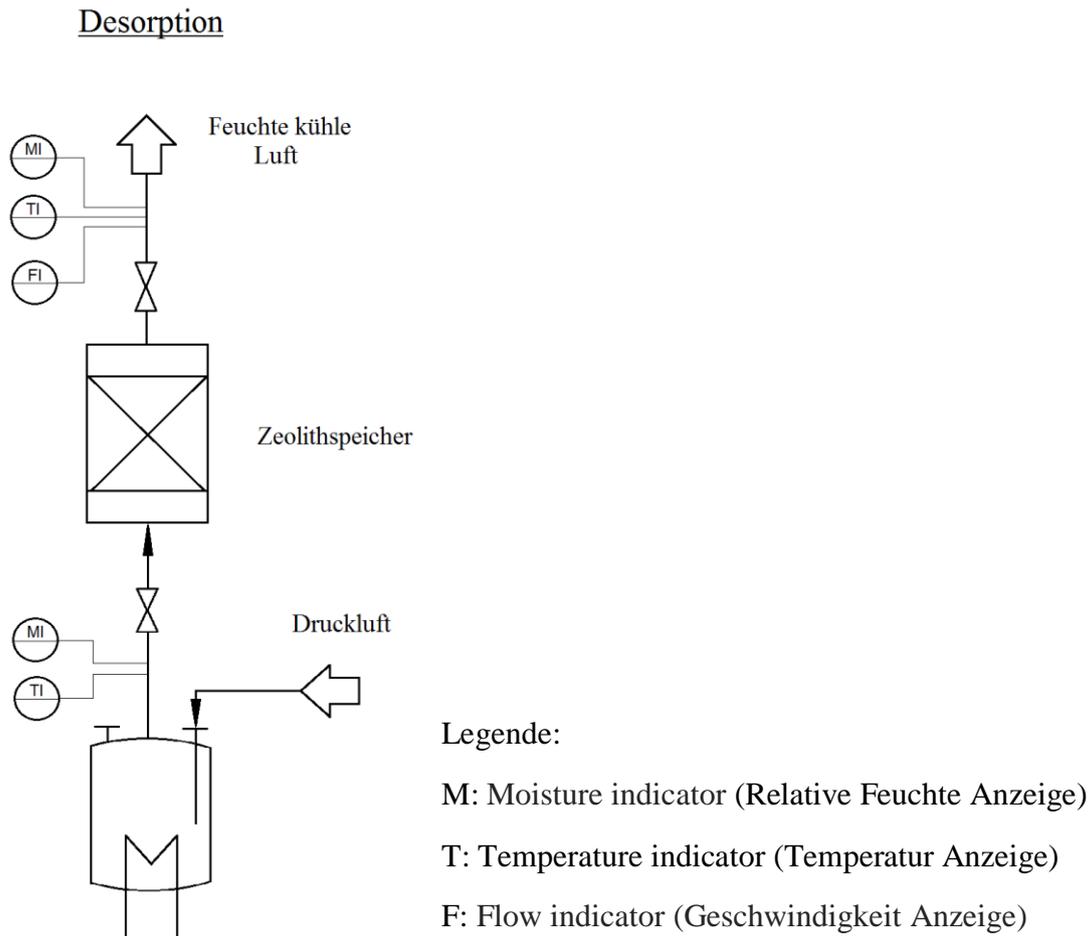


**Abbildung 23: Einstellen eines stationären Zustands für die Desorption**

Die feuchte Luft wird dabei über den Auslassstutzen abgeführt. Die Temperatur und Feuchte der Luft wird über Messsonden gemessen. Wenn die Temperatur stationär ist kann das Zugschiebeventil geöffnet werden. Das Zeolith kann nun die Wassermoleküle adsorbieren. Die aus dem Zeolithspeicher austretende Luft ist nun trocken und heiß. Auch hier wird der Luftstrom auf Feuchte und Temperatur gemessen. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit des Luftstroms gemessen.

## 5.1.2 Durchführung der Desorption

Für die Desorption wird der Prozess wie in Abbildung 24 durchgeführt.



**Abbildung 24: Verfahrensfließbild Desorption**

In einem Behälter (Dreihalskolben) wird Druckluft zugeführt. Über einen Wärmetauscher (Heizhaube) wird die Luft erhitzt. Die Temperatur und Feuchte der Luft wird über Messsonden gemessen. Wenn die Temperatur- und Feuchteanzeige sich nicht mehr ändert, ist der stationäre Zustand erreicht und das Ventil kann geöffnet werden. Die trockene und heiße Luft wird anschließend in den Zeolithspeicher eingeleitet. Der Speicher ist zu Beginn mit Wasser gesättigt. Die trockene und heiße Luft nimmt das Wasser auf und wird dann an die Umgebung abgeführt. Auch hier wird der Luftstrom auf Feuchte und Temperatur gemessen. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit des Luftstroms gemessen.

## 5.2 Einbindung der Messgeräte in Labview

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie die Messsignale in das Softwarepaket Labview von National Instruments eingelesen werden. Ausgehend von dem Programm des Vorgängers wurden grundlegende Änderungen vorgenommen. In Abbildung 25 werden die Eingangssignale der COM5 und COM7 Schnittstellen eingelesen.

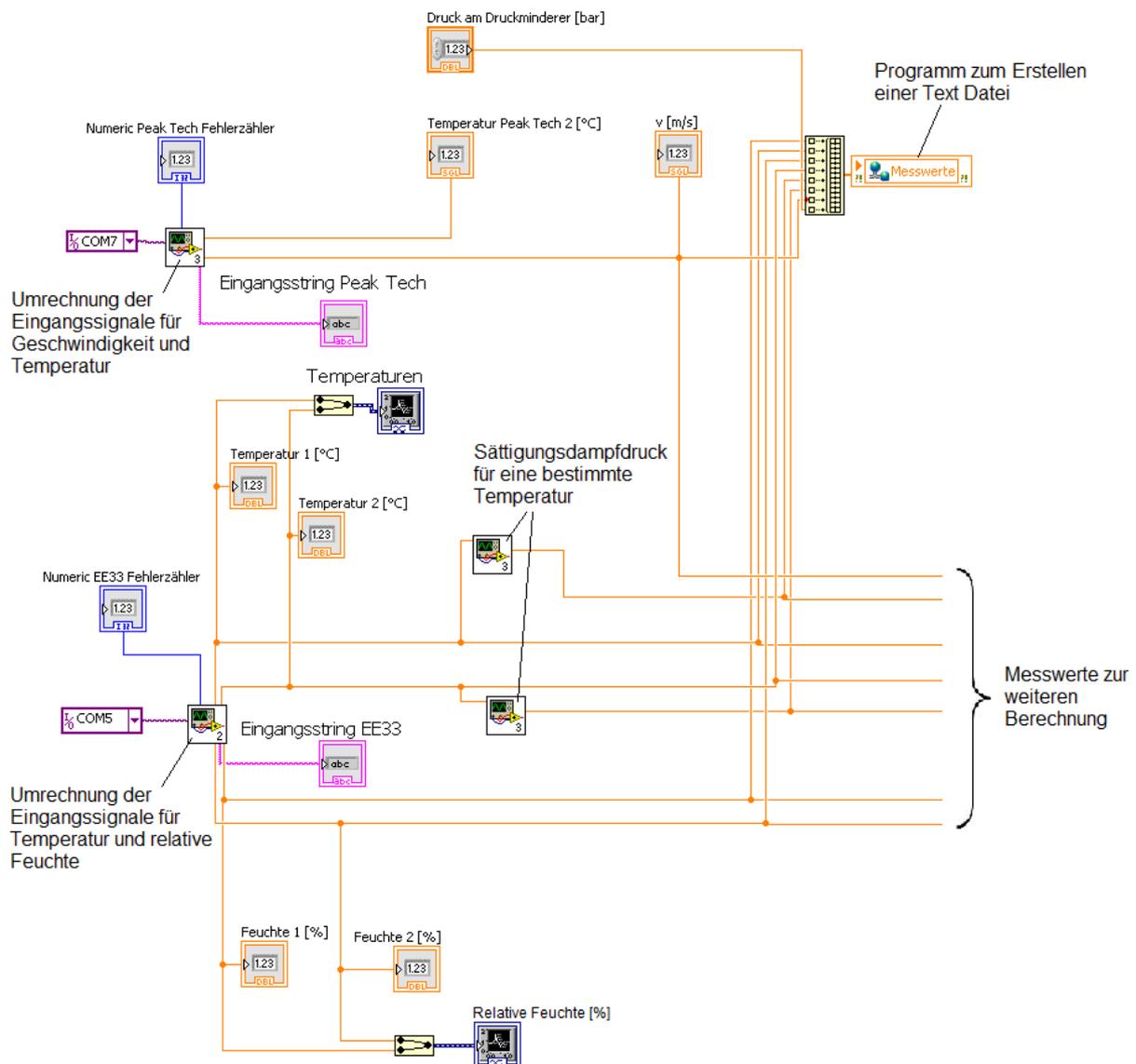


Abbildung 25: Einlesen der Eingangssignale

In Abbildung 25 ist dargestellt, wie Labview aus den Eingangssignalen in den Unterprogrammen Messwerte ermittelt. Aus der COM7 Schnittstelle werden die Eingangssignale der Geschwindigkeit und Temperatur des Flügelradanemometers ausgelesen und in einem Unterprogramm in ASCII Zeichen umgewandelt. Aus der COM5 Schnittstelle werden die Eingangssignale der Temperaturen und relativen Feuchten am Eintritt und Austritt in einem Unterprogramm umgerechnet. Aus den Temperaturen können mit Hilfe eines

Interpolationsprogramms die zugehörigen Sättigungspartialdrücke ermittelt werden. Alle aufgenommenen Messwerte werden an ein weiteres Programm „Messwerte“ übergeben und in einer Text Datei abgespeichert. Im Folgenden werden die Unterprogramme erklärt.

### Einlesen der Austrittsgeschwindigkeit:

Zunächst musste das Bedienelement des Anemometers der Firma „Peak Tech“ mit dem mitgelieferten USB Anschluss über die COM7 Schnittstelle ausgelesen werden. Nachdem das mitgelieferte Programm installiert wurde, konnte mit Hilfe eines weiteren Programms „Device Monitoring Studio“ nachvollzogen werden, welche Datensätze von dem Bedienelement an die mitgelieferte Software übertragen wurden. Genau diese Datensätze wurden mit Hilfe einer Excel-Tabelle protokolliert, um zu analysieren, welche Datenpakete für die Anzeige von Geschwindigkeit und Temperatur des Messgerätes verantwortlich sind. Die Excel-Tabelle kann im Anhang (Kapitel A1) eingesehen werden. Es stellte sich heraus, dass das Messgerät die Datenpakete in einem Hex Code überträgt. Damit das Bedienelement richtig initialisiert wird, muss das zu sendende Signal des PC's auf „FFAA5563 6300 000 C600 FF“ gestellt werden. Damit sichergestellt werden konnte, dass die Datensätze nicht nur die richtige Länge von 50 Zeichen, sondern auch den richtigen Inhalt übertragen, wurde der Wert für die Geschwindigkeit, der zweimal im Code enthalten ist, miteinander verglichen. Sind die Geschwindigkeitswerte nicht äquivalent, wird die Schleife nochmal durchlaufen bis die beiden Codes den gleichen Wert enthalten. Abbildung 26 veranschaulicht das Auslesen der COM 7 Schnittstelle.

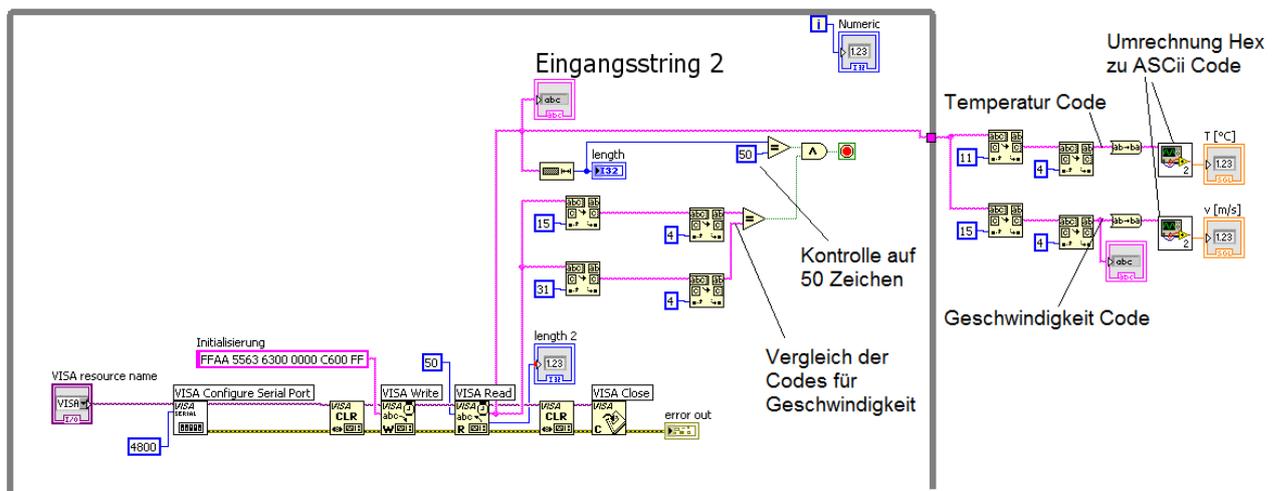


Abbildung 26: Auslesen COM 7

Nach der Schleife wurden aus dem String mit 50 Zeichen die richtigen Stellen, die für den Wert der Geschwindigkeit und Temperatur verantwortlich sind, ausgelesen. Damit Labview

aus dem Hex Code einen Wert anzeigen kann, mussten folgende Umwandlungen vollzogen werden, wie in Abbildung 27 dargestellt.

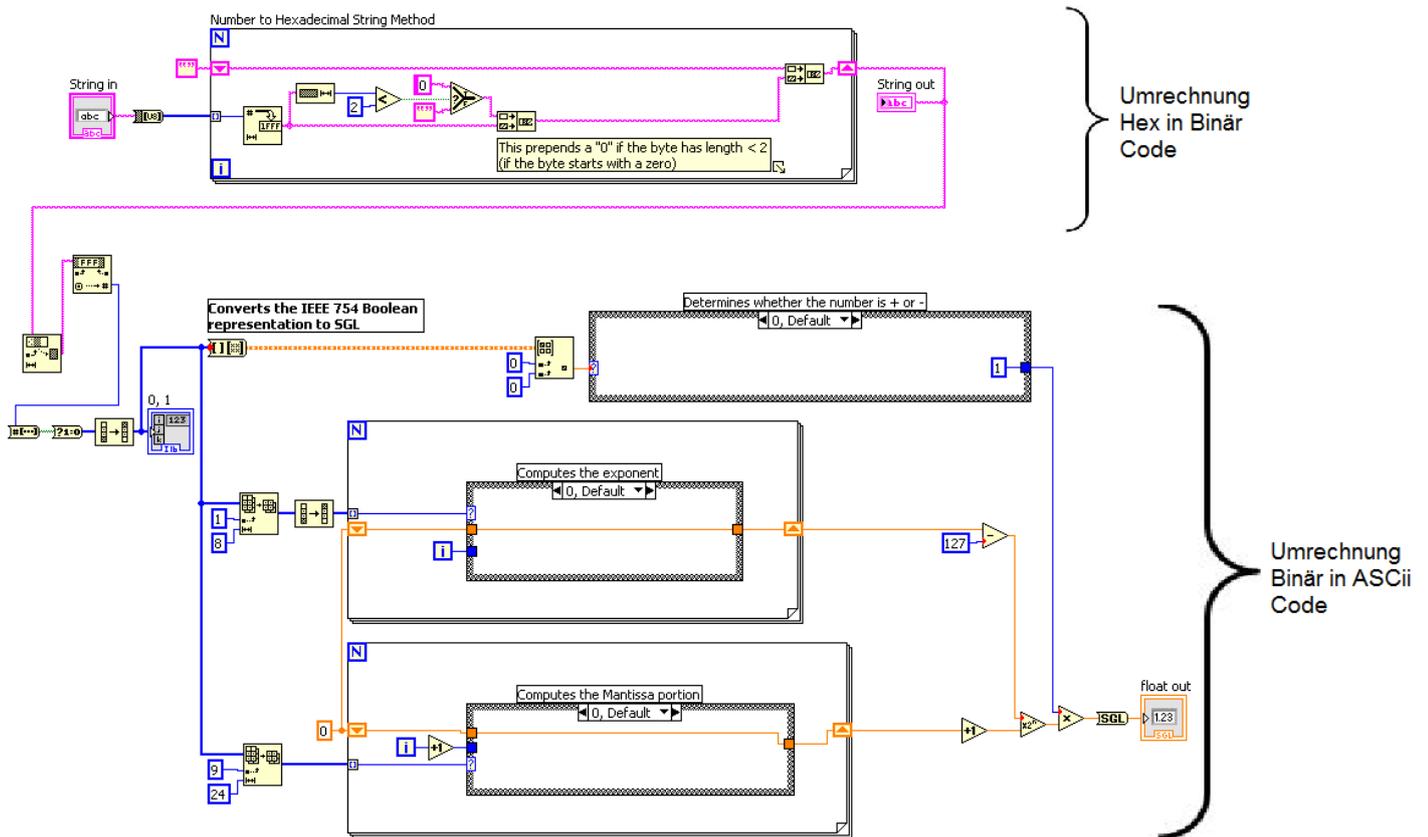


Abbildung 27: Umwandlung Hex zur Dezimalzahl

Der Hex Code wurde in einen Binärcode umgewandelt. Anschließend wurde der Binärcode in ein ASCII Zeichen umgewandelt, um in Labview eine repräsentative Zahl zu erhalten.

### Bestimmung des Sättigungsdampfdrucks mit Hilfe linearer Interpolation:

In Abbildung 28 ist zu sehen, wie aus der eingelesenen Temperatur mit Hilfe der Dampftafel der Sättigungsdampfdruck interpoliert wird.

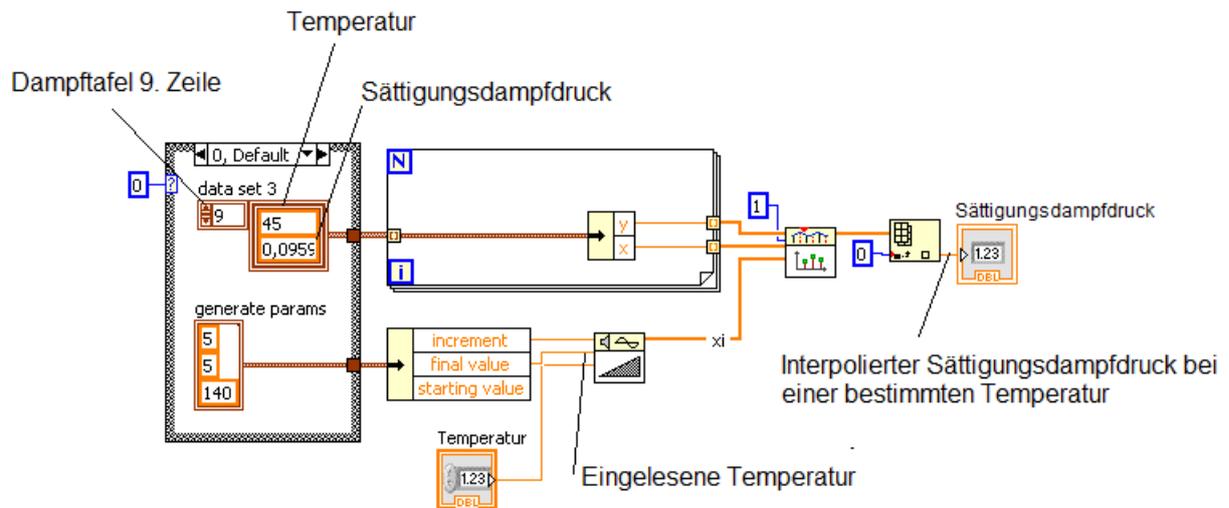


Abbildung 28: Sättigungsdampfdruck mit Hilfe linearer Interpolation

Die Werte für den Sättigungsdampfdruck bei einer bestimmten Temperatur wurden aus der Dampftafel des VDI-Wärmeatlas (1997, Db7) entnommen. Zwischen diesen Werten kann Labview mit Hilfe linearer Interpolation für die eingelesene Temperatur den jeweiligen Sättigungsdampfdruck berechnen.

### Einlesen der Temperaturen und relativen Feuchten:

Zum Umwandeln der Eingangssignale des Messumformers der Serie EE33 ist ein Ad-Wandler Programm nötig. In dem Programm werden die numerischen Größen in Messwerte für relative Feuchte und Temperatur umgewandelt. Weil bei dem Umrechnen der numerischen Größen, des Eingangsstrings, in Temperatur [°C] und relativer Feuchte [%] noch deutliche Abweichungen festgestellt wurden, wird die Umrechnung im Folgenden noch einmal betrachtet.

Nachdem die 4-20mA Signale in numerische Größen (Numeric) umgewandelt worden sind, wurden diese mit den tatsächlich angezeigten Werten des Anzeigerates verglichen. Daraufhin konnte anhand der aufgenommenen Messpunkte eine Geradengleichung mit Excel berechnet werden.

Tabelle 4: Messpunkte für Kalibrierung

Messwerte

Numeric 1	Feuchte Austritt [%]	Numeric 2	Temperatur Austritt [°C]	Numeric 3	Feuchte Eintritt [%]	Numeric 4	Temperatur Eintritt [°C]
4253	2,7	8585	23,59	4890	5,8	8453	23,46
7636	23,1	8473	22,06	4385	1,8	9494	37,32
9066	32,5	10538	51,85	8080	26,2	10670	53,93
		12105	73,64	19313	97,3	11857	70,47
		8637	24,3			12225	75,62
		8520	22,7			8118	17,45
						8176	18,24

Geradengleichung

Steigung	0,00616	0,01426	0,00637	0,01408
Y-Achsenabschnitt	-23,61152	-98,75737	-25,60987	-96,45130

In Abbildung 29 ist die Geradengleichung für die Umrechnung der numerischen Größen in Temperatur [°C] dargestellt.

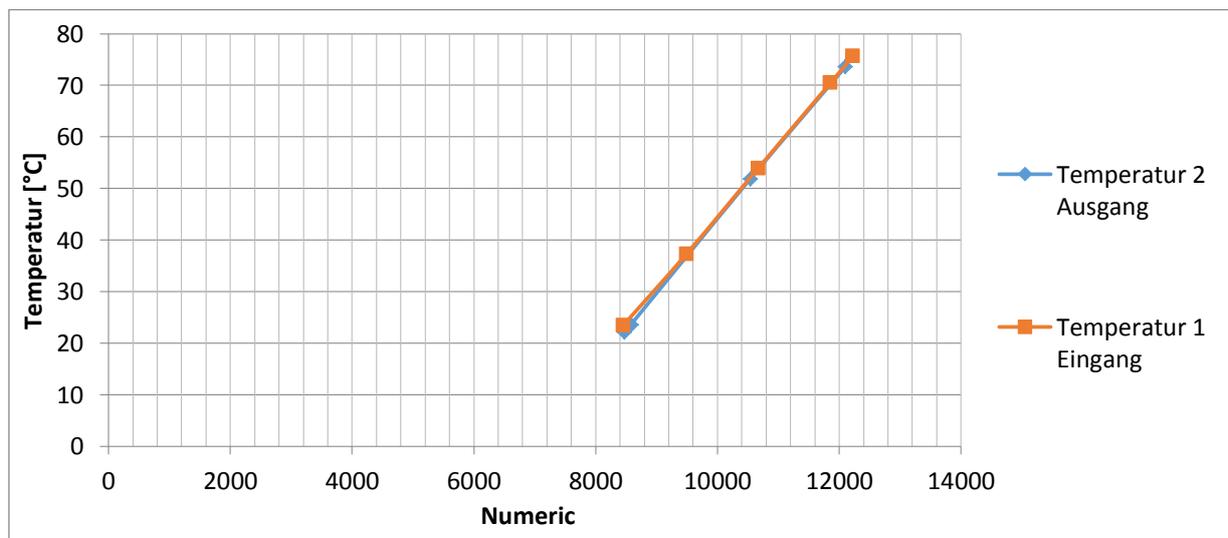


Abbildung 29: Temperaturen über Numeric

In Abbildung 30 ist die Geradengleichung für die Umrechnung der numerischen Größen in relative Feuchte [%] dargestellt.

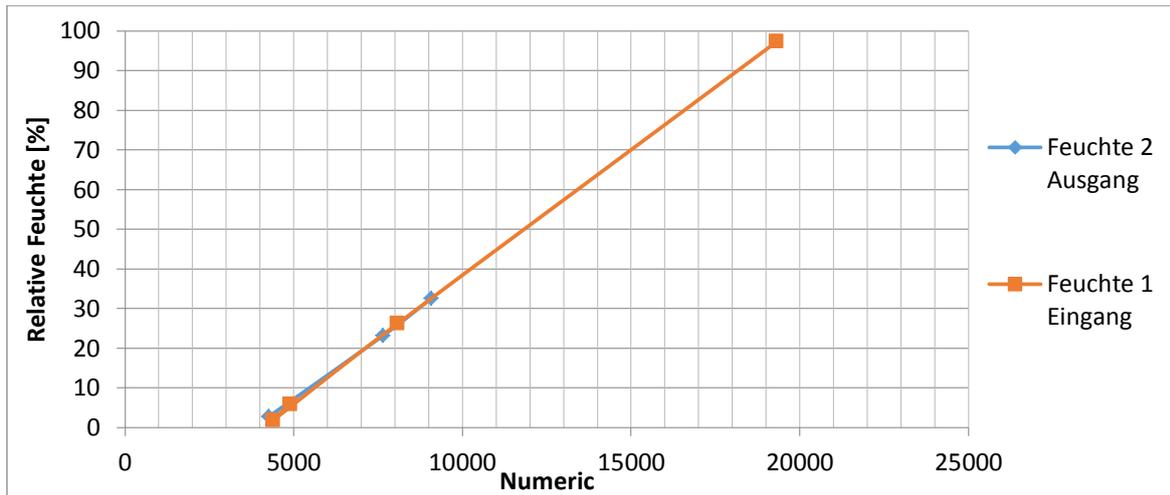


Abbildung 30: Relative Feuchten über Numeric

Die sich ergebenden Geradengleichungen sind in Labview eingearbeitet worden.

Sind alle Messwerte aus den Messgeräten ausgelesen, können diese weiter verarbeitet werden, wie in Abbildung 31 dargestellt. Abbildung 31 ist die Weiterführung der Darstellung von Abbildung 25.

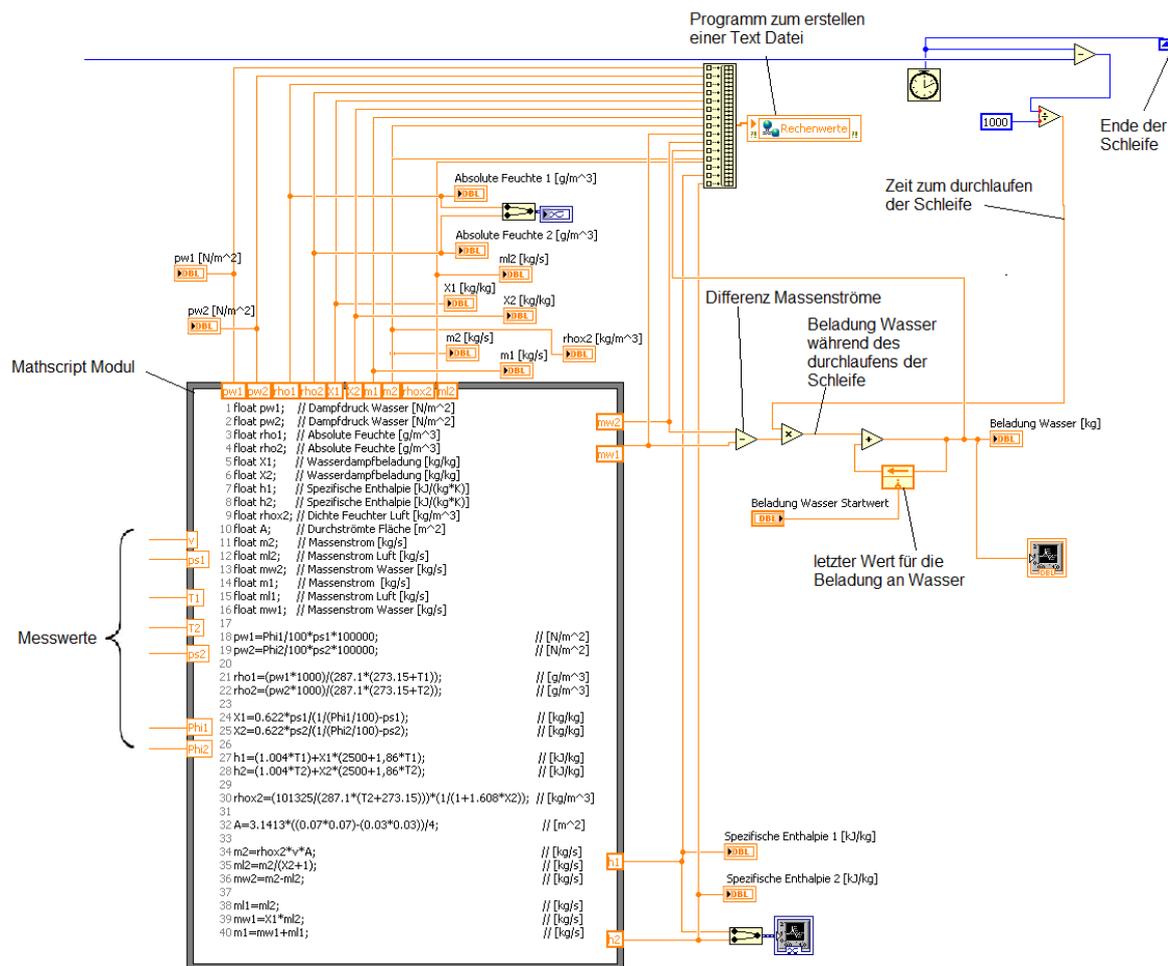


Abbildung 31: Rechenwerte

In Abbildung 31 ist zu sehen, wie die Eingangsgrößen bzw. Messwerte in einem sogenannten Mathscript Modul eingelesen werden. Die Berechnung in dem Mathscript Modul wurden aufgrund der Herleitung in Kapitel 4.1 „Grundlagen feuchter Luft“ umgesetzt. In dem Mathscript Modul können die relevanten Größen berechnet werden. Die Beladung, die sich beim einmaligen Durchlaufen der Schleife ergibt, wird gespeichert und beim nächsten Durchlaufen der Schleife zu dem neu berechneten Wert dazu addiert. So kann die Gesamtbeladung bzw. Menge an Wasser in dem Speicher berechnet werden. Anschließend können die berechneten Größen in einem Unterprogramm in einer Textdatei abgespeichert werden. Aus dieser Textdatei wird letztendlich eine graphische Darstellung erstellt. Die Messwerte werden in Kapitel 6 „Versuchsdurchführung/Aufnahme der Messdaten“ dargestellt. Die Rechenwerte und Interpretation werden im Kapitel 7 „Auswertung“ erläutert.

In Abbildung 32 ist das Frontpanel von Labview dargestellt. Das Frontpanel zeigt dem Bediener des Programms während des Versuchs die Anzeige der Mess- und Rechenwerte an.

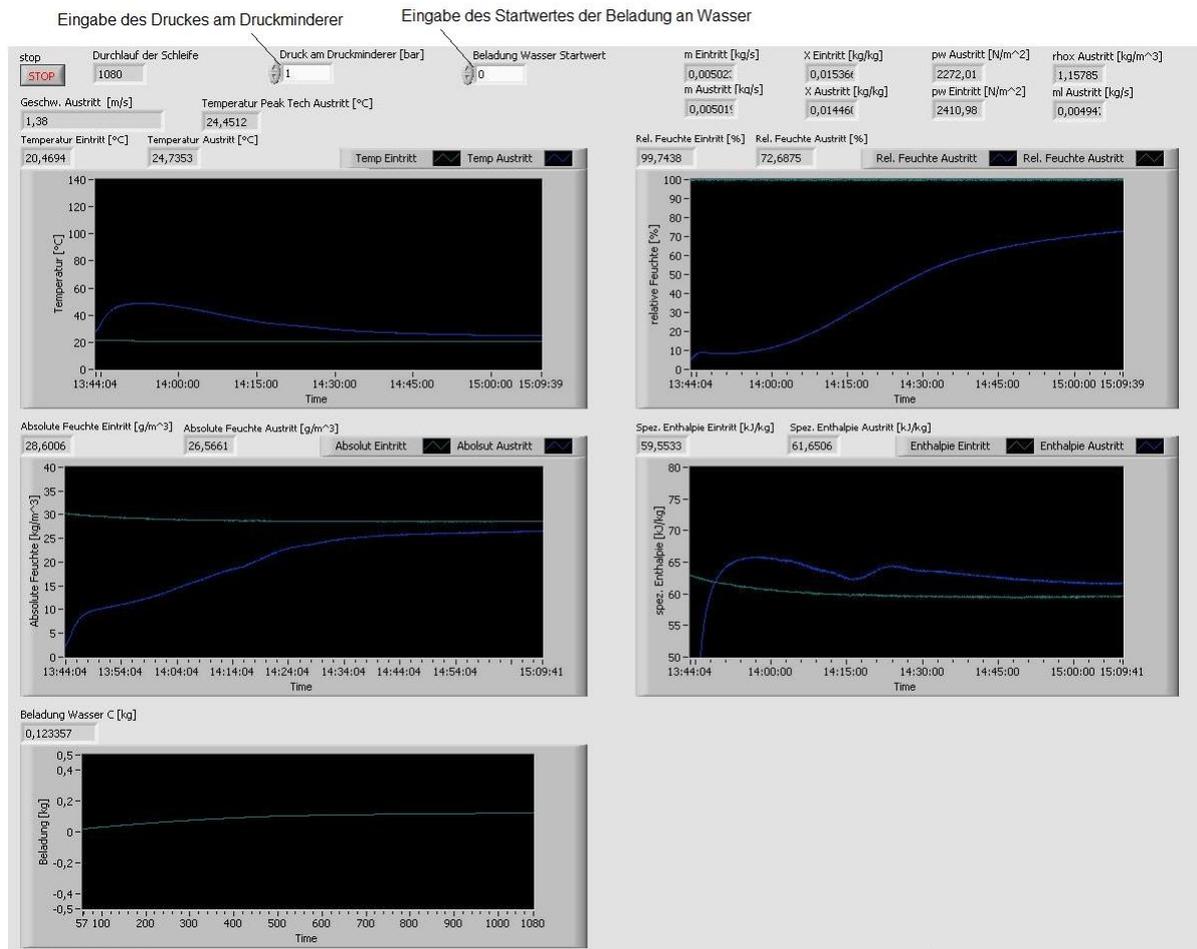


Abbildung 32: Frontpanel Labview

Zu Beginn des Versuchs wird der eingestellte Druck am Druckminderer in Bar eingegeben. Sollte der Versuch abbrechen gibt es die Möglichkeit den Stand der letzten Beladung in Kilogramm einzugeben. Die Kurvenverläufe der Mess- und Rechenwerte sind für den Austritt in Blau und für den Eintritt in Grün dargestellt.

## 6 Versuchsdurchführung / Aufnahme Messdaten

Um das Speicherverhalten von Zeolith zu analysieren, wurde im ersten Schritt zunächst immer erst die Adsorption durchgeführt. In dem aufgeladenen Zustand nach der Desorption wurden die Ventile geschlossen und längere Zeit abgewartet, um eine neue Versuchsreihe mit der Adsorption zu beginnen. So konnte die Adsorption und Desorption separat betrachtet werden, wie es in den folgenden Kapiteln näher erläutert wird.

### 6.1 Messwerte

Mit dem vorgestellten optimierten Versuchsaufbau wurde die Adsorption und Desorption in mehreren Versuchen durchgeführt, wobei in dem folgenden Kapitel nur die erfolgreich durchgeführten Versuche diskutiert werden.

#### 6.1.1 Adsorption

Bei den Versuchen der Adsorption wurde die Auswirkung von unterschiedlichen Wasserdampfbeladungen betrachtet. Die Wasserdampfbeladung der eintretenden feuchten Luft konnte durch das Variieren des Zuluftstroms mit unterschiedlichen Einstellungen des Drucks am Druckminderer und der Zulufttemperatur realisiert werden. Damit sich bei der Adsorption kein Kondensat an den Wänden des Strömungskanals bildet, sollte die gesättigte feuchte Luft unterhalb der Raumtemperatur zugeführt werden (Hauer 2002, S.51).

Folgende Anfangs- und Randbedingungen ergaben sich bei der Versuchsdurchführung.

**Tabelle 5: Anfangs- und Randbedingungen des ersten Versuchs für die Adsorption**

Druck am Druckminderer	1 bar
Raumtemperatur	24,5°C

Abbildung 33 zeigt die Eingangstemperatur (blau) des Zuluftstroms und die Ausgangstemperatur (orange) des austretenden Luftstromes während des Versuchs.

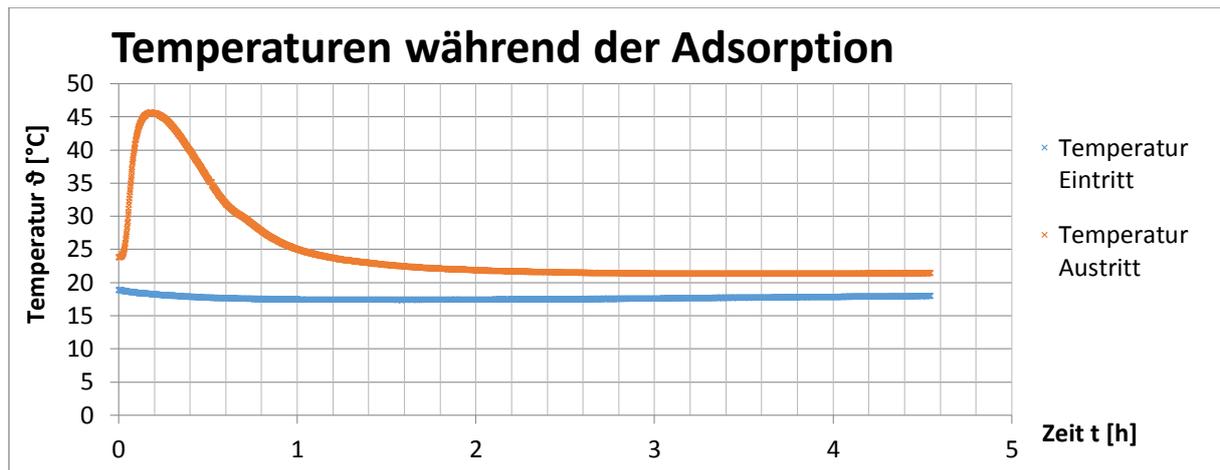


Abbildung 33: Temperaturen des ersten Versuchs für die Adsorption

Nach 11 Minuten erreichte die Temperatur am Austritt einen maximalen Wert von 45,57°C bei einer Eingangstemperatur von 18,25°C. Obwohl sich ein stationärer Zustand vor dem Versuchsbeginn eingestellt hat, ist die Temperatur noch einmal gefallen. Das lässt sich dadurch erklären, dass sich die eintretende Temperatur im Strömungskanal zuerst abkühlen musste. So fiel im weiteren Verlauf die eintretende Temperatur auf einen Wert von 17,3°C.

In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass sich gegen Ende der Adsorption eine kontinuierliche Temperaturdifferenz einstellt. Diese Temperaturdifferenz wird im Kapitel 6.2 „Untersuchung der Wärmeverluste“ genauer betrachtet.

In Abbildung 34 sind die relativen Feuchten während der Versuchsdauer aufgetragen.

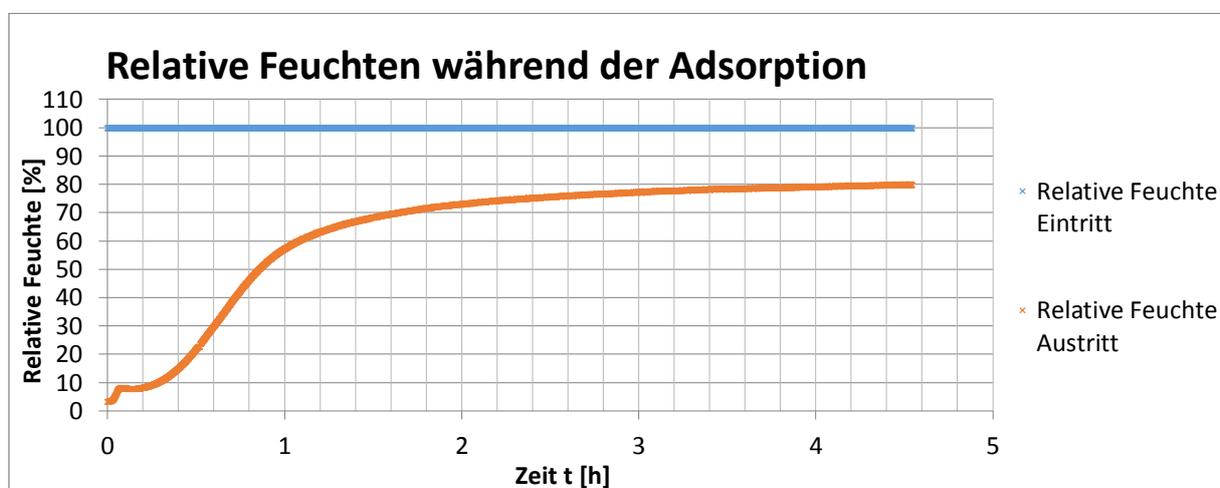


Abbildung 34: Relative Feuchten des ersten Versuchs für die Adsorption

Das Diagramm zeigt am Ende des Versuchsablaufs eine bleibende Abweichung der relativen Feuchte am Eintritt und Austritt. Wie schon in Abbildung 33 zu erkennen ist, hat sich die

eintretende Temperatur beim Durchlaufen des Versuchsstands erwärmt. Die Differenz lässt sich dadurch erklären, weil feuchte Luft bei einer höheren Temperatur mehr Wasser aufnehmen kann.

In Abbildung 35 sind die absolute Feuchten über die Versuchsdauer dargestellt.

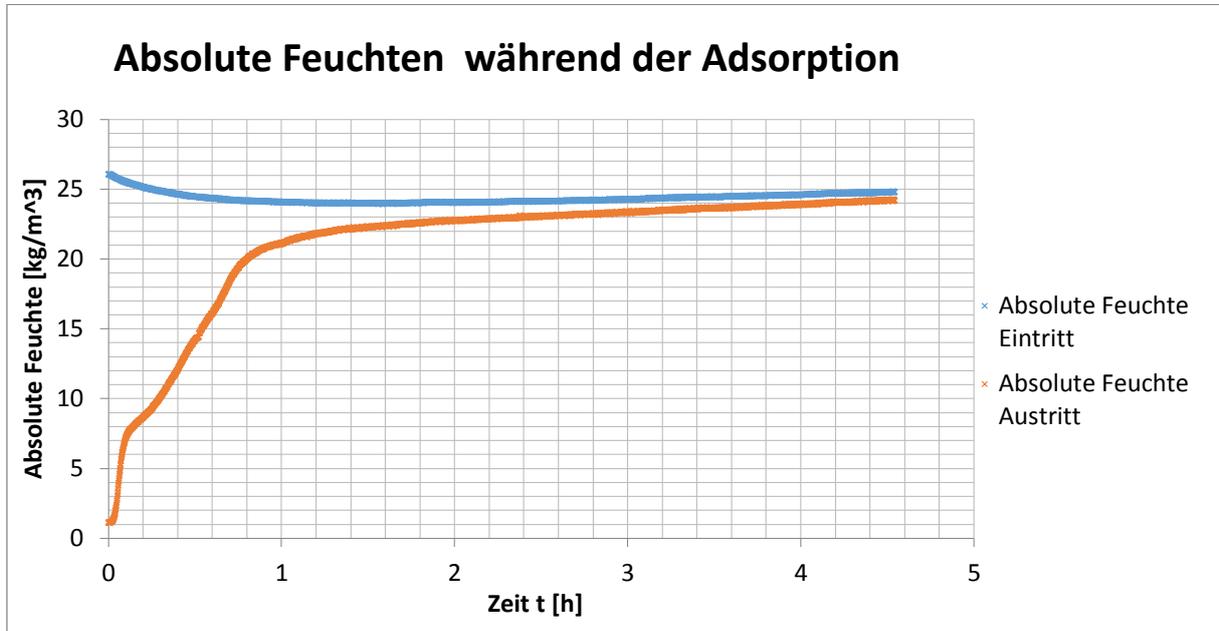


Abbildung 35: Absolute Feuchten des ersten Versuchs für die Adsorption

Die Adsorption ist beendet, wenn die absoluten Feuchten übereinstimmen.

In Abbildung 36 ist der austretende Geschwindigkeitsverlauf über die Versuchsdauer dargestellt.

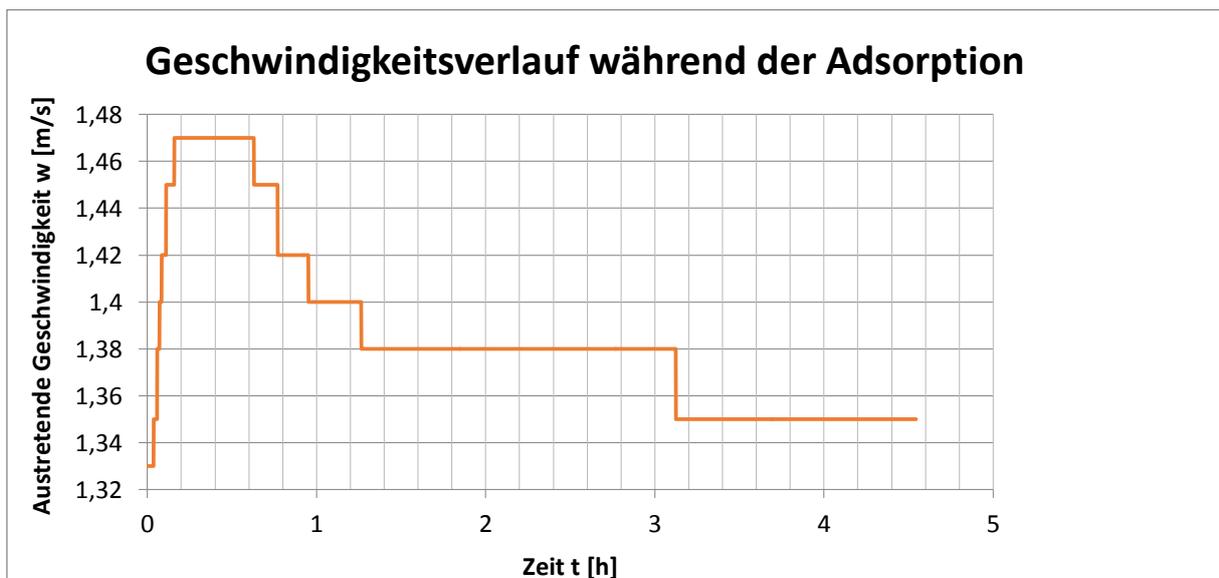


Abbildung 36: Geschwindigkeitsverlauf des ersten Versuchs für die Adsorption

Zu Beginn steigt die Geschwindigkeit stark an bis ein Plateau erreicht ist. Danach fällt die Geschwindigkeit langsam ab.

Für verschiedene Versuche der Adsorption ergaben sich ähnliche Kurvenverläufe, die im Anhang (Kapitel A2) hinterlegt sind. Die Messdaten für alle Versuche sind in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Zusammenfassung der Messwerte der Adsorption**

Versuch	1	2	3	4	5
Datum	03.08.2015	09.09.2015	24.08.2015	10.09.2015	25.08.15
Druck am Druckminderer [bar]	1	1	1	1,5	1,5
Umgebungstemperatur [°C]	24,5	22,6	23,5	22,5	23,1
Versuchsdauer	4h 33min	4h 14min	3h 54min	3h 22min	3h 15min
Temperatur vor dem Zeolithspeicher bei Max. Temperaturhub [°C]	18,25	20,92	22,18	20,385	18,78
Max. Temperatur nach dem Zeolithspeicher [°C]	45,57	48,73	55,18	54,176	51,369
Max. Temperaturhub [°C]	27,32	27,812	33	33,791	32,589

## 6.1.2 Desorption

Folgende Anfangs und Randbedingungen ergaben sich bei der Versuchsdurchführung.

Tabelle 7: Anfangs und Randbedingungen Desorption

Druck am Druckminderer	1 bar
Raumtemperatur	24,5°C

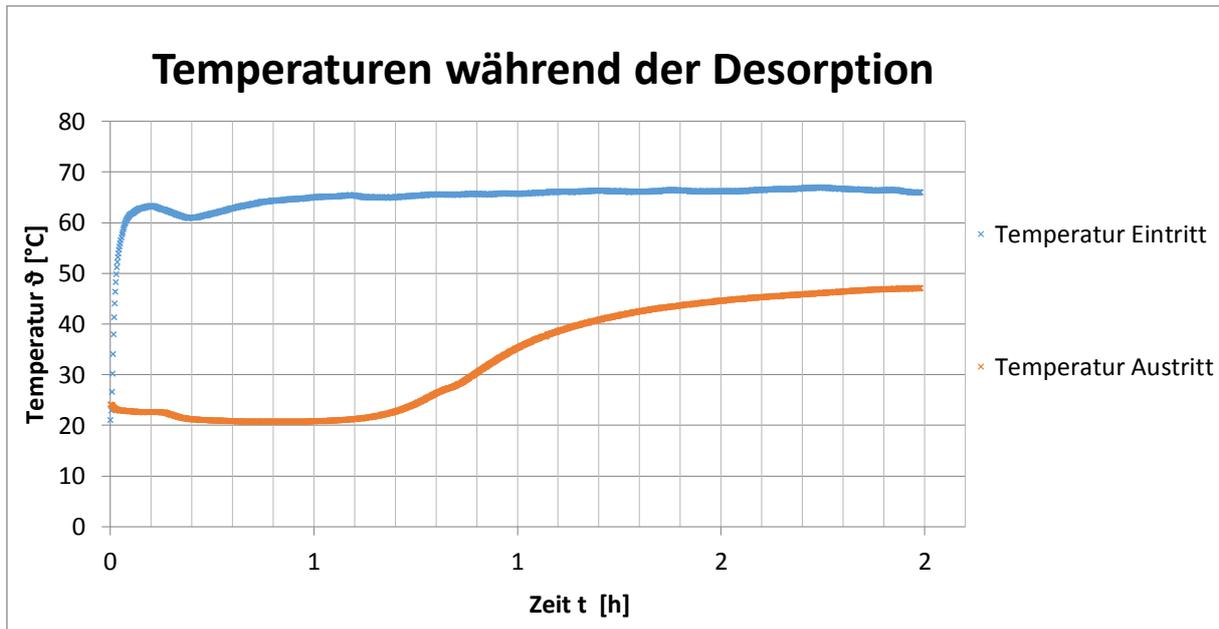


Abbildung 37: Temperaturen des ersten Versuchs für die Desorption

Nach 60 Minuten stellte sich bei der Zuluft eine Temperatur von  $T_{\text{ein}} = 65,01^\circ\text{C}$  ein. Die austretende Temperatur betrug dabei  $T_{\text{aus}} = 20,81^\circ\text{C}$ .

In Abbildung 38 sind die relativen Feuchten der eintretenden und austretenden Luftströme dargestellt.

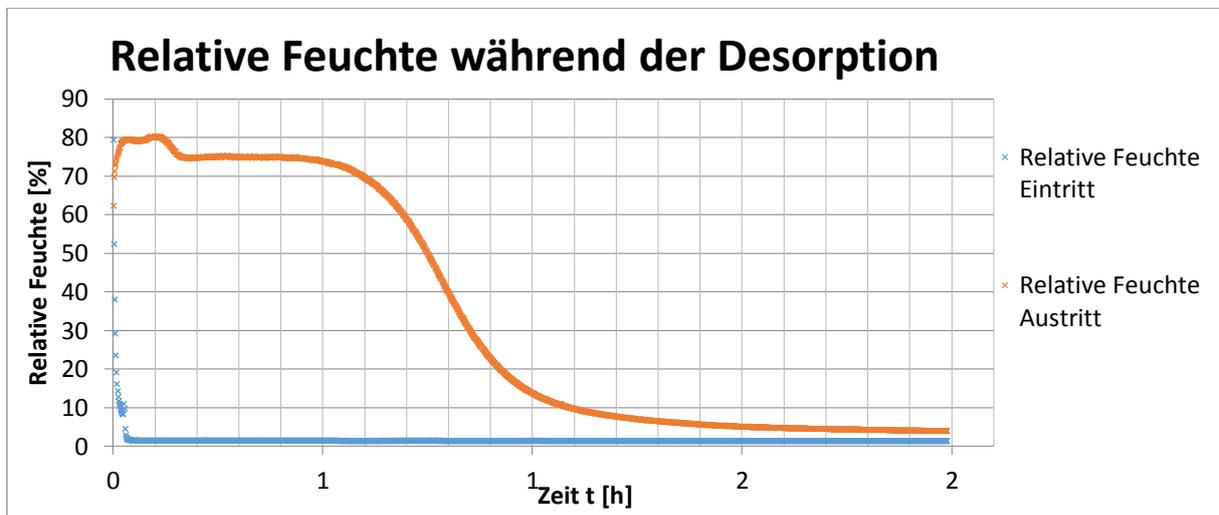


Abbildung 38: Relative Feuchte des ersten Versuchs für die Desorption

In Abbildung 39 ist die Geschwindigkeit über die Versuchsdauer dargestellt.

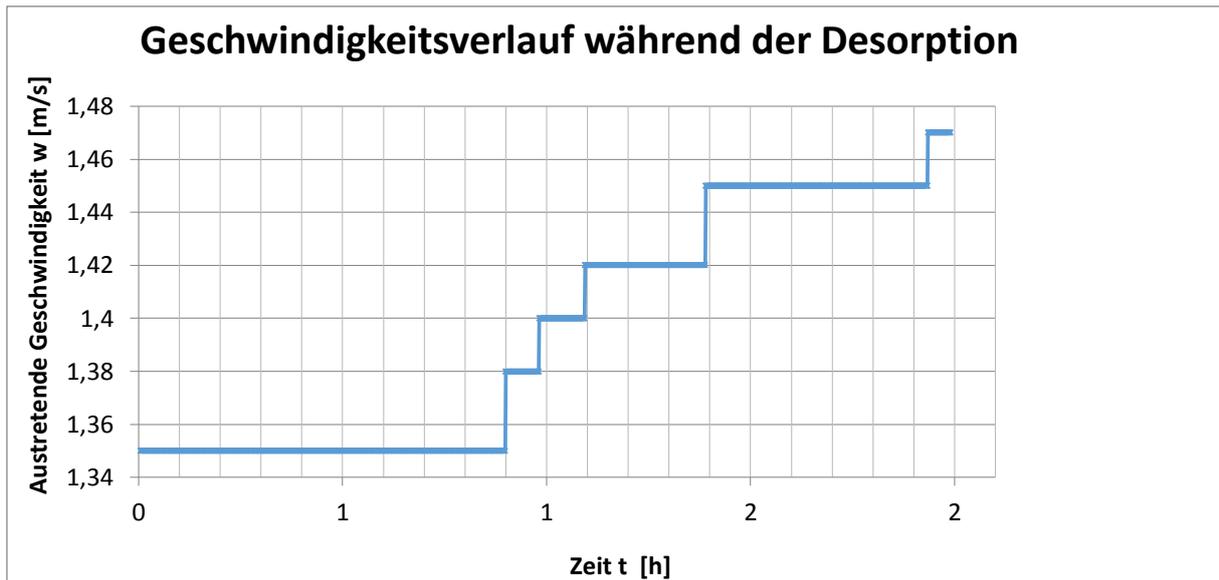


Abbildung 39: Austrittender Geschwindigkeitsverlauf des ersten Versuchs für die Desorption

Für verschiedene Versuche der Desorption ergaben sich ähnliche Kurvenverläufe, die im Anhang hinterlegt sind. Die Messdaten für alle Versuche sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Messdaten der Desorption

Versuch	1	2	3	4
Datum	03.08.2015	09.09.2015	10.09.2015	25.08.2015
Druck am Druckminderer [bar]	1	1	1,5	1,5
Versuchsdauer	1h 59min	2h 25min	9h 19min	2h 31min
Temperatur vor dem Zeolithspeicher [°C]	65,01	22,47	19,57	21,34
Min. Temperatur nach dem Zeolithspeicher [°C]	20,81	77,82	58,5	64,82

## 7. Auswertung

In diesem Kapitel werden die Messwerte ausgewertet und interpretiert. Gemäß des Kapitels 4 „Erwartung zum Speicherverhalten“ konnte bei der Messung der Temperaturen für die Ad- und Desorption keine Annäherung der Eintritt- und Austrittstemperaturen gegen Ende des Versuchs festgestellt werden. Deswegen werden in diesem Kapitel die Wärmeverluste des Versuchsstands analysiert. Zudem werden Druckverluste untersucht, die bei verschiedenen Geschwindigkeiten auftreten.

### 7.1 Untersuchungen der Druckverluste

In diesem Kapitel werden die Druckverluste untersucht, weil für die Berechnung der Wasserdampfbeladung und spezifischen Enthalpie die Absolutdrücke benötigt werden. Dafür wurden die Druckverluste in der Schüttung und im Strömungskanal separat berechnet. Zum Vergleich der berechneten Werte aus dem Druckverlust wurde ein U-Rohr an den Versuchsstand angeschlossen. Mit dem U-Rohr kann der gesuchte Druck im Rohrabschnitt berechnet werden.

#### 7.1.1 Druckverluste der Schüttung

Die Druckverluste in der Schüttung wurden nach Wagner (2012, S.143) berechnet.

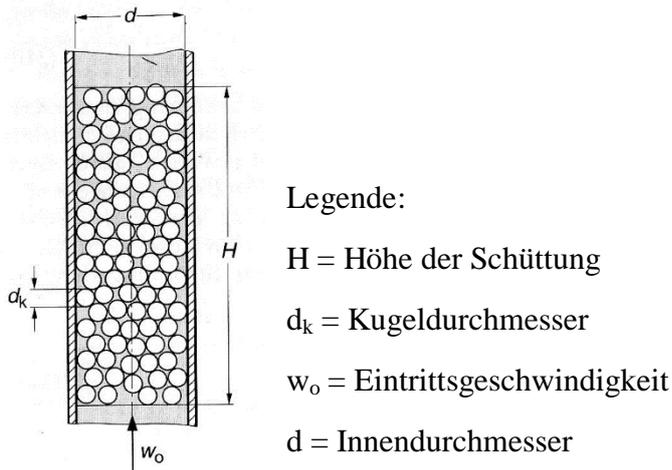


Abbildung 40: Strömung durch Schüttung (Wagner 2012, S.143)

Der Hohlraumanteil  $\psi$  ist definiert mit:

$$\psi = \frac{V_L}{V_{ges}} \quad (28)$$

Für den Hohlraumanteil  $\psi$  muss zunächst das Gesamtvolumen  $V_{\text{ges}}$  und das freie Volumen  $V_L$  berechnet werden.

Für das Gesamtvolumen  $V_{\text{ges}}$  [ $\text{m}^3$ ] gilt:

$$V_{\text{ges}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H \quad (29)$$

Somit ergibt sich das Gesamtvolumen  $V_{\text{ges}}$  [ $\text{m}^3$ ] zu:

$$V_{\text{ges}} = \frac{\pi \cdot (0,07\text{m})^2}{4} \cdot 0,2\text{m} = 7,69 \cdot 10^{-4}\text{m}^3$$

Das freie Volumen  $V_L$  kann berechnet werden zu:

$$V_L = \frac{\pi \cdot d^2}{4} - \left( \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_k^3 \cdot z \right) \quad (30)$$

Hierbei ist  $z$  die Anzahl der Pellets. Zur Bestimmung der Pellets wurden 100 Stück abgezählt und gewogen, dabei ergab sich ein Gewicht von 7g. Für die Menge an Pellets von 780g ergibt sich dementsprechend eine Anzahl von 11142 Stück.

Nach Gleichung (30) kann das freie Volumen  $V_L$  berechnet werden:

$$V_L = \frac{\pi \cdot (0,07\text{m})^2}{4} - \left( \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot (0,004\text{m})^3 \cdot 11140 \right) = 3,964 \cdot 10^{-4}\text{m}^3$$

Somit kann der Hohlraumanteil  $\psi$  nach Gleichung (28) berechnet werden:

$$\psi = \frac{3,964 \cdot 10^{-4}\text{m}^3}{7,69 \cdot 10^{-4}\text{m}^3} = 0,515$$

Für den hydraulischen Durchmesser gilt:

$$d_h = \frac{2}{3} \cdot \frac{\psi}{1 - \psi} \cdot d_k \quad (31)$$

Somit berechnet sich der hydraulischen Durchmesser  $d_h$  [m] mit Gleichung (31) zu:

$$d_h = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,515}{1 - 0,515} \cdot 0,004 = 2,83 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Die eintretende Geschwindigkeit  $w_{\text{ein}}$  [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ] wird über die Flächenverhältnisse berechnet:

$$w_{\text{ein}} = \frac{w_{\text{aus}} \cdot (D^2 - d^2)}{d^2} \quad (32)$$

Die eintretende Geschwindigkeit  $w_{ein} \left[ \frac{m}{s} \right]$  kann mit Gleichung (32) berechnet werden zu:

$$w_{ein} = \frac{1,78 \frac{m}{s} \cdot (0,07^2 - 0,03^2)}{0,07^2} = 1,97 \frac{m}{s}$$

Die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{w} \left[ \frac{m}{s} \right]$  wird berechnet zu:

$$\bar{w} = \frac{w_{ein}}{\psi} \quad (33)$$

Demnach ist die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{w} \left[ \frac{m}{s} \right]$  nach Gleichung (33):

$$\bar{w} = \frac{1,97}{0,515} = 3,82 \frac{m}{s}$$

Die kinematische Viskosität  $\nu \left[ \frac{m^2}{s} \right]$  kann aus der dynamischen Viskosität  $\mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s^2} \right]$  und der Dichte  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  berechnet werden:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (34)$$

Somit wird nach Gleichung (34) die kinematische Viskosität zu:

$$\nu = \frac{17,1 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{kg}{m \cdot s^2} \right]}{1,14 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 1,5 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

Für die Reynoldszahl gilt:

$$R_e = \frac{\bar{w} \cdot d_h}{\nu} \quad (35)$$

Damit ist die Reynoldszahl nach Gleichung (35):

$$R_e = \frac{3,82 \frac{m}{s} \cdot 2,83 \cdot 10^{-3} m}{1,5 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 720,706$$

Nach dem VDI-Wärmeatlas (1997, Lda5) ist bei dieser Reynoldszahl der Druckverlustbeiwert  $\lambda_{sch} = 1,2$ .

Für die Druckverluste  $\Delta p_{v, \text{sch}}$  [Pa] in der Schüttung gilt:

$$\Delta p_{v, \text{sch}} = \lambda_{\text{sch}} \cdot \frac{H}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{w}^2 \quad (36)$$

Nach Gleichung (36) ist der Druckverlust  $\Delta p_{v, \text{sch}}$  [Pa]:

$$\Delta p_{v, \text{sch}} = 1,2 \cdot \frac{0,2m}{2,83 \cdot 10^{-3}m} \cdot \frac{1,1 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{2} \cdot \left( 3,82 \frac{m}{s} \right)^2 = 680,64 Pa$$

### 7.1.2 Druckverluste des Rohrleitungssystem

Abbildung 41 zeigt die schematische Darstellung der Querschnitte im Strömungskanal.

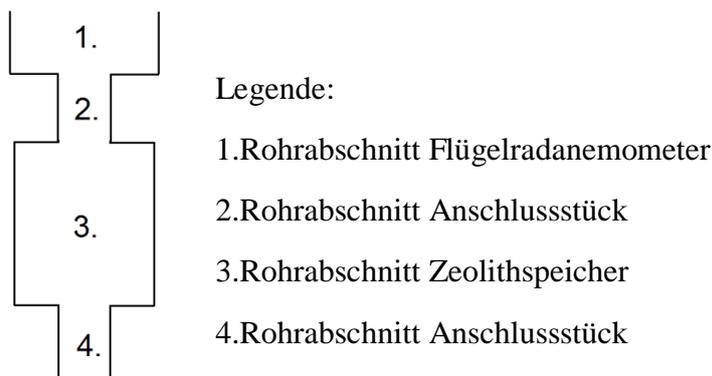


Abbildung 41: Strömungskanal

Die Druckverluste im Rohrleitungssystem wurden nach Böckh (2013, S.160) berechnet.

Zunächst müssen die jeweiligen Geschwindigkeiten nach Gleichung (32) berechnet werden. Aus den Geschwindigkeiten können die Reynoldszahlen nach Gleichung (35) berechnet werden. Aus den Reynoldszahlen können die Rohrreibungszahlen aus dem Diagramm nach Böckh (2013, S.123) abgelesen werden. Die Widerstandszahlen der Querschnittserweiterung können aus dem Diagramm nach Böckh (2013, S.149) abgelesen werden. Die Widerstandszahlen der Querschnittsverengungen können nach Böckh (2013, S.148) bestimmt werden:

$$\zeta = \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad (37)$$

Für den gesuchten Druck  $p_4$  [Pa] im Rohrabschnitt 4 gilt:

$$p_4 = p_u + \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} \left( \zeta_4 \frac{A_1^2}{A_4^2} + \zeta_3 \frac{A_1^2}{A_3^2} + \zeta_2 \frac{A_1^2}{A_2^2} + \zeta_1 + \lambda_4 \frac{A_1^2 l_4}{A_4^2 d_4} + \lambda_4 \frac{A_1^2 l_3}{A_3^2 d_3} + \lambda_2 \frac{A_1^2 l_2}{A_2^2 d_2} + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \quad (38)$$

Damit ergeben sich die für die Berechnung nötigen Werte, die in Tabelle 9 hinterlegt sind.

**Tabelle 9: Berechnung am Strömungskanal**

Rohrabschnitt	Durchmesser d [m]	Länge des Rohrabschnittes L [m]	Geschwindigkeit w [m/s]	Reynoldszahl $R_e$ [-]	Widerstandsbeiwert $\zeta$ [-]	Rohrreibungszahlen $\lambda$ [-]
1	0,07	0,08	1,78	8306,6	0,81	0,032
2	0,02	0,05	17,8	23733,3	0,5	0,028
3	0,06	0,27	1,97	2880	0,79	0,036
4	0,02	0,05	17,8	23733,2	0,5	0,028

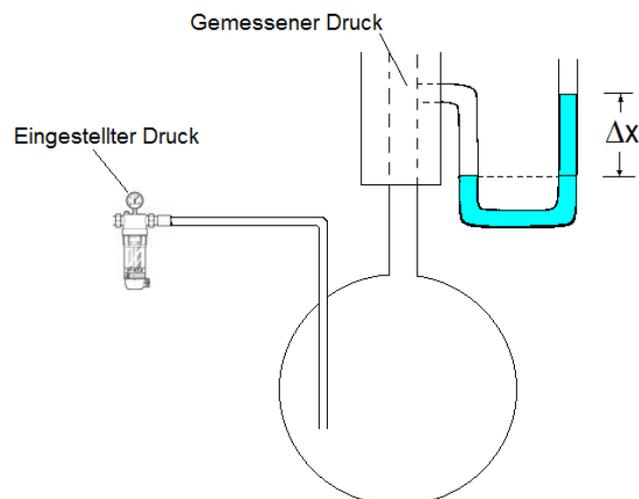
Nach Gleichung (38) berechnet sich der Druck zu:

$$p_4 = (101326,6 + 28,22) \text{ Pa}$$

Es ist zu erkennen, dass der durch den Strömungskanal bedingte Druckverlust mit 28,22 Pa sehr klein ist.

### 7.1.3 Druckbestimmung durch U-Rohr

Mit dem Einbau eines U-Rohrs in den Versuchsstand können die im Kapitel 7.1.1 und 7.1.2 berechneten Druckverluste überprüft werden. Die Skizze in Abbildung 42 zeigt die schematische Darstellung des U-Rohres im Versuchsstand.



**Abbildung 42: Schematische Darstellung U-Rohr**

In Abbildung 43 ist zu sehen, wie das U-Rohr an der Messstelle vor dem Zeolithspeicher angebracht wurde.



Abbildung 43: Druckbestimmung mit Hilfe eines U-Rohrs

Im Ausgangszustand wurde an dem Wasserspiegel eine blaue Markierung gesetzt. Unterschiedliche Einstellungen am Druckminderer ergaben verschiedene Höhenunterschiede  $\Delta x$ , die mit einem Gliedermaßstab abgelesen wurden. Der Einfluss des Druckwiderstands durch das Wasser im Drehhalskolben wurde auch untersucht. Dafür wurde der Drehhalskolben in einer Versuchsreihe mit Wasser gefüllt und in einer anderen Versuchsreihe ohne Wasser (Trocken) durchgeführt.

Der Relativdruck  $p$  [Pa], welcher dem Druckverlust entspricht, kann berechnet werden mit:

$$p = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta x \quad (39)$$

Wobei  $\rho_{H_2O}$  [kg/m<sup>3</sup>] die Dichte von Wasser,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] die Erdbeschleunigung und  $\Delta x$  [m] die Höhendifferenz darstellt. Dadurch ergaben sich verschiedene Relativdrücke, die in Tabelle 10 berechnet wurden.

Tabelle 10: Berechnung am U-Rohr

Drehhalskolben	Trocken			Mit Wasser		
Eingestellter Druck am Druckminderer [bar]	1	1,5	2	1	1,5	2
Höhenunterschied $\Delta x$ [cm]	5	10	16	4,4	8	13
Relativdruck [Pa]	490,5	981	1569,6	431,64	784,8	1275,3

Die Berechnungen der Druckverluste in Kapitel 7.1.1 und 7.1.2 wurden bei einem eingestellten Druck von 1,5 bar am Druckminderer durchgeführt. Der Dreihalskolben war mit Wasser gefüllt. Dabei wurde eine Geschwindigkeit von 1,78 m/s gemessen. Bei der Addition der beiden Druckverluste, die in Kapitel 7.1.1 und 7.1.2 berechnet wurden, ergab sich ein Druckverlust von 708,85 Pa. In Tabelle 10 wurde ein ähnlicher Druckverlust von 784,8 Pa berechnet. Dies entspricht einer Abweichung zum Umgebungsdruck von 0,03%.

Die Berechnungen zeigen, dass die Vernachlässigung des Druckverlustes, der für die Berechnung der spezifischen Enthalpie nach Gleichung (19) und der Wasserdampfbeladung nach Gleichung (10) benötigt werden, nur geringfügige Abweichungen verursachen.

## 7.2 Untersuchung der Wärmeverluste

Zunächst wird in diesem Kapitel der für die Wärmeströme verantwortliche Wärmeübergangskoeffizient bestimmt. Im Anschluss wird der Zusammenhang der Wärmeströme bei unterschiedlichen Austrittstemperaturen genauer untersucht.

Dafür wurde zunächst ein gesamter Wärmeverlust  $\dot{Q}_u$  [kW] berechnet (Marek et. al. 2012, S.113):

$$\dot{Q}_u = \dot{H}_{\text{ein}} - \dot{H}_{\text{aus}} \quad (40)$$

Der Wärmeverlust des ungedämmten Rohres  $\dot{Q}_u$  beträgt (Marek et. al. 2012, S.113):

$$\dot{Q}_u = k \cdot L \cdot d_i \cdot \pi \cdot (T_u - T_{\text{ein}}) \quad (41)$$

Mit Umstellen der Gleichung (41) kann ein k-Wert, der bei kreisförmigen Körpern verwendet wird, berechnet werden (Marek et. al. 2012, S.113):

$$k = \frac{\dot{q}}{\pi \cdot d_i \cdot (T_u - T_{\text{ein}})} \quad (42)$$

In Tabelle 11 wurde der k-Wert für verschiedene Versuche der Ad- und Desorption berechnet. Es sind die Messwerte der Temperaturen  $t_1$  und  $t_2$  sowie die Umgebungstemperatur  $t_u$  gegen Ende des Versuchs eingetragen. Auch wurden die Differenzen der spezifischen Enthalpien für den eintretenden und austretenden Luftstrom der feuchten bzw. trockenen Luft gegen Ende des Versuchs eingetragen.

**Tabelle 11: Wärmebetrachtung**

Versuch	Datum	$\Delta h_u$ [kJ/kg]	$\vartheta_u$ [°C]	$\vartheta_1$ [°C]	$\vartheta_2$ [°C]	$\vartheta_u - \vartheta_2$ [°C]	m1 [m/s]	Q [W/m]	k Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]
1. Adsorption	25.08.	-2,8	25	19,7	22,9	2,1	0,005	-52,4	44,937
1. Desorption	25.08.	15,32	25,8	66,1	49,9	-24,06	0,006	337,6	38,098
2. Adsorption	07.09.	-2,5	21,5	17,2	20,3	1,2	0,005	-44,6	47,201
2. Desorption	15.07.	12,85	24,5	59,6	45,1	-20,57	0,006	295,1	38,231
3. Adsorption	03.08.	-3,58	24,5	17,5	21,3	3,2	0,005	-66,0	42,899
3. Desorption	03.08.	17,67	24	66	48,5	-24,45	0,005	331,1	35,856
4. Desorption	09.09.	11,98	21,8	48,5	36,8	-15	0,005	224,9	38,277

In Tabelle 11 ist bei der Desorption, bei der mit einem heißen Luftstrom getrocknet wird, ein Wärmeverlust  $\dot{Q}$  an die Umgebung zu verzeichnen. Hingegen wird bei der Adsorption, bei der mit einem kühlen feuchten Luftstrom der Speicher beladen wird, ein Wärmestrom  $\dot{Q}$  aufgenommen und hier mit einem negativen Wert dargestellt.

Der Zusammenhang der Differenz der spezifischen Enthalpie  $\Delta h_u$  über die Differenz der Umgebungstemperatur  $t_u$  zur Austrittstemperatur  $t_2$  ist in Abbildung 44 aufgetragen.

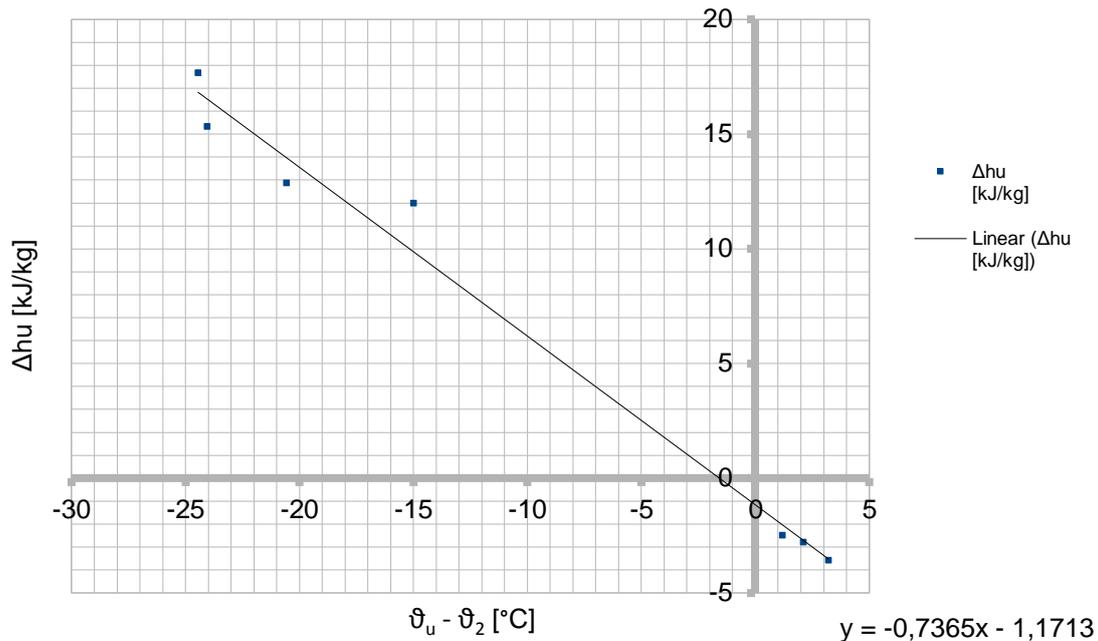


Abbildung 44: Differenz der spez. Enthalpie über Differenz der Umgebungstemperatur zur Austritts Temperatur

Der Betrag der Differenz der Enthalpie wird umso größer, je größer die Differenz der Austrittstemperatur zur Raumtemperatur wird. Der lineare Zusammenhang ist durch die Ausgleichsgerade dieser ausgewerteten Punkte gegeben.

Die Gleichung (43) entspricht der Ausgleichsgeraden aus Abbildung 44. Mit Hilfe dieser Gleichung kann für jede Austrittstemperatur  $t_2$  die aufgenommene bzw. abgegebene Enthalpie an die Umgebung bestimmt werden:

$$\Delta h_u = -0,7365 \cdot (\vartheta_u - \vartheta_2) - 1,1713 \quad (43)$$

Ist die Enthalpie Differenz bekannt, kann eine bereinigte Enthalpie  $h_{2,\text{bereingt}}$  am Austritt berechnet werden:

$$h_{2,\text{bereingt}} = \Delta h_u + h_2 \quad (44)$$

Ist die bereinigte Enthalpie am Austritt bekannt, kann daraus die austretende Temperatur zurückgerechnet werden:

$$\vartheta_{2,bereinigt} = \frac{h_{2,bereinigt} - X \cdot 2500}{1,004 + 1,86 \cdot X} \quad (45)$$

Aus der Austrittstemperatur  $\vartheta_{2,bereinigt}$  kann ein neuer Sättigungsdampfdruck  $p_{s,bereinigt}$  berechnet werden. Somit kann die relative Feuchte neu bestimmt werden:

$$\varphi_{bereinigt} = \frac{p}{0,622 \cdot \frac{p_{s,bereinigt}}{X} + p_{s,bereinigt}} \quad (46)$$

### 7.3 Adsorption

In Abbildung 45 sind die gemessenen Temperaturen und die bereinigte Temperatur über die Versuchsdauer dargestellt.

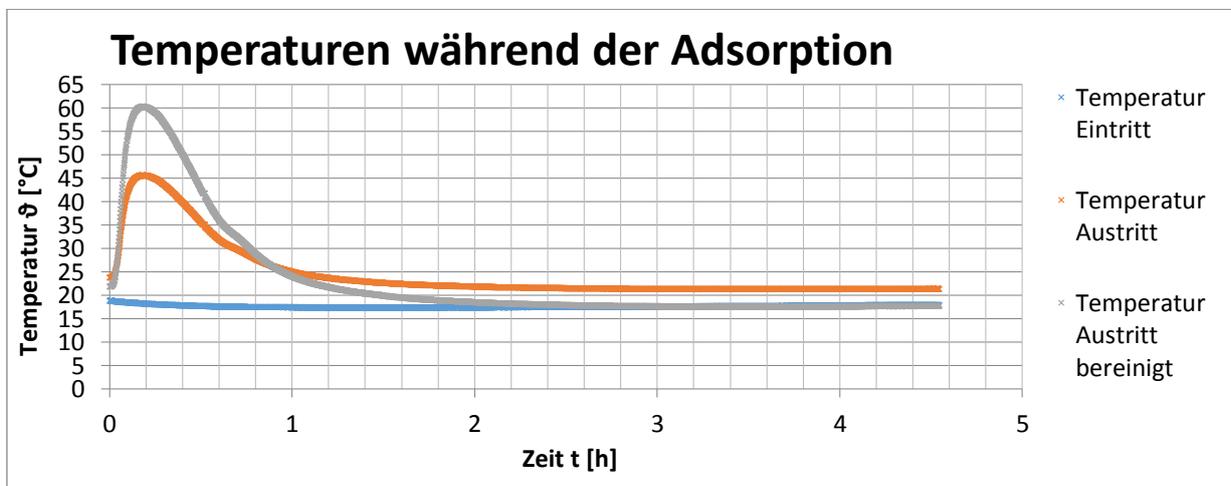


Abbildung 45: Temperaturverlauf des ersten Versuchs für die Adsorption

Nach dem Bereinigen der austretenden Temperatur nähern sich die eintretenden und austretenden Temperaturverläufe gegen Ende des Versuchs an. Die Annäherung der Kurvenverläufe entspricht den Erwartungen, die in der Literatur gefunden wurden.

In Abbildung 46 sind die relativen Feuchten sowie die bereinigte Feuchte aufgetragen.

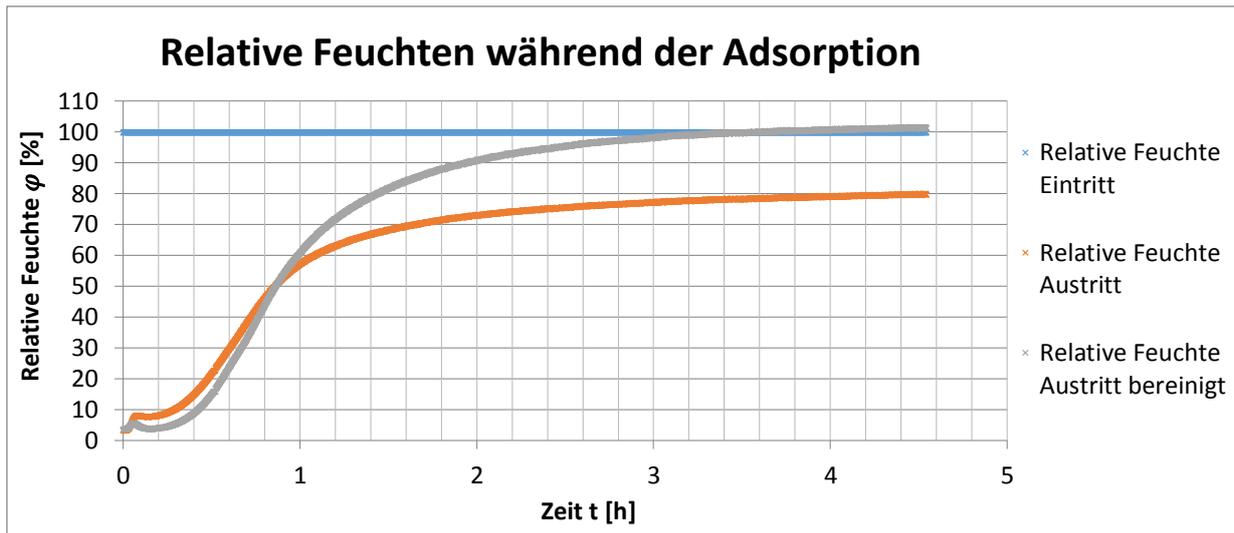


Abbildung 46: Relative Feuchten des ersten Versuchs bei der Adsorption nach Bereinigung der Messdaten

Nach dem Bereinigen der austretenden relativen Feuchte nähern sich die eintretenden und austretenden relativen Feuchten gegen Ende des Versuchs an. In Abbildung 45 hat sich gezeigt, dass die eintretende Temperatur gegen Ende des Versuchsablaufs beim Durchlaufen des Versuchsstands gleich bleibt. Somit bleibt auch die relative Feuchte gleich.

In Abbildung 47 sind die von Labview berechneten sowie die bereinigte spezifische Enthalpie dargestellt.

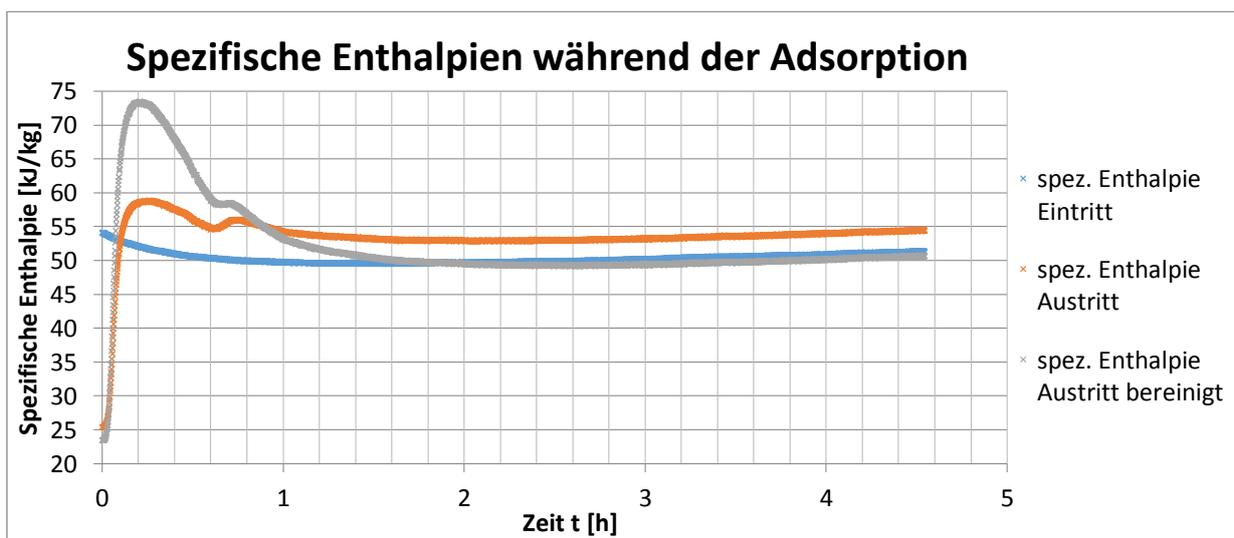


Abbildung 47: Spez. Enthalpie des ersten Versuchs für die Adsorption

Nach der Bereinigung der spezifischen Enthalpie ist eine Annäherung der eintretenden zur austretenden spezifischen Enthalpie gegeben. Die austretende spezifische Enthalpie steigt zunächst am Austritt durch die frei werdende Adsorptionsenthalpie und die damit verbundene Temperaturerhöhung stark an. Nachdem die austretende spezifische Enthalpie ihr maximum

erreicht hat, fällt diese zunächst wegen des Wärmestroms an die Umgebung ab. Bei genauerer Betrachtung der Gleichung (19) ist mit der Zunahme der relativen Feuchte und der damit verbundenen Zunahme der Wasserdampfbeladung die Enthalpie im weiteren Verlauf noch einmal gestiegen. Für die bereinigte spezifische Enthalpie, bei der der Einfluss des Wärmestroms an die Umgebung beseitigt wurde, ist ein Einknicken des spezifischen Enthalpieverlaufs nicht zu erkennen.

Die Enthalpie der Feuchten Luft  $H$  wurde nach Gleichung (20) für jeden Messpunkt berechnet. Anschließend wurden alle Rechenwerte für die Enthalpie der feuchten Luft aufaddiert. Dabei ergab sich ein Wert von 266,48 kJ.

In Abbildung 48 ist die Wasserdampfbeladung über die Versuchsdauer aufgetragen.

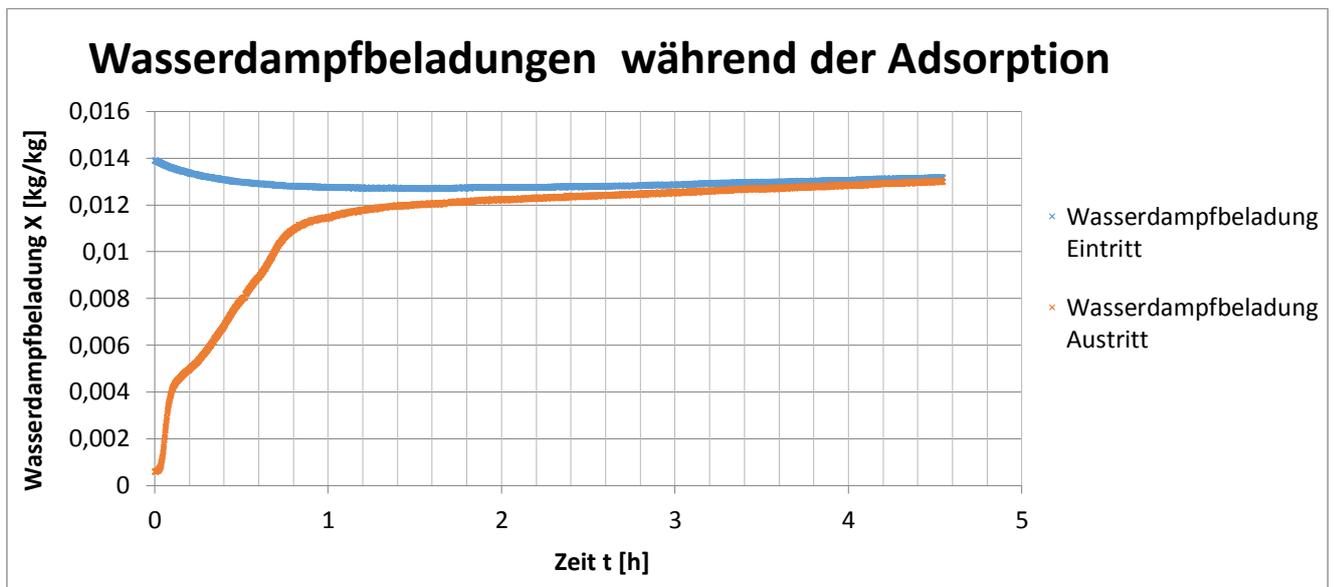


Abbildung 48: Wasserdampfbeladung des ersten Versuchs für die Adsorption

Die eintretende Wasserdampfbeladung  $X_{\text{ein}}$  stellte sich im Laufe des Versuchs auf einen Wert von 0,01337 kg/kg ein. Es ist zu erkennen, dass die Kurvenverläufe der Wasserdampfbeladungen am Eintritt und Austritt sich gegen Ende des Versuchsablaufs annähern.

In Abbildung 49 ist die aufgenommene Menge an Wasser während der Versuchsdauer dargestellt.

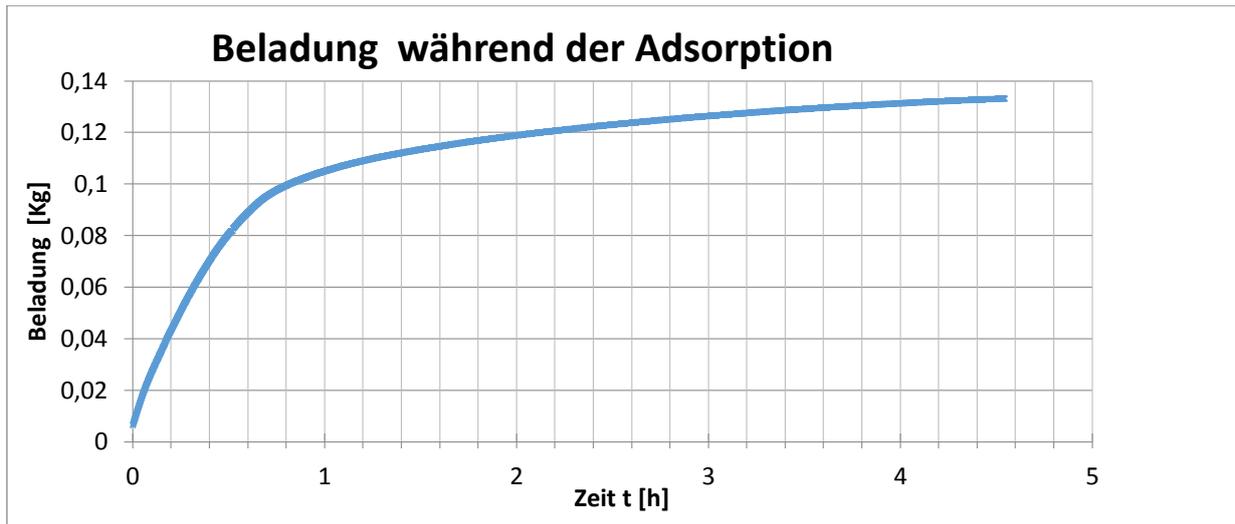


Abbildung 49: Beladung des ersten Versuchs für die Adsorption

Die maximale Beladung stellt sich bei 0,133 kg Wasser ein. Die Beladung wird aus den Differenzen der eintretenden und austretenden Wassermassen nach Gleichung (14) berechnet. Entscheidend für die Berechnung ist die Wasserdampfbeladung nach Gleichung (10). Dafür müssen die relativen Feuchten, die Absolutdrücke sowie die Sättigungstemperaturen am Eintritt und Austritt exakt bestimmt werden.

In Abbildung 50 ist der Temperaturhub bei der Veränderung der Wasserdampfbeladung dargestellt.

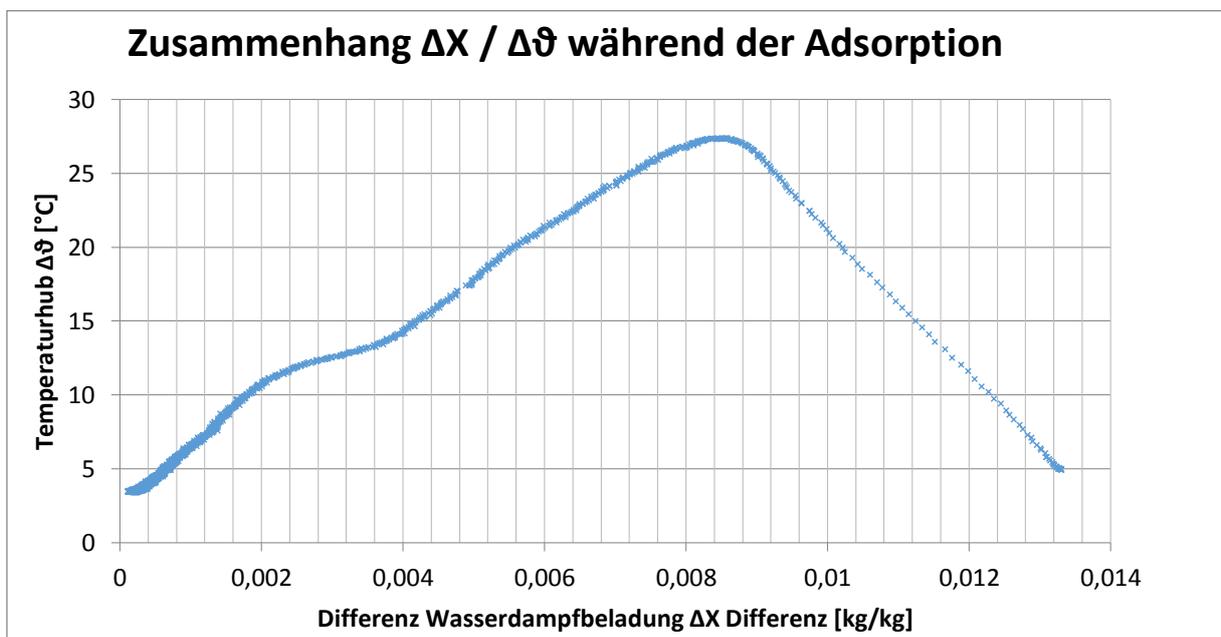


Abbildung 50: Temperaturhub über Veränderung der Wasserdampfbeladung des ersten Versuchs für die Adsorption

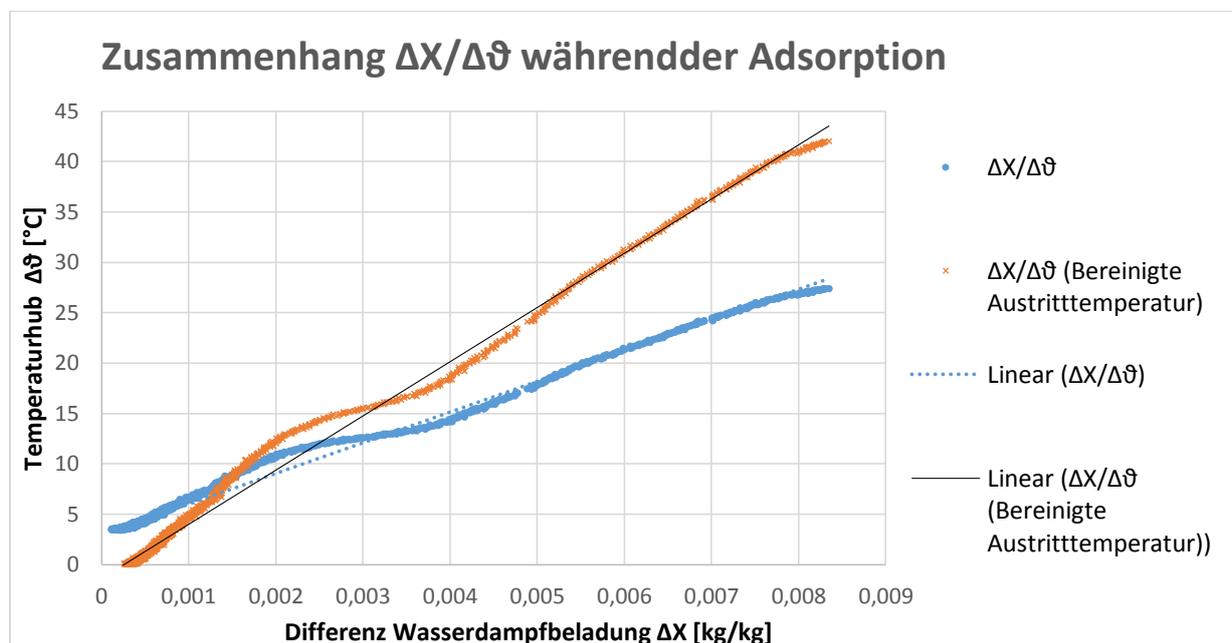
Für jede Differenz der Wasserdampfbeladung aus Abbildung 50 kann eine bestimmte Zeit zugeordnet werden, welche in Tabelle 12 hinterlegt ist.

**Tabelle 12: Zusammenhang zwischen der Differenz der Wasserdampfbeladung und Versuchsdauer**

Differenz Wasserdampfbeladung $\Delta X$ [kg/kg]	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012
Zeit t [min]	67	46	40	36	30	25	20	15	7	5	4	3

Zu Beginn der Adsorption ist die größte Differenz der Wasserdampfbeladung zu verzeichnen. Der Temperaturhub steigt zu Beginn des Versuches an, bis ein maximaler Temperaturhub erreicht ist. Gegen Ende des Versuchs wird nicht nur der Temperaturhub, sondern auch die Differenz der Wasserdampfbeladung kleiner.

Hauer (2002, S.86) stellt in seiner Dissertation bei seinen Adsorptionsversuchen mit Zeolith in Abbildung 19 einen linearen Zusammenhang des Temperaturhubes zur Differenz der Wasserdampfbeladung fest. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 51 dargestellt.



**Abbildung 51: Experimenteller Zusammenhang des ersten Versuchs für die Adsorption**

In Abbildung 51 ist ein linearer Verlauf zu erkennen. Eine Trendlinie durch die ausgewerteten Punkte zeigt den in der Literatur gefundenen Zusammenhang nach Gleichung (23). Im Bereich bei  $\Delta X = 0,001$  kg/kg bis  $\Delta X = 0,003$  kg/kg ist eine Abweichung des linearen Verlaufs zu erkennen, dass einer Zeit von 40 min bis 67 min entspricht.

In Abbildung 52 sind Mess- und Rechenwerte über die Versuchsdauer dargestellt. Damit die Mess- und Rechenwerte in einem Diagramm übersichtlich dargestellt werden können, wurden die Werte in Prozent während der Versuchsdauer dargestellt.

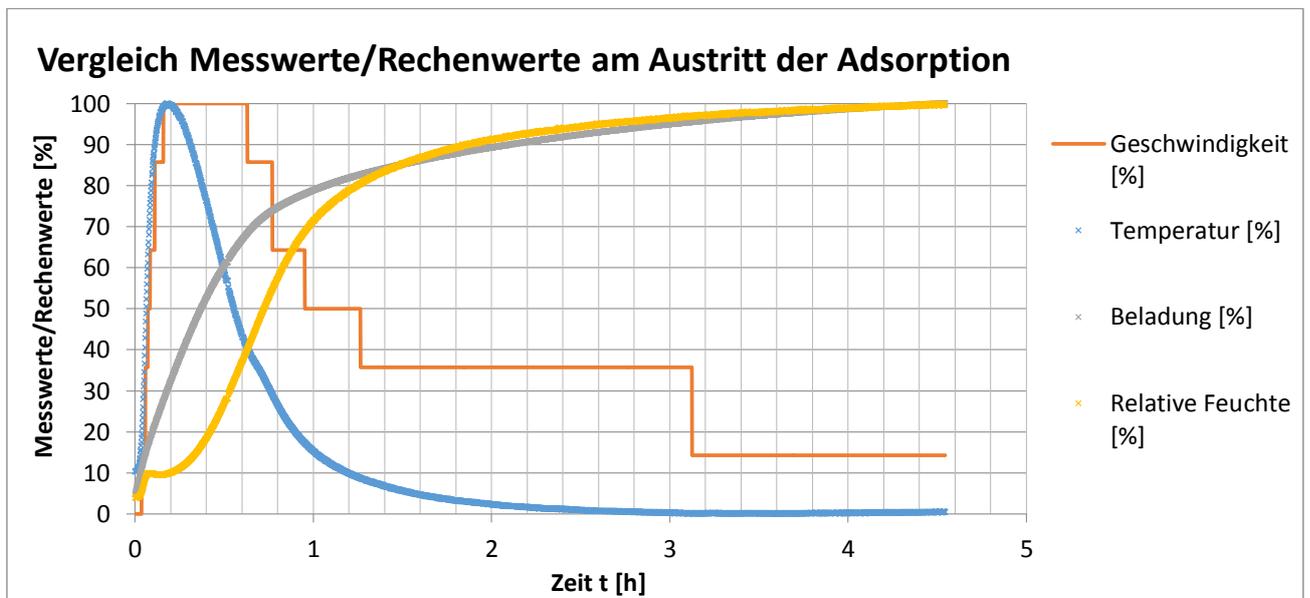


Abbildung 52: Messwerte/Rechenwerte des ersten Versuchs für die Adsorption

Der Geschwindigkeitsverlauf verhält sich analog zum Verlauf der austretenden Temperatur. Dadurch kann man eine Abhängigkeit der austretenden Temperatur zur austretenden Geschwindigkeit vermuten. Dieses wird im Folgenden näher betrachtet. Es wurden nur die Mess- und Rechenwerte am Austritt des Versuchsstands während des Versuchsverlaufs betrachtet. Wegen des Vorgangs der Adsorption ist die austretende Luft zu Beginn des Versuchs trocken und am Ende des Versuchs bei beladenem Speicher feucht. Die Mess- und Rechenwerte sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Mess- und Rechenwerte am Austritt bei der Adsorption

Max. Temperatur $T_{2,max}$ zu Beginn des Versuchs	$45,17^{\circ}\text{C} = 318,32\text{ K}$
Min. Temperatur $T_{2,min}$ am Ende des Versuchs	$21,35^{\circ}\text{C} = 294,5\text{ K}$
Max. Geschwindigkeit zu Beginn des Versuchs	$1,47\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Min. Geschwindigkeit am Ende des Versuchs	$1,33\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Massenstrom zu Beginn des Versuchs	$0,00507\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Massenstrom gegen Ende des Versuchs	$0,00498\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Dichte der trockenen Luft zu Beginn des Versuchs	$1,1\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dichte der feuchten Luft gegen Ende des Versuchs	$1,17\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Um den Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit zu beweisen, werden zwei Annahmen getroffen.

1. Da die Abweichung des austretenden Massenstroms zu Beginn des Versuchs im Vergleich zu dem Massenstrom am Ende nur 1,76% beträgt, wird ein konstanter Massenstrom angenommen.
2. Genauso wird die feuchte Luft am Ende des Versuchs als trockene Luft betrachtet, weil die Abweichung nur 1,1% beträgt.

Für die Dichte der trockenen Luft am Austritt gilt:

$$\rho_2 = \frac{p}{R_l \cdot T_2} \quad (47)$$

Für das Verhältnis der Dichten gilt:

$$\frac{\rho_{2,min}}{\rho_{2,max}} = \frac{T_{2,max}}{T_{2,min}} = \frac{318,32K}{294,5K} = 1,08 \quad (48)$$

Nach der Kontinuitätsgleichung aus Gleichung (12) gilt:

$$w_2 = \frac{\dot{m}_A}{\rho \cdot A}$$

Für das Verhältnis der Geschwindigkeit am Anfang und der Geschwindigkeit am Ende des Versuchs ergibt sich:

$$\frac{w_{2,max}}{w_{2,min}} = \frac{\rho_{2,min}}{\rho_{2,max}} \quad (49)$$

Für das Verhältnis der Dichten  $\frac{\rho_{2,min}}{\rho_{2,max}} = 1,08$  kann nach Gleichung (49) die Geschwindigkeit am Ende  $w_{2,min}$  eingesetzt werden, um die Anfangsgeschwindigkeit  $w_{2,max}$  zu berechnen:

$$w_{2,max} = 1,08 \cdot w_{2,min} = 1,08 \cdot 1,33 \frac{m}{s} = 1,44 \frac{m}{s}$$

Die berechnete Geschwindigkeit am Austritt mit  $1,44 \frac{m}{s}$  stimmt mit der gemessenen Geschwindigkeit von  $1,47 \frac{m}{s}$  überein. Die Rechnung zeigt, dass die maximale

Geschwindigkeit von  $1,47 \frac{m}{s}$  zum größten Teil von der Dichte der trockenen Luft abhängt. Weil zu Beginn des Versuchs der Adsorption die Temperatur und damit die Dichte am höchsten sind, nimmt die Luft ein großes Volumen ein und muss schneller am Austritt des Versuchstands strömen. Gegen Ende des Versuchs ist die Temperatur niedrig und damit auch die Geschwindigkeit.

Bei der Auswertung verschiedener Versuche der Adsorption ergaben sich ähnliche Kurvenverläufe, die im Anhang (Kapitel A2) hinterlegt sind. Die Auswertungen für alle Versuche sind in Tabelle 14 dargestellt.

**Tabelle 14: Zusammenfassung für die Auswertung der Adsorption**

Versuch	1	2	3	4	5	6
Datum	03.08.15	09.09.15	24.08.15	11.09.15	10.09.15	25.08.15
Druck am Druckminderer [bar]	1	1	1	1	1,5	1,5
Wasserdampfbeladung $X_{\text{ein}}$ [kg/kg]	0,01337	0,01586	0,0172	0,0149	0,01528	0,01384
Wasserdampfbeladung $X_{\text{aus}}$ [kg/kg]	0,00513	0,00663	0,007	0,0042	0,004	0,0031
Differenz Wasserdampfbeladung $X$ [kg/kg]	0,00824	0,00923	0,0102	0,0107	0,01128	0,01074
Temperatur vor dem Zeolithspeicher bei Max. Temperaturhub [°C]	18,25	20,92	22,18	20,03	20,385	18,78
Bereingte Max. Temperatur nach dem Zeolithspeicher [°C]	60,31	67,19	73,35	73,08	76,92	71,57
Temperaturhub [°C]	42,06	46,27	51,17	53,05	56,535	52,79
Max. Beladung [kg]	0,133	0,144	0,146	0,168	0,166	0,161
Enthalpie H [kJ]	266,48	91,5	94,7	113,03	137,5	256,6
Enthalpie H bereinigt [kJ]	196,6	242,05	227,7	391,02	318,8	398,5
Verlust Enthalpie H [kJ]	117	177	170	252	228	219

Die Enthalpie H [kJ] wurde nach Gleichung (20) berechnet und über die Versuchsdauer addiert. Die bereinigte Enthalpie H bezieht sich auf die austretende bereinigte spezifische

Enthalpie zur eintretenden spezifischen Enthalpie. Die Verlust Enthalpie bezieht sich auf die austretende bereinigte spezifische Enthalpie zur austretenden spezifischen Enthalpie.

Entgegen der Erwartungen in Kapitel 4.2 konnte für den vierten Versuch der Adsorption, der nach der Desorption des dritten Versuchs mit 9h Trocknungszeit durchgeführt wurde, keine Erhöhung des maximalen Temperaturhubes festgestellt werden. Das lässt darauf schließen, dass bei Annäherung der relativen Feuchte am Eintritt und Austritt das Zeolith bereits getrocknet vorliegt. Der von Hauer (2002, S.88) gefundene experimentelle Zusammenhang, der in Gleichung (26) dargestellt wurde, ist in Abbildung 53 abgebildet.

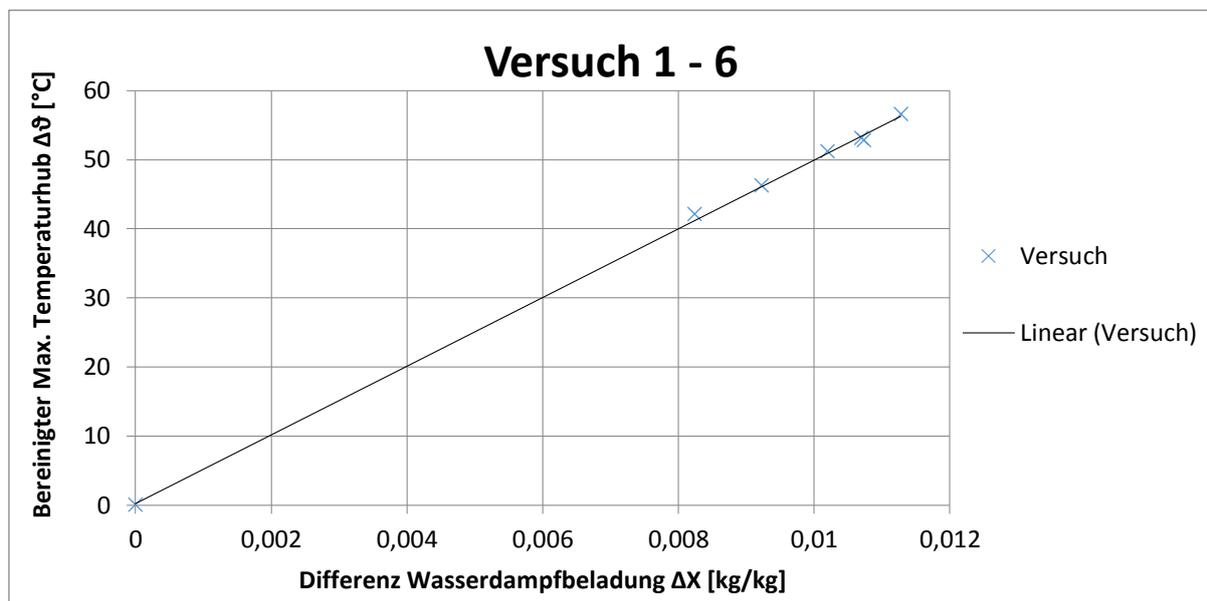


Abbildung 53: Experimenteller Zusammenhang zwischen maximalen Temperaturhub und Veränderung der Wasserdampfbeladung für alle Versuche bei der Adsorption.

Abbildung 53 zeigt einen linearen Verlauf, bei dem mit steigender Differenz der Wasserdampfbeladung ein Anstieg des maximalen Temperaturhubes zu verzeichnen ist. Nach Gleichung (26) wird erwartet, dass am Austritt die Luft bei einem maximalen Temperaturhub vollständig entfeuchtet vorliegt. Weil jedoch noch eine Wasserdampfbeladung am Austritt berechnet wurde, sind die Differenzen der eintretenden zur austretenden Wasserdampfbeladung aufgetragen. Der maximale Temperaturhub wurde dabei auf die bereinigte maximale Temperatur zur eintretenden Temperatur bezogen.

## 7.4 Desorption

In Abbildung 54 ist die Beladung an Wasser im Zeolithspeicher über die Versuchsdauer dargestellt.

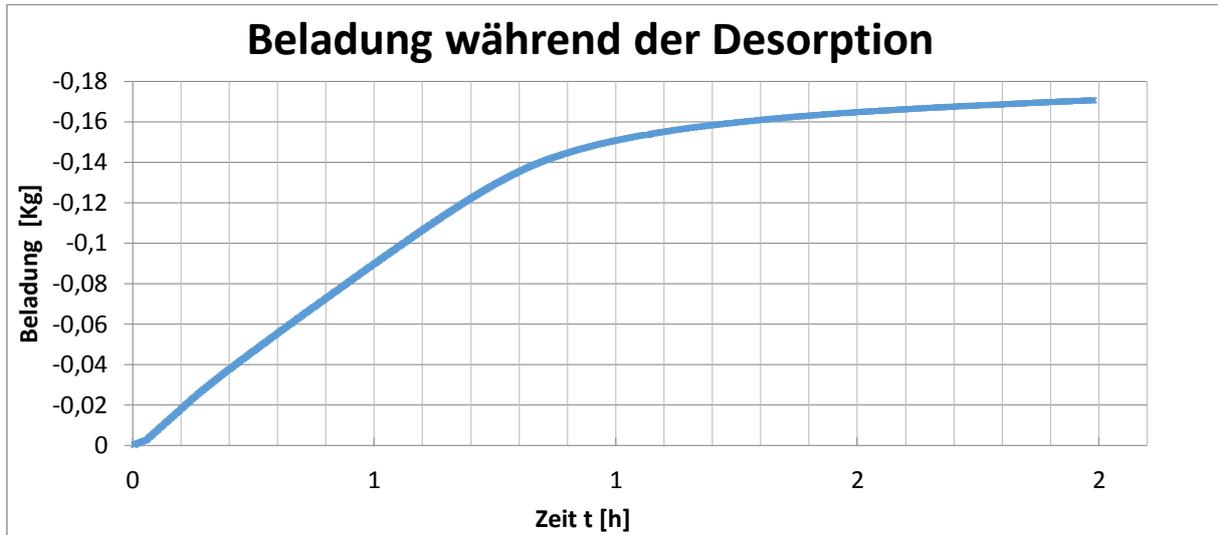


Abbildung 54: Beladung des ersten Versuchs für die Desorption

Die Beladung an Wasser im Zeolithspeicher wurde nach Gleichung (15) berechnet. Da der austretende Wassermassenstrom  $\dot{m}_{w,aus}$  größer als der eintretende Wassermassenstrom  $\dot{m}_{w,ein}$  war, ergab sich eine negative Beladung. Die berechnete maximal entnommene Wassermenge betrug dabei 0,1704 kg und liegt somit höher als die zugeführte Wassermenge. Mögliche Ursachen hierfür sind die Wärmeverluste. Dadurch werden am Austritt falsche Temperaturen und damit auch falsche relative Feuchten gemessen. Das hat zur Folge, dass die Wasserdampfbeladung nach Gleichung (10) falsch berechnet wird. Auch wenn die Abweichungen der Drücke am Eintritt und Austritt nur minimale Abweichungen verursachen, gehen die Drücke auch in die Wasserdampfbeladungen nach Gleichung (10) ein.

In Abbildung 55 sind die Temperaturverläufe am Eintritt und Austritt sowie die bereinigte Temperatur am Austritt dargestellt.

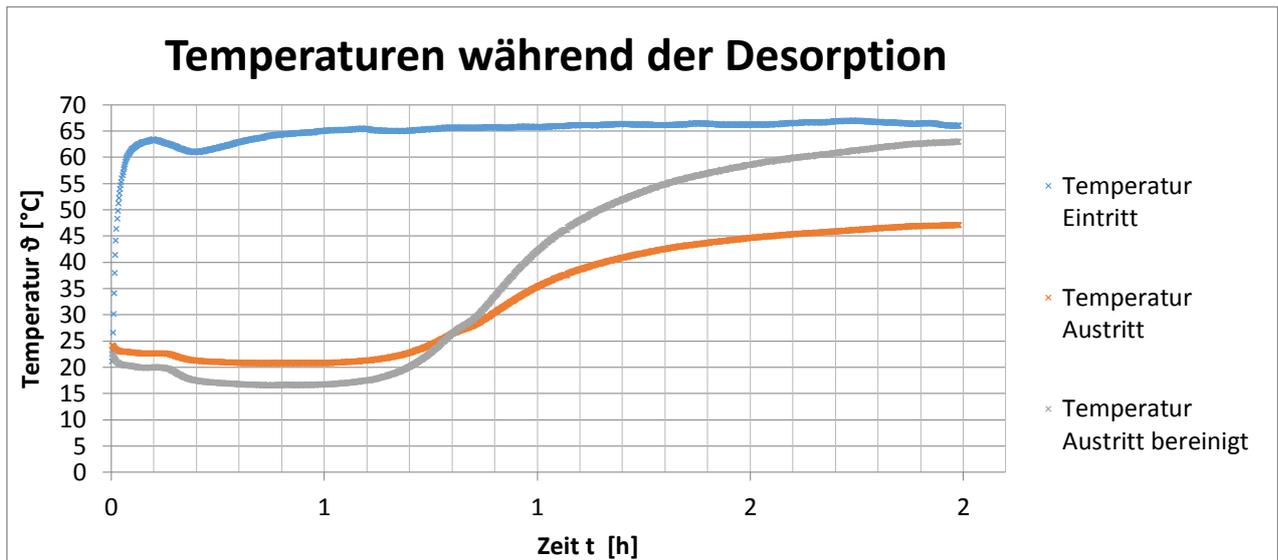


Abbildung 55: Bereinigte Temperatur des ersten Versuchs für die Desorption

Die bereinigte austretende Temperatur liegt unterhalb der gemessenen austretenden Temperatur, weil ein Wärmestrom von der Umgebung dafür sorgt, dass der Zeolithspeicher erwärmt wird.

In Abbildung 56 sind die Verläufe der relativen Feuchten sowie die bereinigte relative Feuchte am Austritt dargestellt.

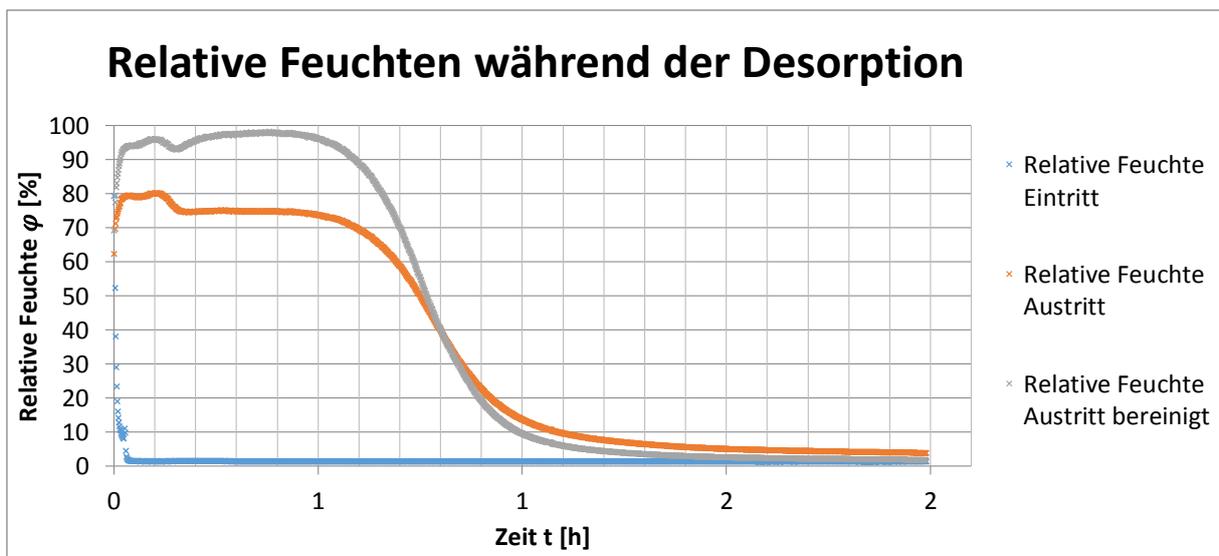


Abbildung 56: Bereinigte relative Feuchte des ersten Versuchs für die Desorption

Die feuchte Luft wird durch die Umgebung, wie in Abbildung 55 gezeigt, auf ein höheres Temperaturniveau gehoben. Dadurch nimmt die relative Feuchte ab. Mit dem bereinigten Temperaturverlauf in Abbildung 55 wird die feuchte Luft auf einem niedrigen Temperaturniveau gehalten und bleibt somit gesättigt.

In Abbildung 57 wird der Geschwindigkeitsverlauf mit dem Temperaturverlauf während des Versuchs verglichen.

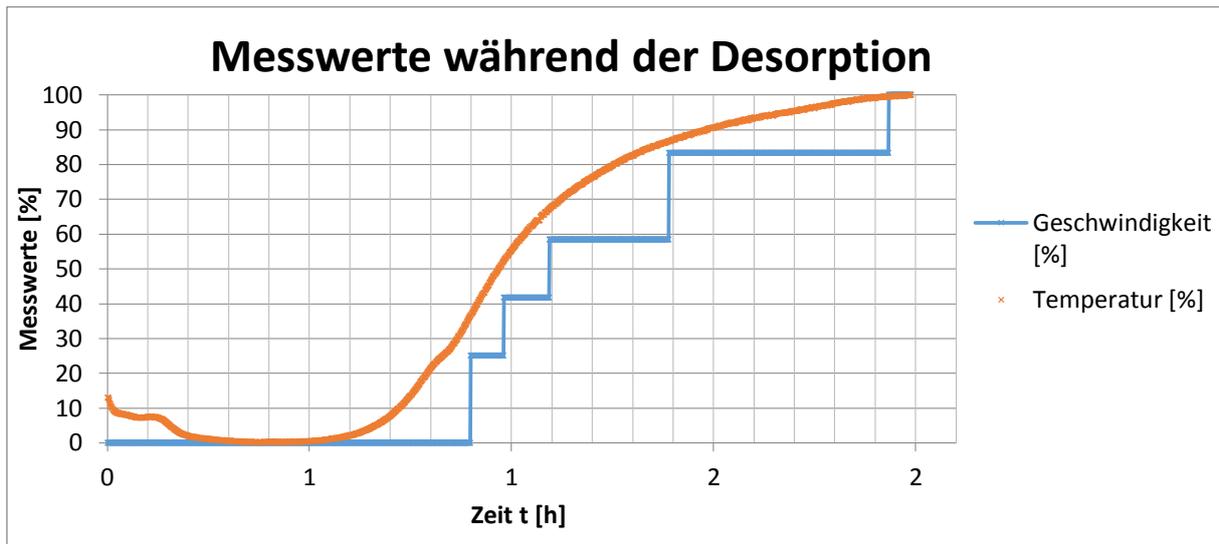


Abbildung 57: Vergleich Temperatur und Geschwindigkeit am Austritt des ersten Versuchs für die Desorption

Wie bei der Adsorption ist ein Zusammenhang des Verlaufs der gemessenen Kurven zu verzeichnen. Die Auswertung erfolgt analog zu der aus Kapitel 7.2 „Auswertung Adsorption“.

Tabelle 15: Messwerte Geschwindigkeit und Temperatur am Austritt

Max. Temperatur $T_{2,max}$ am Austritt gegen Ende des Versuchs	47,07°C = 320,22 K
Min. Temperatur $T_{2,min}$ am Austritt zum Anfang des Versuchs	26,38°C = 299,53 K
Max. Geschwindigkeit am Austritt gegen Ende des Versuchs	1,47 $\frac{m}{s}$
Min. Geschwindigkeit am Austritt zum Anfang des Versuchs	1,35 $\frac{m}{s}$

Für das Verhältnis der Dichten gilt:

$$\frac{\rho_{2,min}}{\rho_{2,max}} = \frac{T_{2,max}}{T_{2,min}} = \frac{320K}{299,53K} = 1,069 \quad (50)$$

Nach der Kontinuitätsgleichung gilt:

$$w_2 = \frac{\dot{m}_A}{\rho \cdot A}$$

Für das Verhältnis der Geschwindigkeit am Anfang und der Geschwindigkeit am Ende des Versuchs ergibt sich:

$$\frac{w_{2,max}}{w_{2,min}} = \frac{\rho_{2,min}}{\rho_{2,max}}$$

Für die Probe der Richtigkeit wird die Geschwindigkeit am Anfang  $w_{2,min}$  eingesetzt, um die Geschwindigkeit am Ende  $w_{2,max}$  zu berechnen:

$$w_{2,max} = 1,069 \cdot w_{2,min} = 1,069 \cdot 1,35 \frac{m}{s} = 1,44 \frac{m}{s}$$

Die berechnete Geschwindigkeit am Austritt mit  $1,44 \frac{m}{s}$  stimmt mit der gemessenen Geschwindigkeit von  $1,47 \frac{m}{s}$  überein.

Bei der Auswertung verschiedener Versuche der Desorption ergaben sich ähnliche Kurvenverläufe und sind im Anhang (Kapitel A3) hinterlegt. Die Auswertungen für alle Versuche sind in Tabelle 16 aufgetragen.

**Tabelle 16: Auswertung der Desorption**

Versuch	1	2	3	4
Datum	03.08.2015	09.09.2015	10.09.2015	25.08.2015
Druck am Druckminderer [bar]	1	1	1,5	1,5
Temperatur vor dem Zeolithspeicher [°C]	64,46	77,82	58,5	64,82
Min. Temperatur nach dem Zeolithspeicher [°C]	20,81	22,47	19,57	21,34
Min. bereinigte Temperatur nach dem Zeolithspeicher [°C]	16,52	21,61	16,74	17,65
Massenstrom Luft [kg/s]	0,00494	0,00481	0,0061	0,00591
Wärmemenge [kW]	0,238	0,271	0,256	0,280
Entnommene Wassermenge [kg]	0,17	0,158	0,208	0,195

Der Energiebedarf, der für die Desorption benötigt wird, wurde nach Gleichung (27) berechnet.

## 8 Schlussbetrachtung

### 8.1 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Wärmespeicherung in einem Zeolithspeicher nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch durchführbar ist. In dem Versuch wurde das Zeolith zunächst getrocknet und konnte somit optimal aufgeladen werden. Es wurde gezeigt, dass der Speicher im aufgeladenen Zustand die Wärme thermochemisch halten kann. Die Abgabe der Wärme findet mit dem Prozess der Adsorption statt. Wie in der Literatur beschrieben konnte bewiesen werden, dass der maximale Temperaturhub abhängig von der Wasserdampfbeladung der zugeführten feuchten Luft ist. Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung ist, dass der Zeolithspeicher zu Beginn der Adsorption vollständig getrocknet vorliegt. Mit dem Einbau der Ventile im Versuchsaufbau vor und hinter dem Zeolithspeicher kann gewährleistet werden, dass keine Feuchtigkeit aus der Umgebung von dem Zeolith aufgenommen wird. So wurde erreicht, dass zu Beginn der Adsorption das Zeolith vollständig getrocknet vorliegt. Anhand theoretischer Betrachtungen wurde gezeigt, dass die austretende Geschwindigkeit abhängig von der Temperatur ist. Dadurch ist es unerlässlich, dass eine Geschwindigkeitsmessung am Austritt angebracht ist. Die theoretischen und praktischen Betrachtungen zu den Druckverlusten haben gezeigt, dass die Differenzen des Druckes am Eintritt und Austritt nur geringfügig abweichen. Die Software des Versuchsstands wurde soweit verbessert, dass die Messwerte ausgewertet werden können und das Speicherverhalten repräsentativ dargestellt werden kann. Es konnte keine Simulation erstellt werden, da hierfür die freie Energie aus den Isothermen bestimmt werden müssten. Für die Isothermen muss ein Versuchsstand zur Ermittlung der Adsorbatmenge beim Gleichgewichtsdruck entwickelt werden.

### 8.2 Ausblick

Weitere Optimierungsmöglichkeiten sind möglich und notwendig. Eine Optimierung besteht darin, die Isolierung des Versuchsstands zu verbessern. Das Zuführen der feuchten Luft unterhalb der Raumtemperatur führt bei der Adsorption zu Temperaturdifferenzen gegen Ende des Versuchs. Besonders deutlich wird diese Temperaturdifferenz gegen Ende der Desorption. Anhand der Wärmebetrachtung konnte gezeigt werden, dass diese Temperaturdifferenzen durch die Umgebung bedingt waren. Um dieses Problem zu vermeiden, sollte der Zeolithspeicher und markante Stellen, an denen ein Wärmeübergang stattfindet, isoliert werden. Vor den Isoliermaßnahmen sollten weitere theoretische und

praktische Untersuchungen durchgeführt werden, um die Isolierung optimal auszuführen. Mit einer optimalen Isolierung kann die Ausbeute an Wärme verbessert werden. Wie sich gezeigt hat ist die Isolierung auch zwingend nötig, um richtige Messergebnisse zu erhalten. Nur mit richtigen Messergebnissen kann eine richtige Auswertung erfolgen. Auch wenn die Abweichung des Drucks am Eintritt und Austritt nur minimale Abweichungen verursacht, sollte der Druck für eine genauere Auswertung in die Berechnung mit einfließen. Dafür muss am Austritt der Umgebungsdruck und am Eintritt der Absolutdruck gemessen werden.

Eine weitere Verbesserungsmaßnahme wäre ein Schwebekörperdurchflussmessverfahren und eine Temperaturmessung hinter dem Druckminderer. Somit kann der eingestellte Massenstrom der trockenen Luft direkt bestimmt werden. Zur Ermittlung der Isothermen muss ein Simulationstand projiziert werden. Der grundsätzliche Aufbau des Versuchstandes für die Simulation ergibt sich aus DIN ISO 9277 (DIN 2014, S.15). Eine andere Möglichkeit wäre den Versuchstand mit einem Zeolithtyp zu bestücken, bei dem die Isothermen aus der Literatur bekannt sind.

## 9 Quellen

- Bathen, D. und Breitbach, M., Adsorptionstechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001.
- Böckh, P., Fluidmechanik, Springer Verlag, Karlsruhe, 2013.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO 10628-2:2013-04, „Schemata für die chemische und petrochemische Industrie“, Beuth Verlag, Berlin, 2013.
- Deutsches Institut für Normung, DIN ISO 9277:2014-01, „Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption“, Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- Daniel T., Kosten und Nutzen von Pufferspeicher, Taspas Extra Energietechnik [http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Gartenbau/BW-Beratung/Wann-lohnt-ein-Pufferspeicher-TASPO\\_20\\_2011\\_Seite\\_014\\_15.pdf](http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Gartenbau/BW-Beratung/Wann-lohnt-ein-Pufferspeicher-TASPO_20_2011_Seite_014_15.pdf) (01.09.15)
- E+E Elektronik 2015a, Datenblatt: Feuchte / Temperatur Messumformer für Hochfeuchte- und Chemieranwendungen, [http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/ee33/Datenblatt\\_EE33.pdf](http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/ee33/Datenblatt_EE33.pdf), (22.07.15)
- E+E Elektronik 2015b, Zubehör: Filterkappen für Feuchte- und Taupunktmessumformer, [http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/accessories/Datenblatt\\_zubehoer.pdf](http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/accessories/Datenblatt_zubehoer.pdf), (22.07.15)
- Gromes h., Theoretische und experimentelle Untersuchung über das unterschiedliche Verhalten von Festbettadsorbentien im Fall niedriger bzw. hoher Adsorptivanteile im Feedgasstrom, Dissertation, Technischen Hochschule Darmstadt 1995.
- Hauer A., Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen, Dissertation, Technische Universität Berlin 2002.
- Kast W., Adsorption aus der Gasphase: ingenieurwiss. Grundlagen u. techn. Verfahren / Werner Kast. – Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1988.
- Moderne Materialien im Chemieunterricht (MMCh) „Chemische Struktur und Nomenklatur von Zeolithen“ [http://www.mmch.uni-kiel.de/Zeolithe/zeolithe\\_folien\\_2.htm](http://www.mmch.uni-kiel.de/Zeolithe/zeolithe_folien_2.htm) (07.07.15)
- Marek R., Nitsche K., Praxis der Wärmeübertragung, Fachbuchverlag Leipzig, Hochschule Deggendorf 2012
- Nunez T., Charakterisierung und Bewertung von Adsorbentien für Wärmetransformationsanwendung, Dissertation, Freiburg im Breisgau 2001
- Peak Tech Prüf- und Messtechnik „Bedienungsanleitung Professionelles Flügelrad-Anemometer“ [https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik-im-online-handel/messgeraete-fuer-alle-parameter/anemometer-peaktech-pruef-und-messtechnik-gmbh-anemometer-pkt-5060-det\\_270808.htm?\\_list=qr.art&\\_listpos=24](https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik-im-online-handel/messgeraete-fuer-alle-parameter/anemometer-peaktech-pruef-und-messtechnik-gmbh-anemometer-pkt-5060-det_270808.htm?_list=qr.art&_listpos=24) (23.04.2015)
- Steinweg B., Über den Stofftransport bei der Ad- und Desorption von Schadstoffen an/von Aktivkohle im Bereich umweltrelevanter Gaskonzentrationen. Shaker Verlag, Aachen,

- 1996, in Bathen, D. und Breitbach, M., Adsorptionstechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001.
- Storch, J., Materialwissenschaftliche Untersuchungen an zeolithischen Adsorbentien für den Einsatz in offenen Sorptionssystemen zur Wärmespeicherung, Dissertation, München 2009.
- Stricker M., Entwicklung einer mehrmodularen Zeolith-Wasser-Adsorptionswärmepumpe, VDI-Verlag, Bochum, 2003.
- Toda Y., M. Hatami, S. Toyoda, Y. Yoshida, H. Honda, Carbon, 1970, in Hauer A., Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen, Dissertation, Technische Universität Berlin 2002.
- Ulbig P. Grundlagen der Adsorption. Skriptum, Universität Dortmund 1999, in Bathen, D. und Breitbach, M., Adsorptionstechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Wärmeatlas, 11 Auflage, Springer Verlag, Düsseldorf, 1997
- Wagner W., Strömung und Druckverlust, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2012
- WIKA SE & Co. KG, „Differenzdruckmessgerät mit integrierter Betriebsdruckanzeige und Mikroschalter Typ DPGS40“, [http://de-de.wika.de/upload/DS\\_PV2720\\_de\\_de\\_55411.pdf](http://de-de.wika.de/upload/DS_PV2720_de_de_55411.pdf) (25.04.15)
- Weber R., Asenbeck S. und Kerskes H., Entwicklung eines kombinierten Warmwasser-Sorptionswärmespeichers für thermische Solaranlagen, Forschungsbericht BWPLUS, Universität Stuttgart (05.15)

# Anhang

## A 1 Analyse der Datensätze

Tabelle 17: Analyse der Datensätze

Messung	1	2	3	
	AA	AA	AA	
	61	61	61	
	64	64	64	
	6A	6A	6A	
	67	67	67	
	4	4	4	
	40	40	40	
	10	10	10	
	20	20	20	
	0	0	0	
	0	0	0	
	B9	A4	A2	Temperatur
	48	60	76	
	9E	9C	A3	
	41	41	41	
	CD	71	0	Geschwindigkeit
	CC	3D	0	
	AC	AA	0	
	3F	3F	0	
	0	0	0	
	3C	3C	3C	
	1C	1C	1C	
	C6	C6	C6	
Datensatz HEX Code	B9	A4	A2	Temperatur
	48	60	76	
	9E	9C	A3	
	41	41	41	
	0	0	0	
	3C	3C	3C	
	1C	1C	1C	
	C6	C6	C6	
	CD	71	0	Geschwindigkeit
	CC	3D	0	
	AC	AA	0	
	3F	3F	0	
	0	0	0	
	0	0	0	
	0	0	0	
	0	0	0	
62	62	62		
10	10	10		
83	83	83		
41	41	41		
0	0	0		
FF	FF	FF		
FF	FF	FF		
67	67	67		
FF	FF	FF		
67	67	67		
A8	D0	D8		

## A 2 Adsorption

### A 2.1 Messwerte des zweiten Versuchs

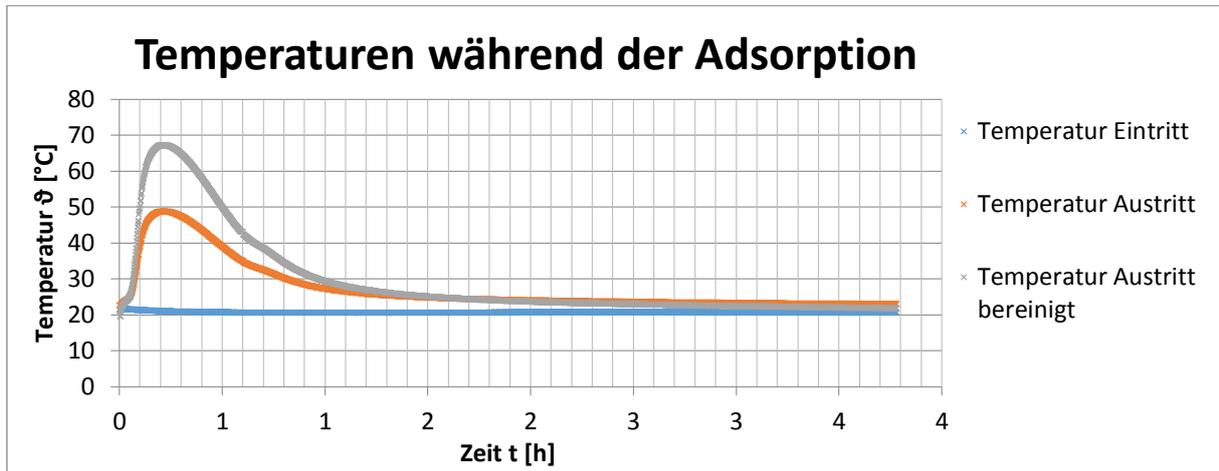


Abbildung 58: Temperaturen des zweiten Versuchs für die Adsorption

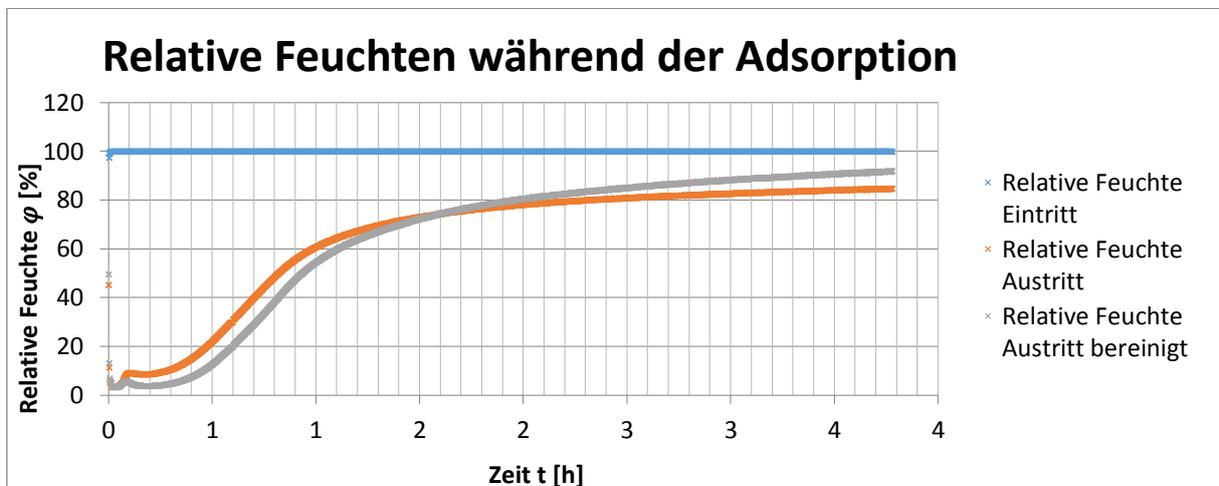


Abbildung 59: Relative Feuchten des zweiten Versuchs für die Adsorption

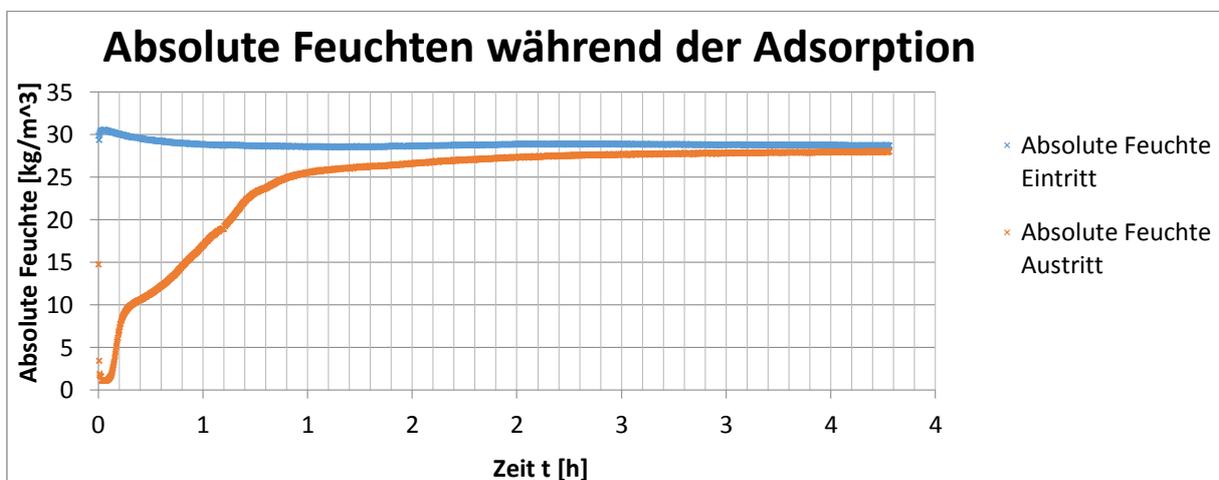


Abbildung 60: Absolute Feuchte des zweiten Versuchs für die Adsorption

## A 2.2 Rechenwerte des zweiten Versuchs

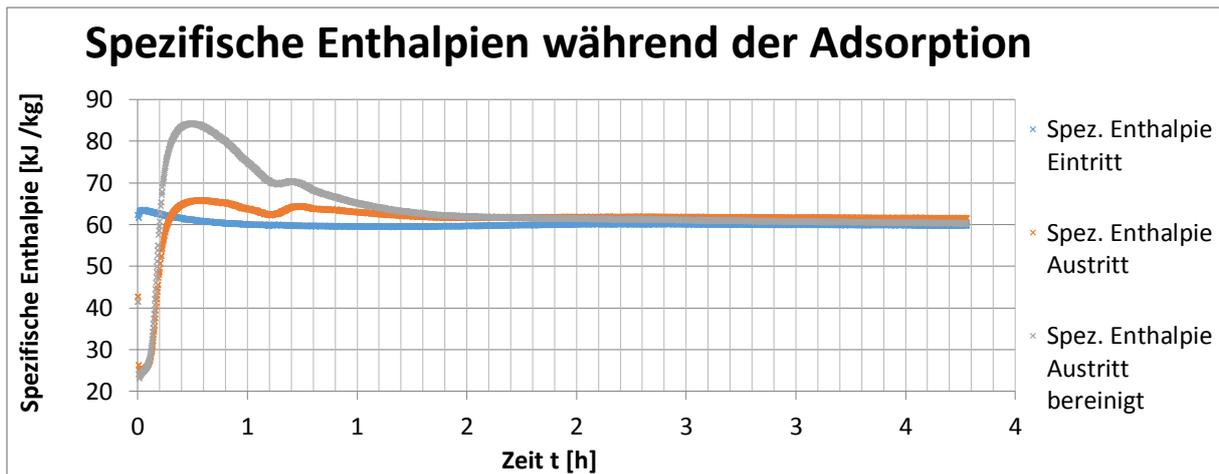


Abbildung 61: Spezifische Enthalpien für die Adsorption des zweiten Versuchs

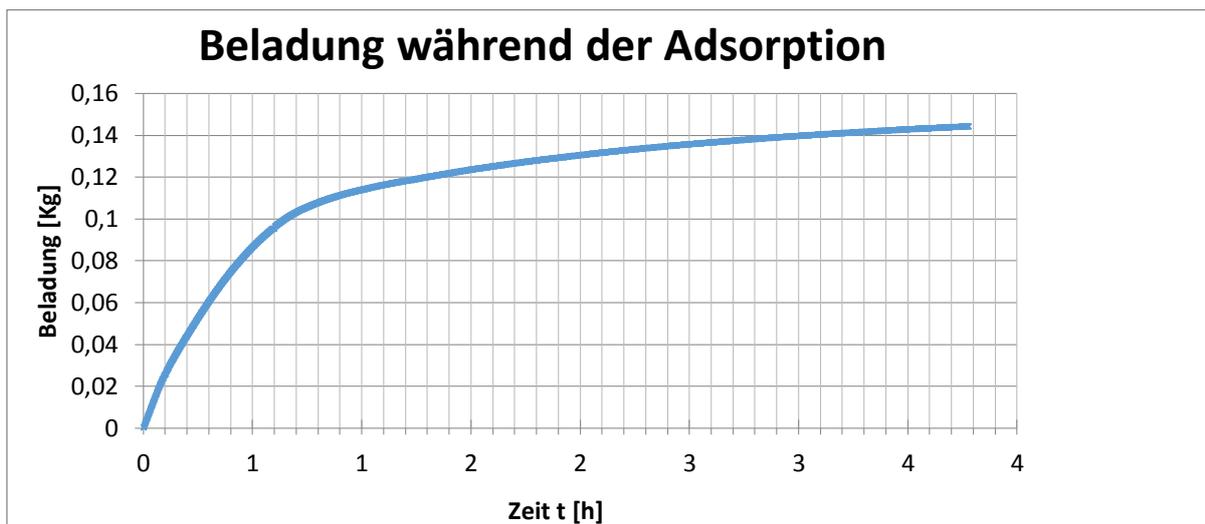


Abbildung 62: Beladung des zweiten Versuchs für die Adsorption

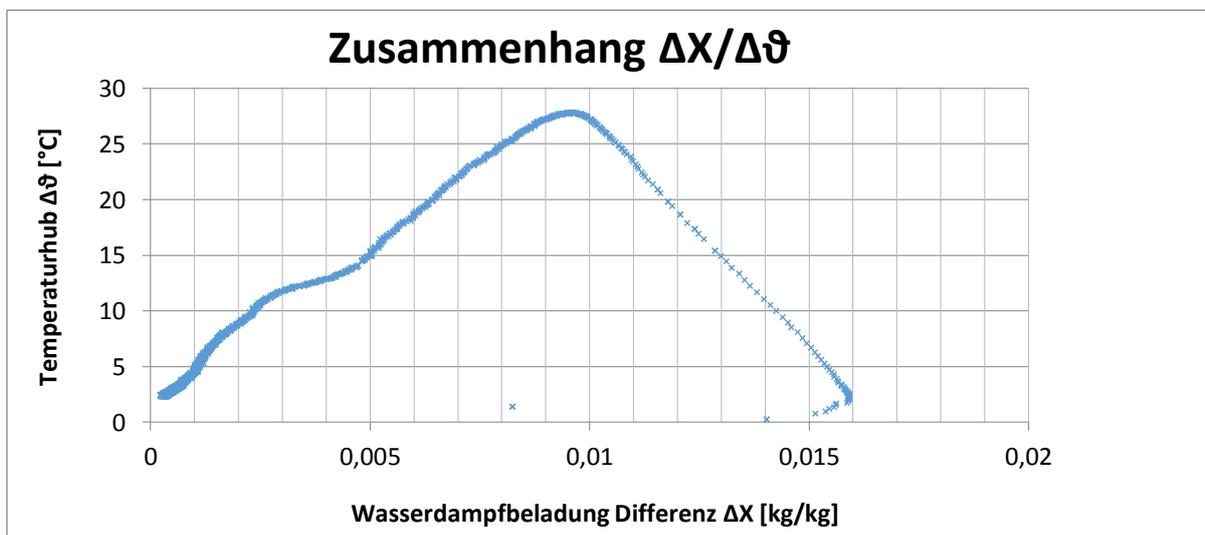


Abbildung 63: Temperaturhub über Veränderung der Wasserdampfbeladung des zweiten Versuchs für die Adsorption

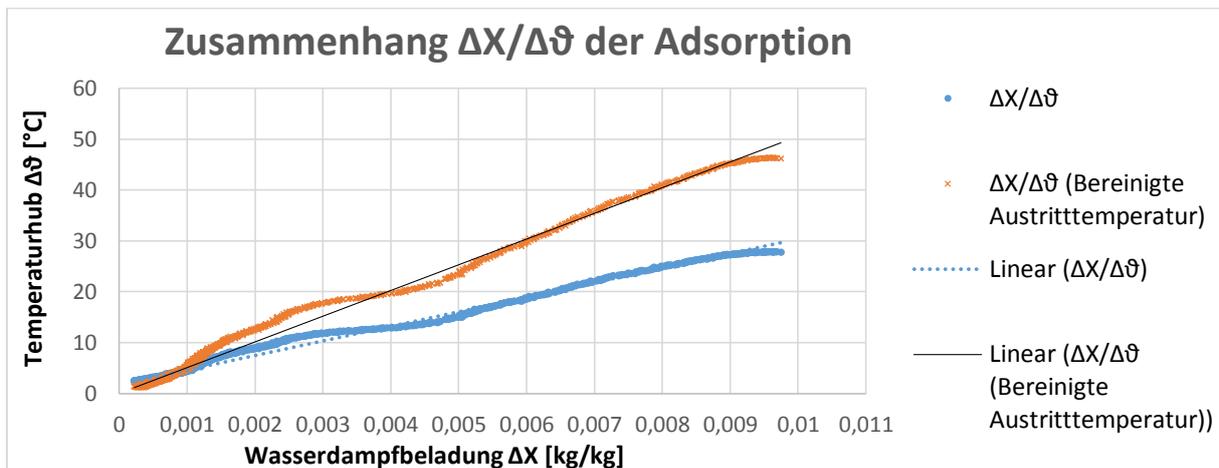


Abbildung 64: Experimenteller Zusammenhang des zweiten Versuchs für die Adsorption

#### A 2.3 Messwerte des dritten Versuchs

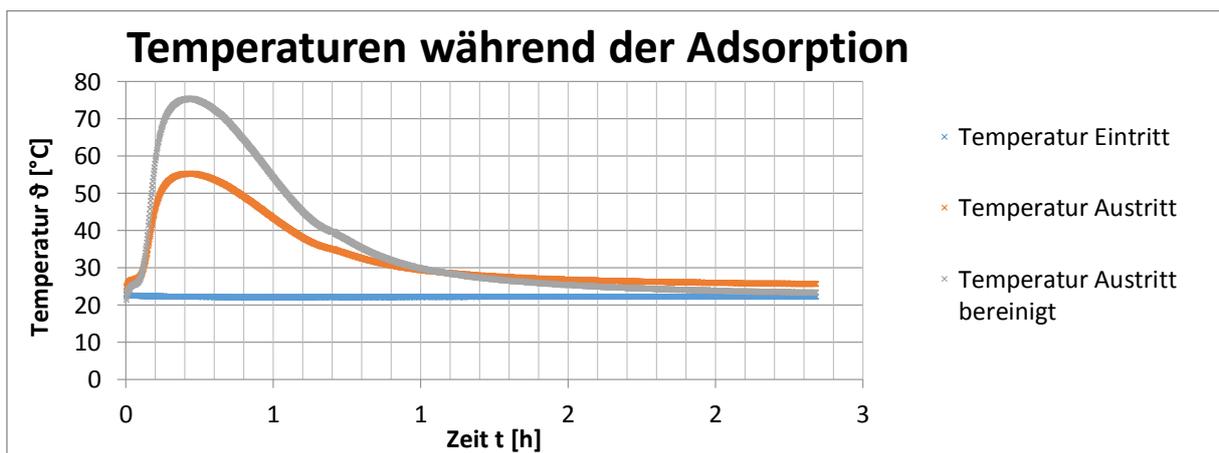


Abbildung 65: Temperaturen des dritten Versuchs für die Adsorption

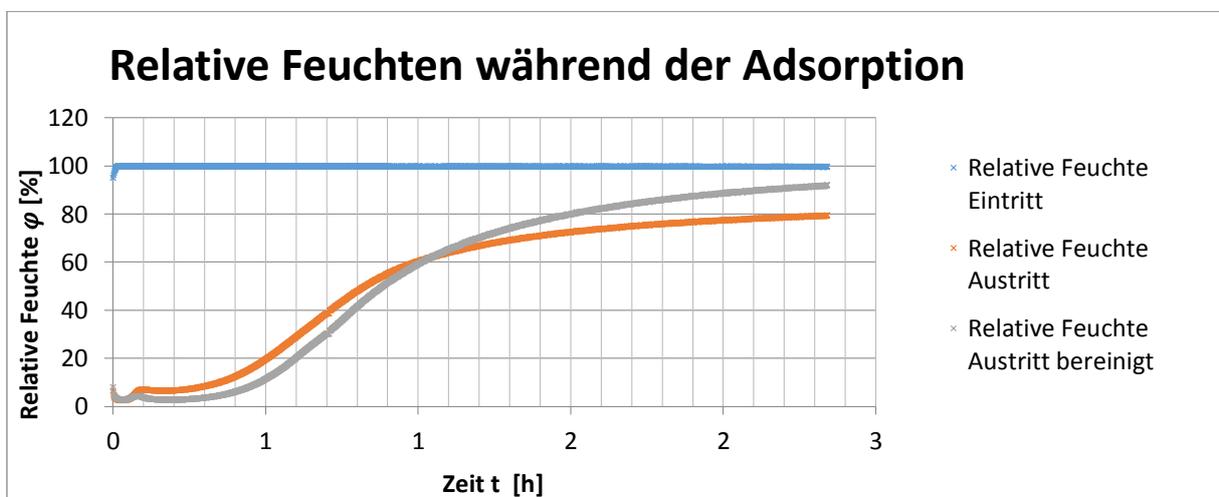


Abbildung 66: Relative Feuchten des dritten Versuchs für die Adsorption

## A 2.4 Rechenwerte des dritten Versuchs

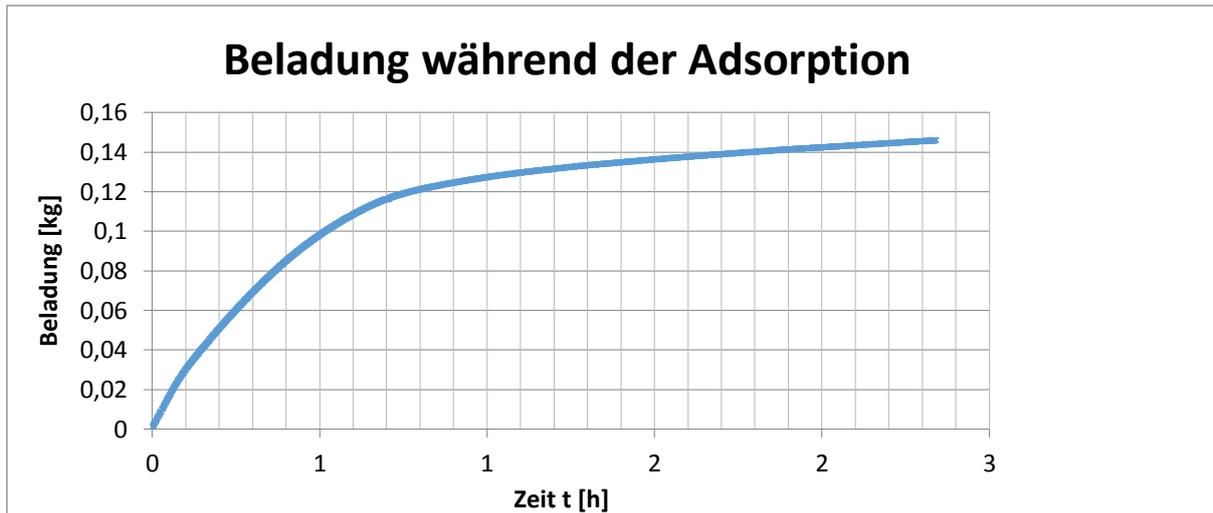


Abbildung 67: Beladung des dritten Versuchs für die Adsorption

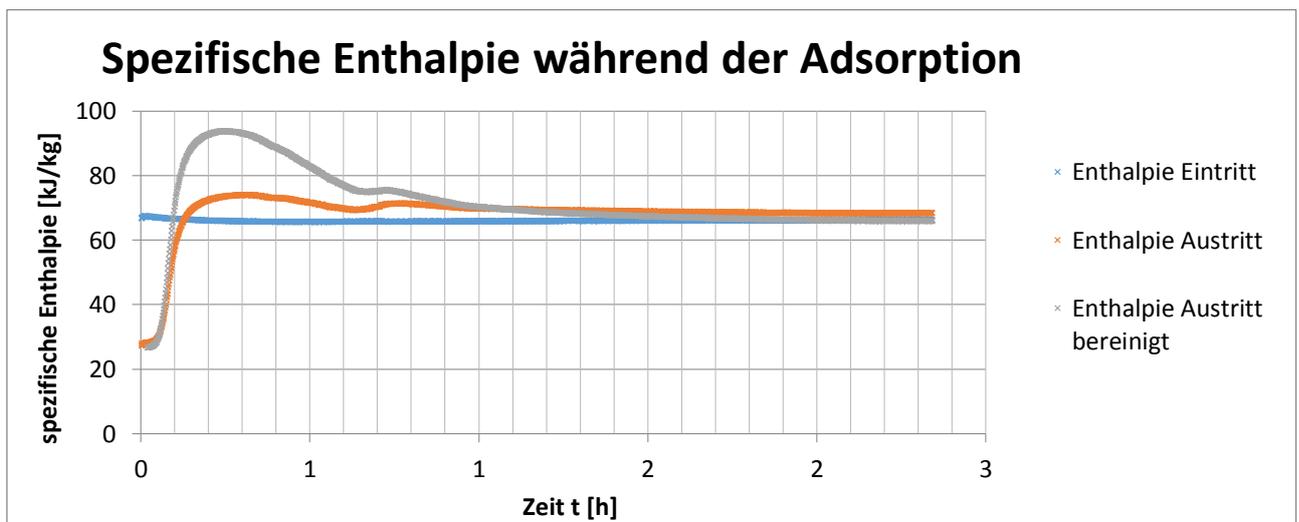


Abbildung 68: spezifische Enthalpie des dritten Versuchs für die Adsorption

## A 2.5 Messwerte des vierten Versuchs

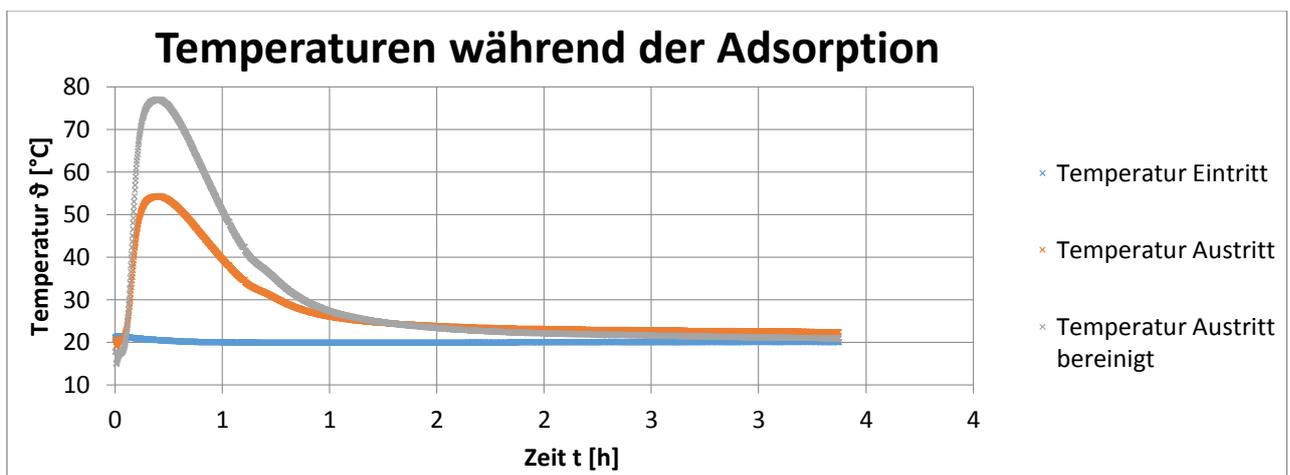


Abbildung 69: Temperatur des vierten Versuchs für die Adsorption

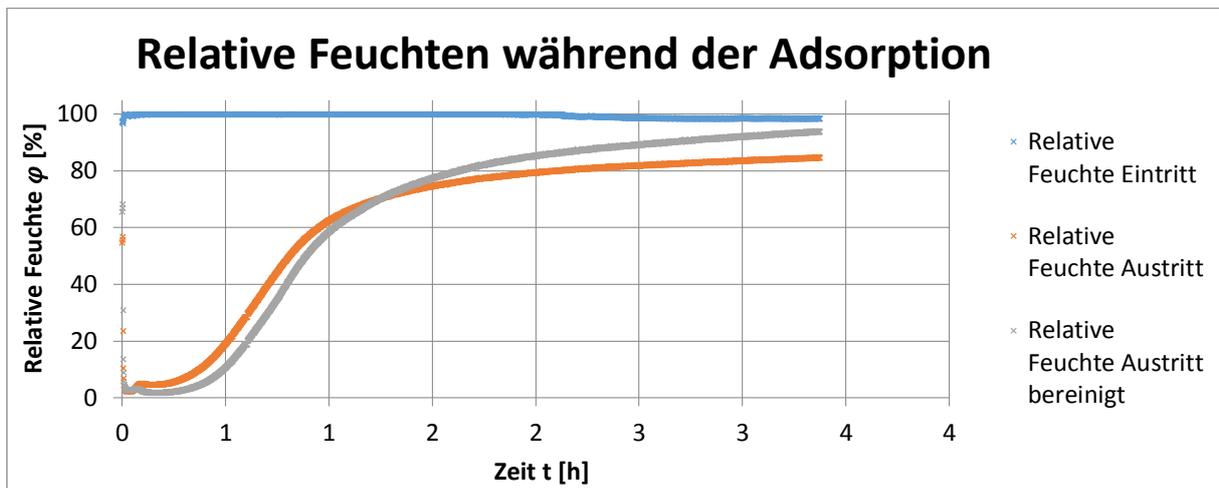


Abbildung 70: Relative Feuchte des vierten Versuchs für die Adsorption

#### A 2.6 Rechenwerte des vierten Versuchs

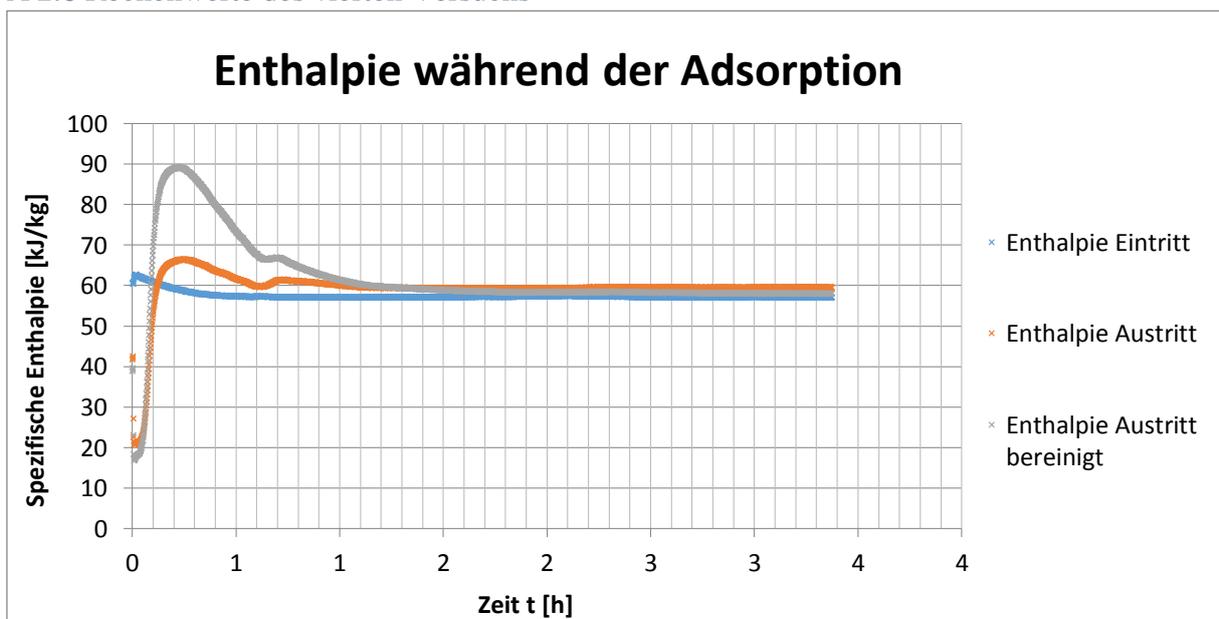


Abbildung 71: Spezifische Enthalpie des vierten Versuchs für die Adsorption

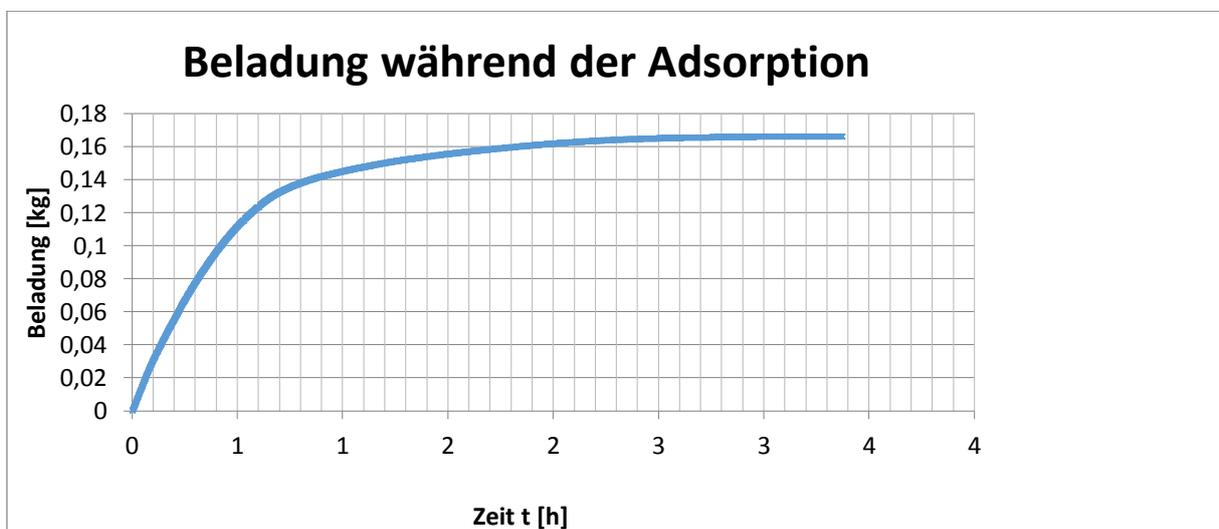


Abbildung 72: Beladung des vierten Versuchs für die Adsorption

## A 2.7 Messwerte des fünften Versuchs

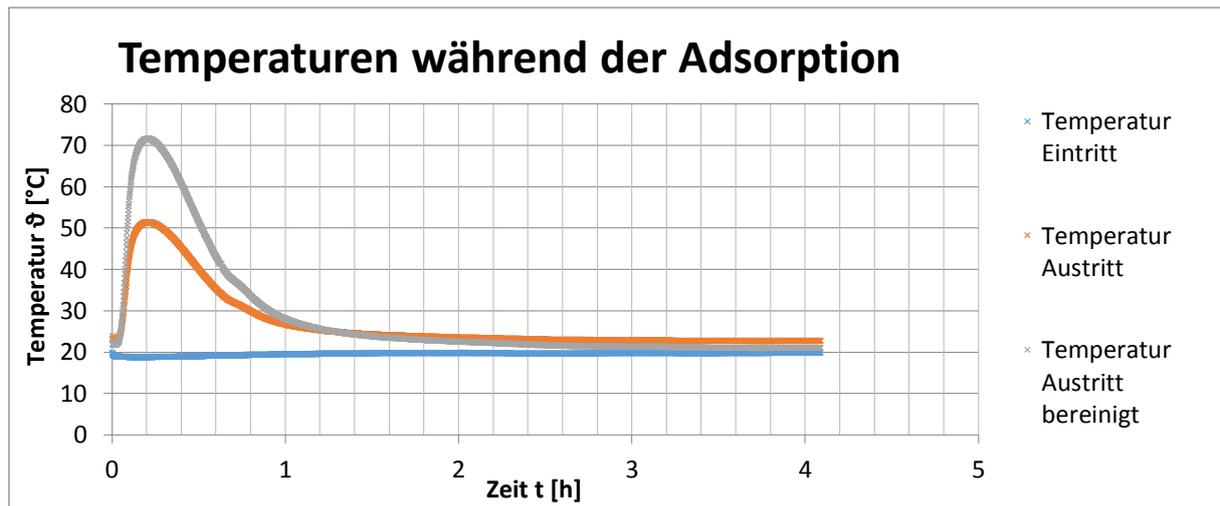


Abbildung 73: Temperatur des fünften Versuchs der Adsorption

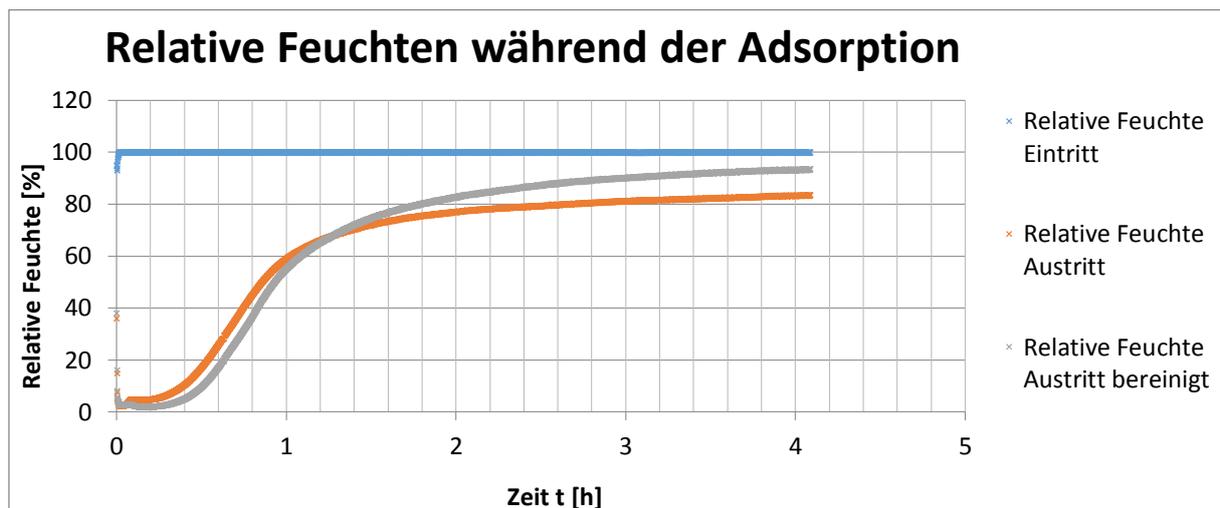


Abbildung 74: Relative Feuchte des fünften Versuchs für die Adsorption

## A 2.8 Rechenwerte des fünften Versuchs

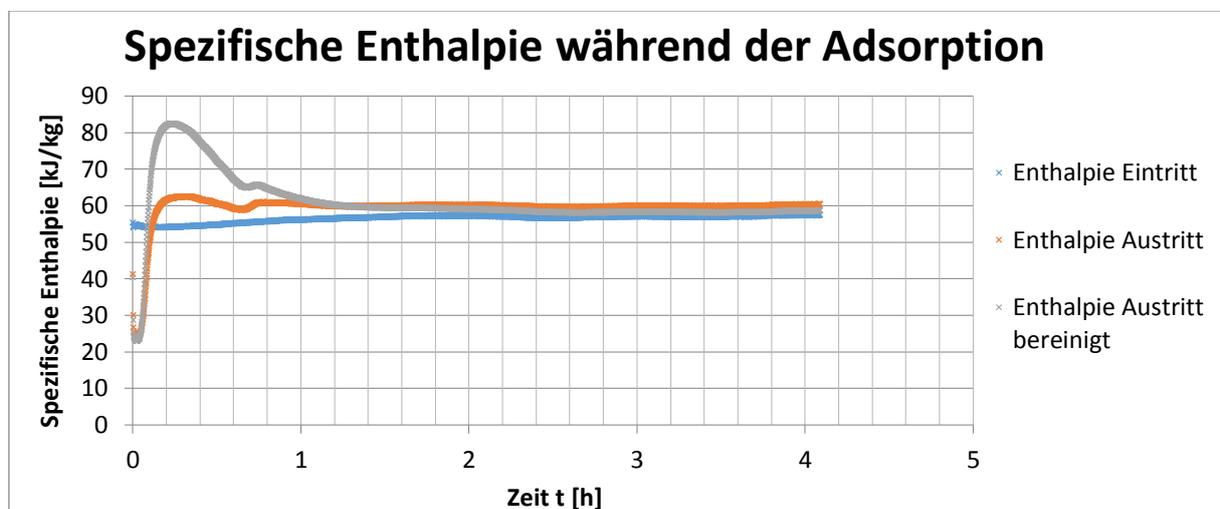


Abbildung 75: Enthalpie des fünften Versuchs für die Adsorption

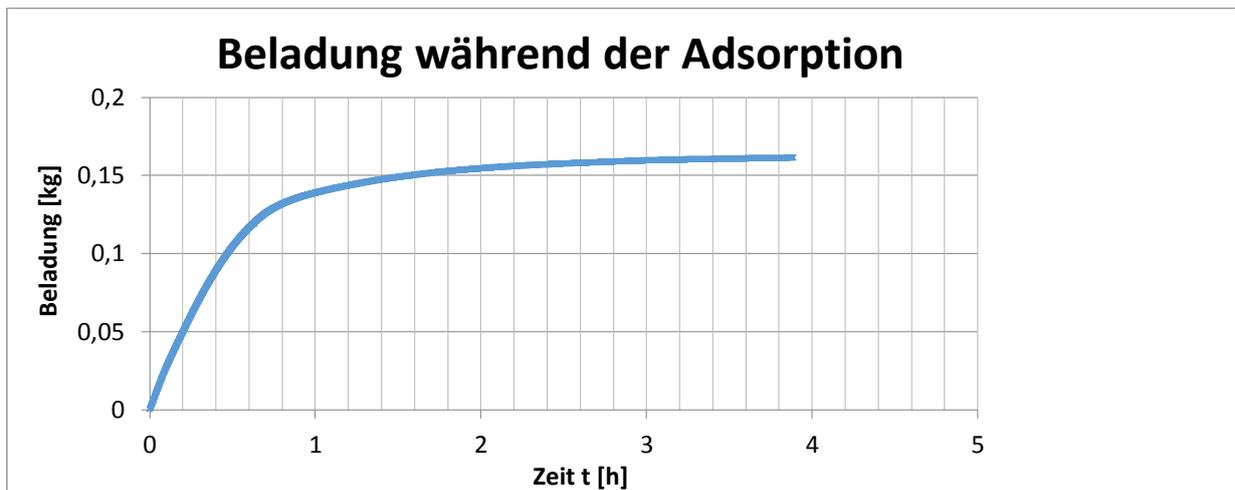


Abbildung 76: Beladung des fünften Versuchs für die Adsorption

## A 3 Desorption

### A 3.1 Messwerte des zweiten Versuchs

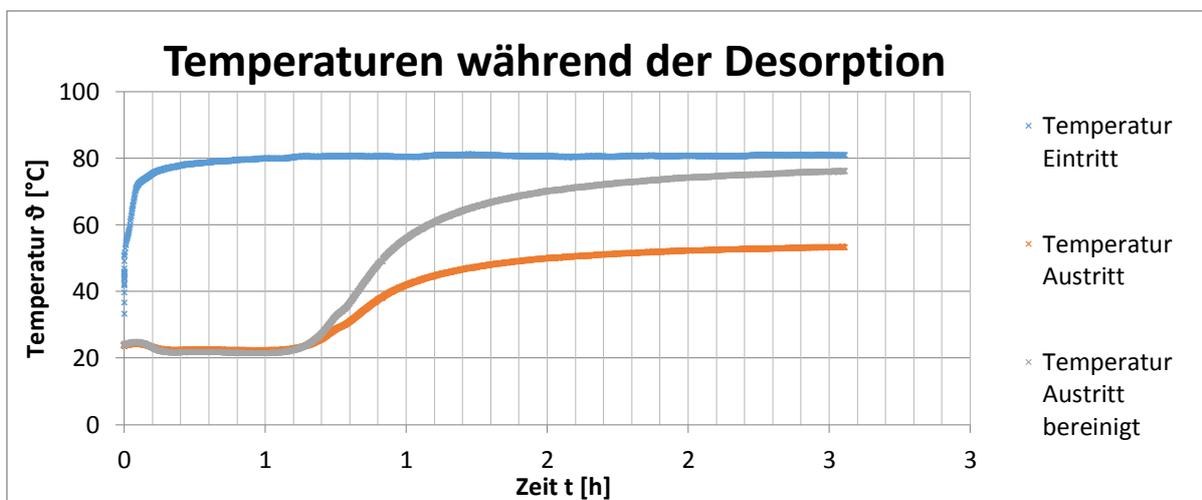


Abbildung 77: Temperaturen des zweiten Versuchs für die Desorption



Abbildung 78: Relative Feuchte des zweiten Versuchs für die Desorption

### A 3.2 Rechenwerte des zweiten Versuchs

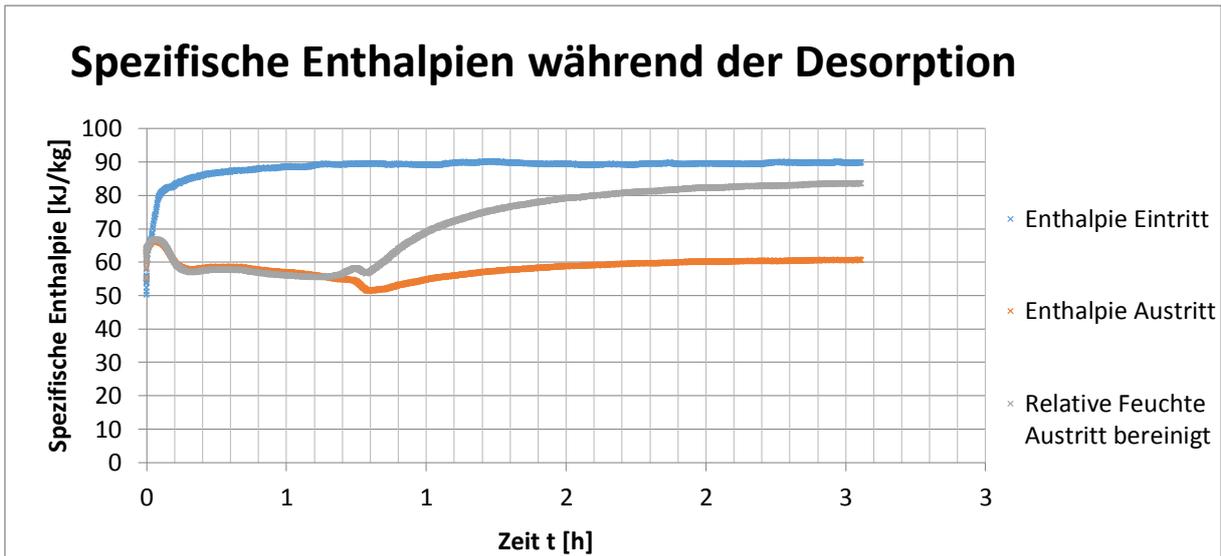


Abbildung 79: Spez. Enthalpie des zweiten Versuchs für die Desorption

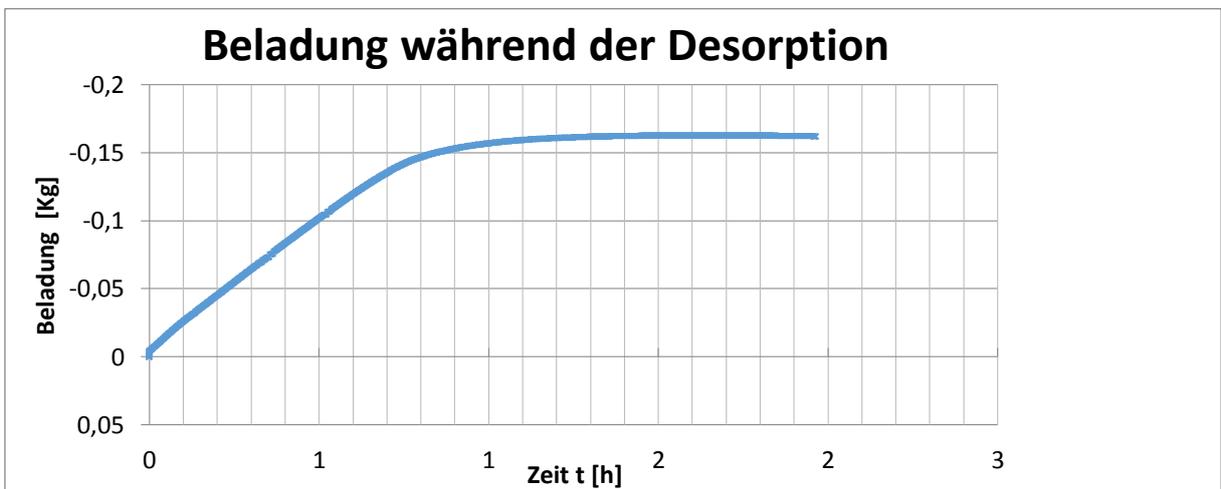


Abbildung 80: Beladung des zweiten Versuchs für die Desorption

### A 3.3 Messwerte des dritten Versuchs

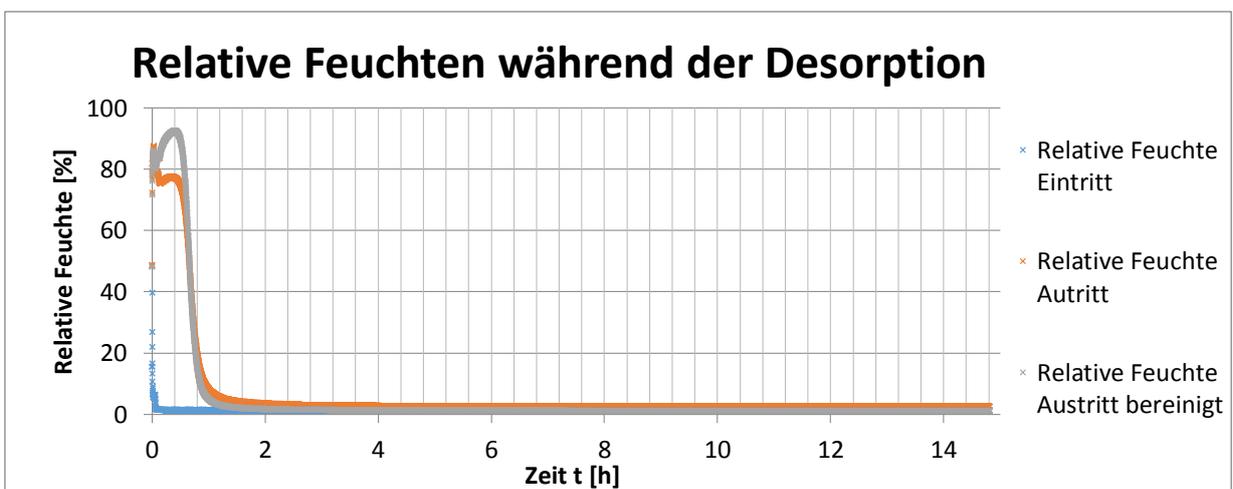


Abbildung 81: Temperatur des dritten Versuchs für die Desorption

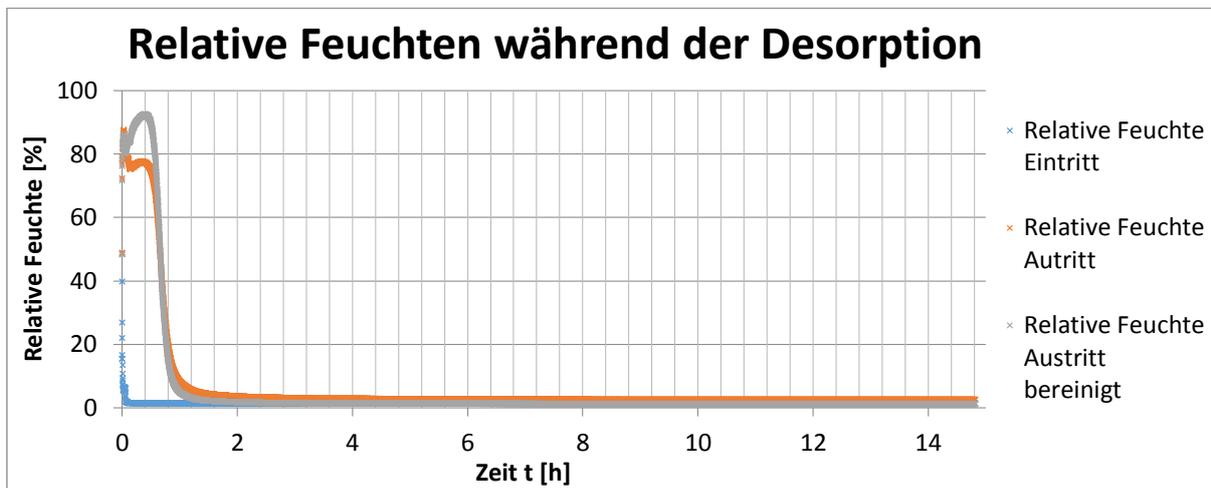


Abbildung 82: Relative Feuchte des dritten Versuchs für die Desorption

#### A 3.4 Rechenwerte des dritten Versuchs

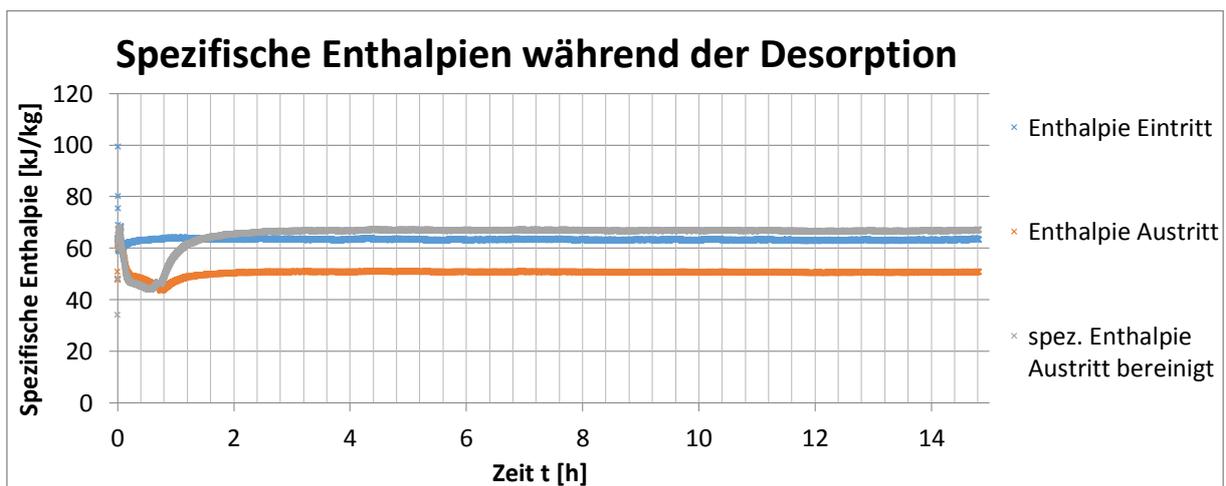


Abbildung 83: Spez. Enthalpie des dritten Versuchs für die Desorption

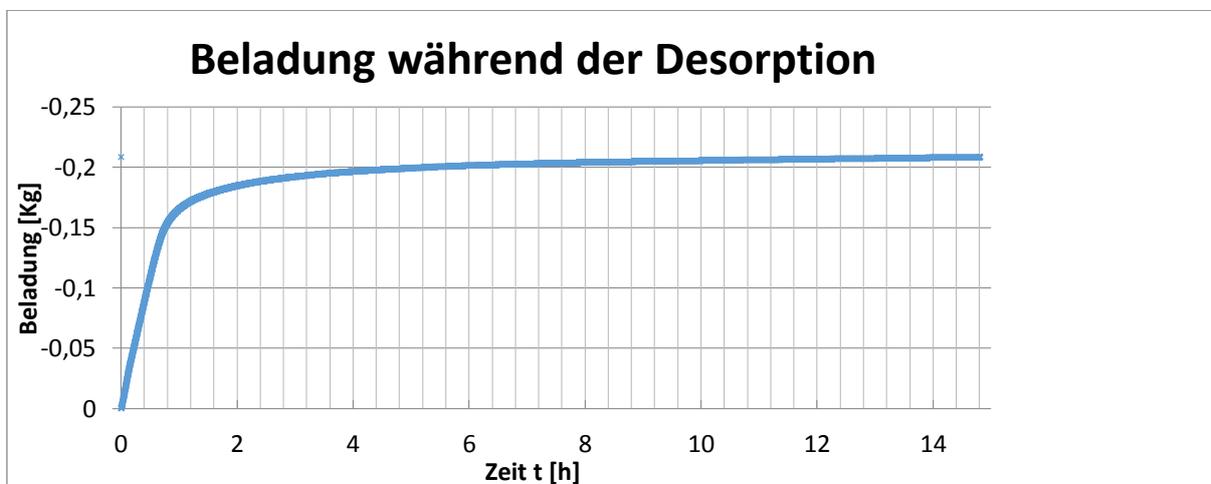


Abbildung 84: Beladung des dritten Versuchs für die Desorption

### A 3.5 Messwerte des vierten Versuchs

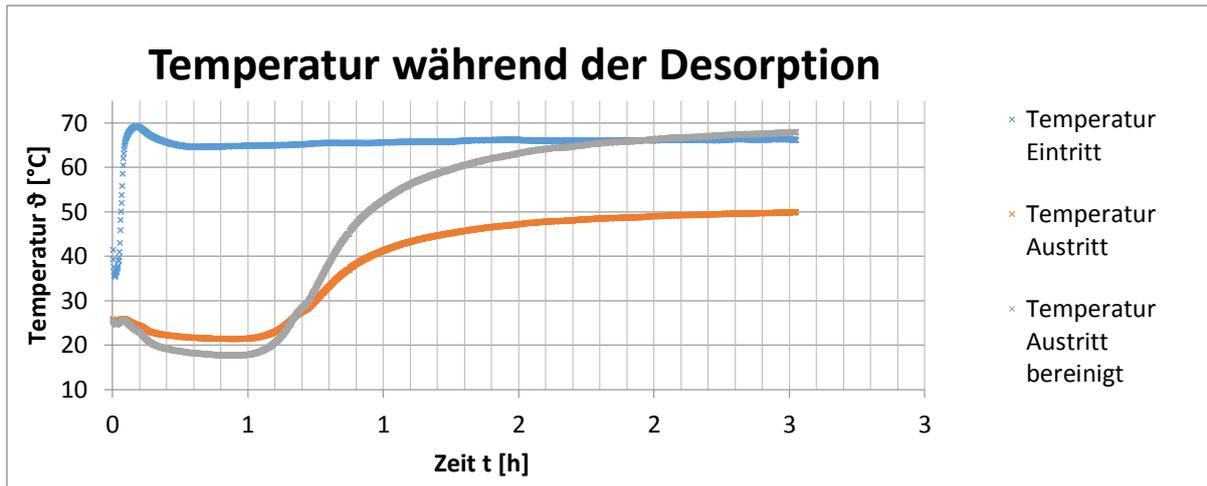


Abbildung 85: Temperatur des vierten Versuchs für die Desorption

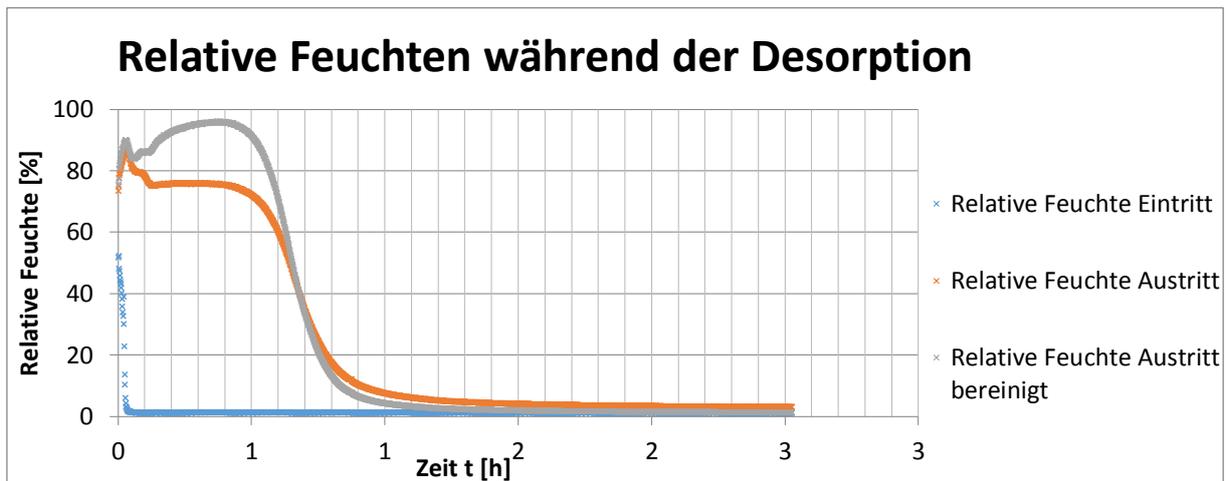


Abbildung 86: Relative Feuchte des vierten Versuchs für die Desorption

### A 3.6 Rechenwerte des vierten Versuchs

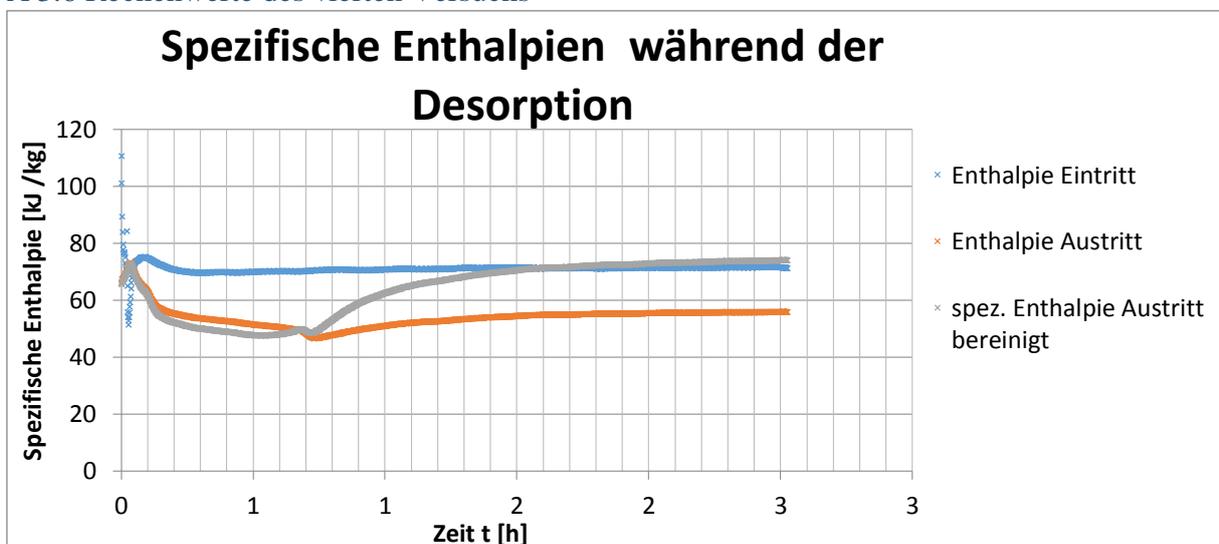


Abbildung 87: Spez. Enthalpie des vierten Versuchs für die Desorption

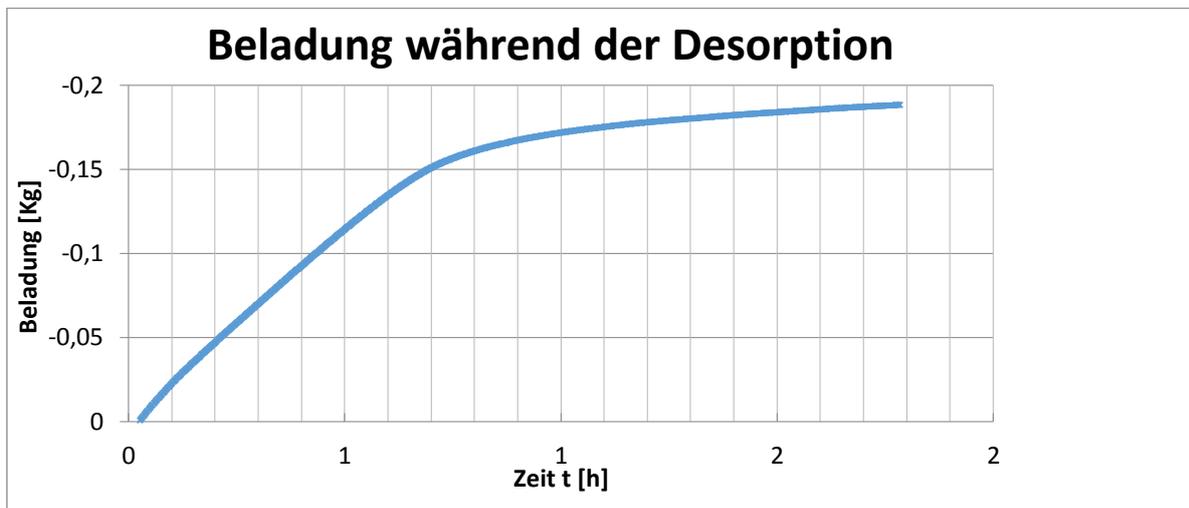
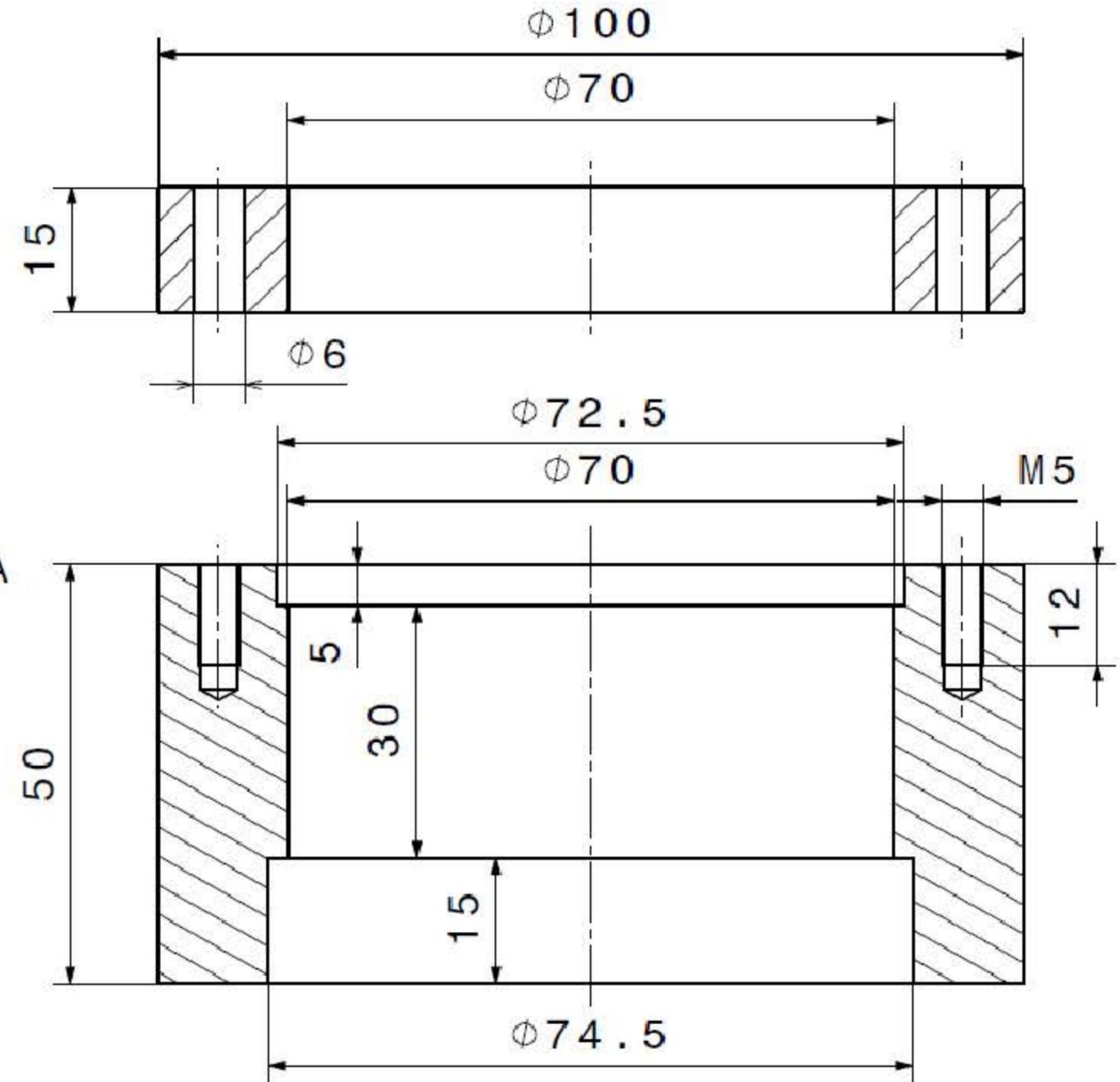
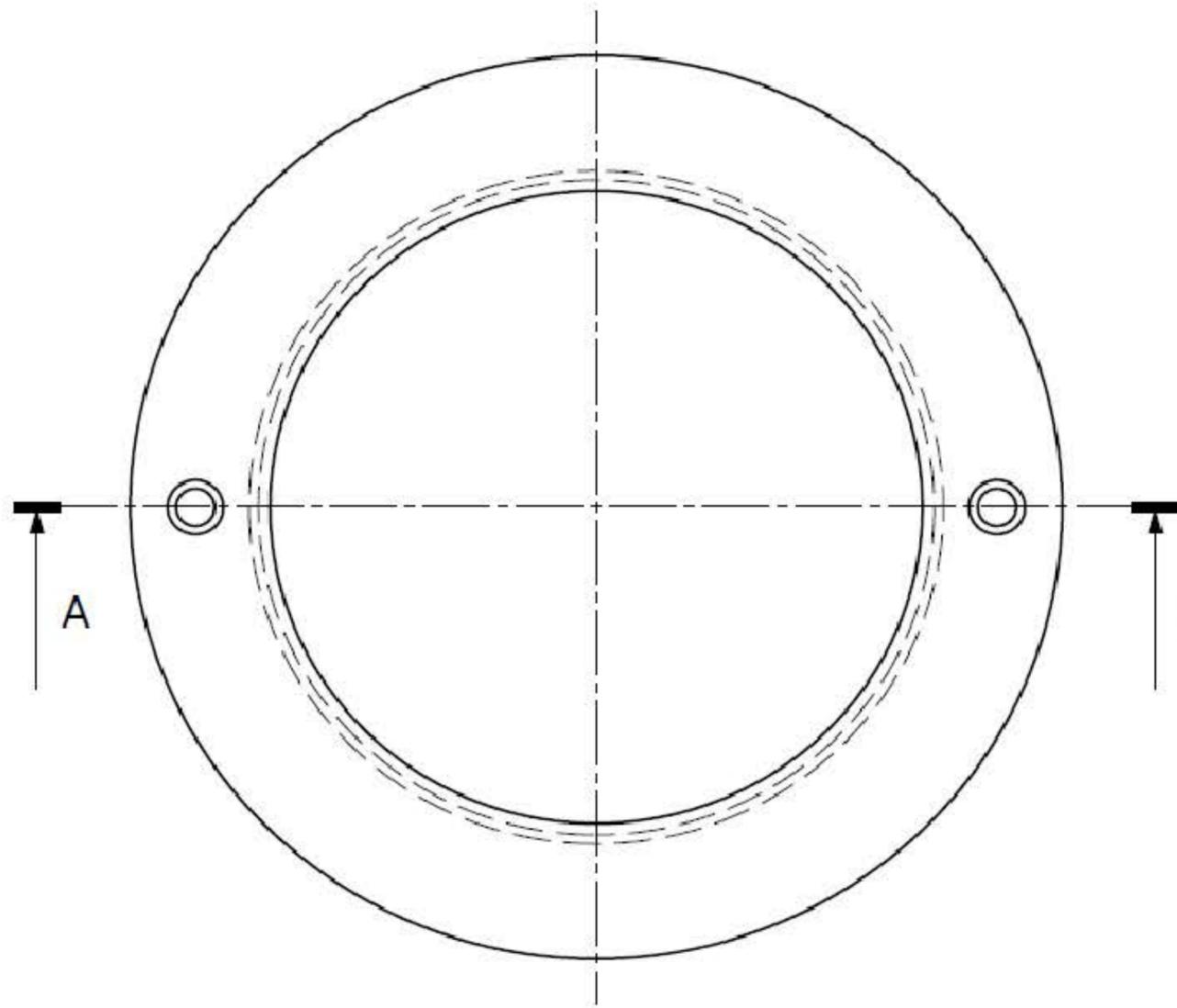


Abbildung 88: Beladung des vierten Versuchs für die Desorption

## A 3 Technische Zeichnungen

### A 3.1 Adapter

# Schnittansicht A-A

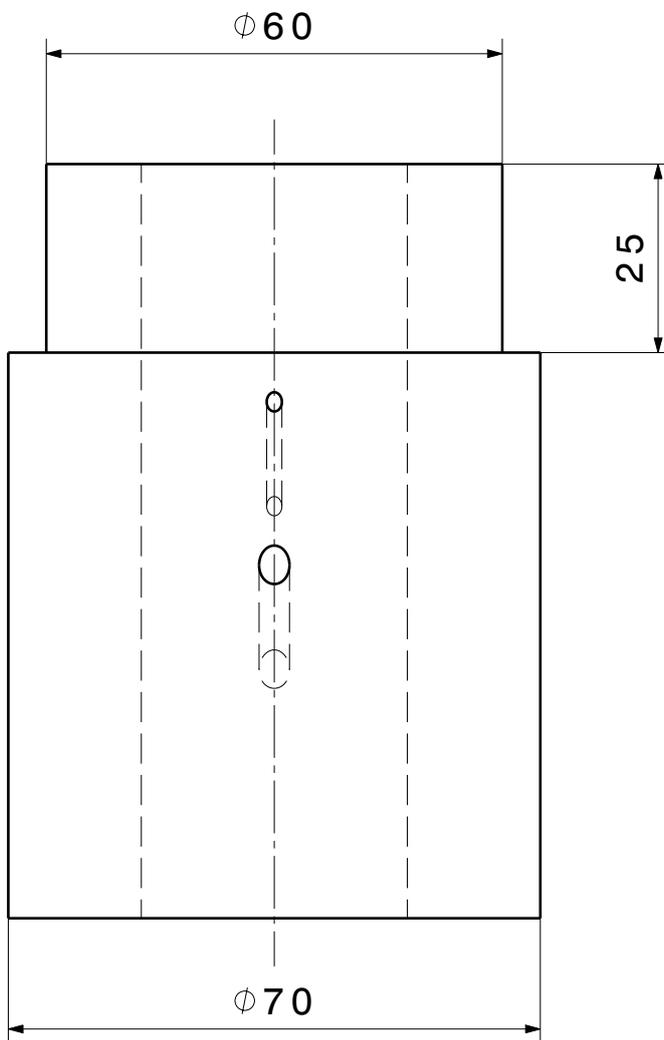
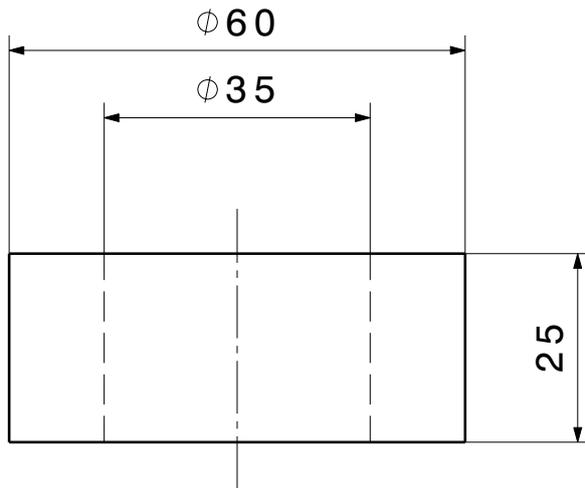


Maßstab 1:1

Allgemeintoleranzen nach ISO 2768-m

Verantwortl. Abtlg IEA	Technische Referenz BA	Erstellt durch Malte Hoff	Genehmigt von Nestorius Wiegandt	
 <b>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg</b> Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Fertigungszeichnung		Dokumentenstatus freigegeben
		Titel, Zusätzlicher Titel <b>Adapter</b>		2105006_003
		Änd. A	Ausgabedatum 25.07.2015	Spr. de

## A 3.2 Anschluss für Ventile



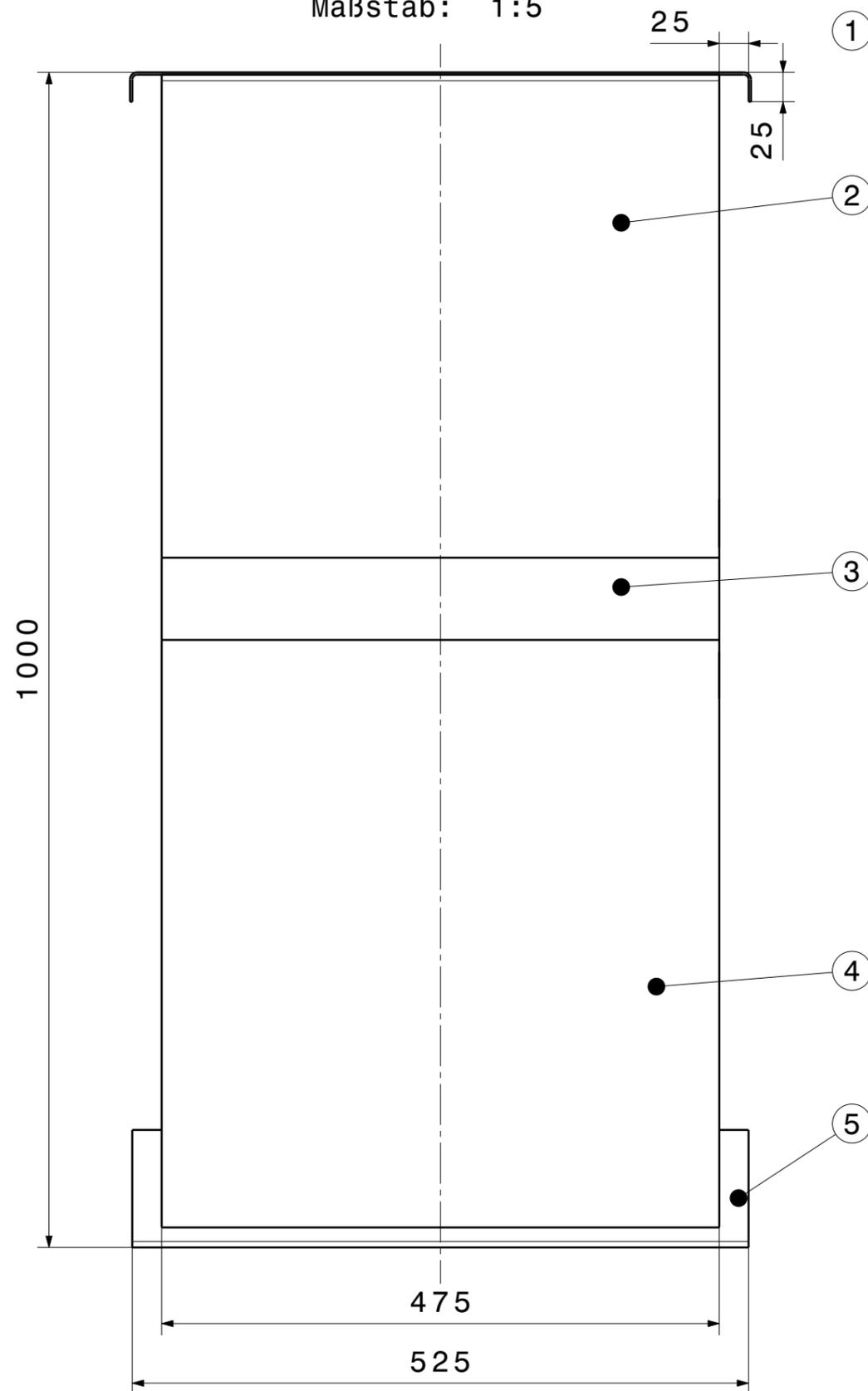
Allgemeintoleranzen  
nach ISO 2658-m

Maßstab 1:1

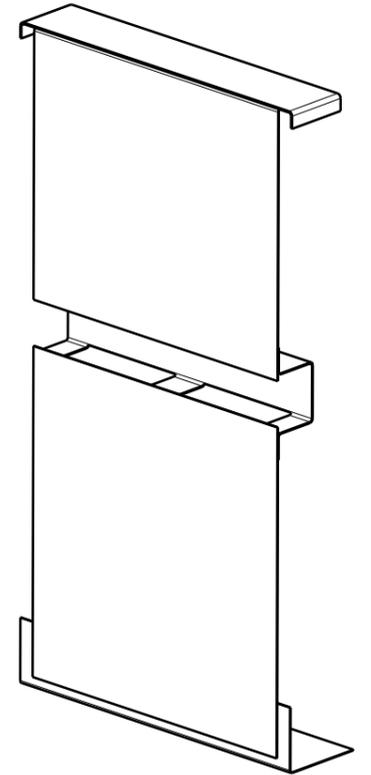
Verantwortl. Abtlg. IEA	Technische Referenz BA	Erstellt durch Malte Hoff	Genehmigt von Nestorius Wiegandt	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Fertigungszeichnung		Dokumentenstatus freigegeben
		Titel, Zusätzlicher Titel Anschluss für Ventile		2105006_002
		Änd. A	Ausgabedatum 08.07.2015	Spr. de

### A 3.3 Halterung

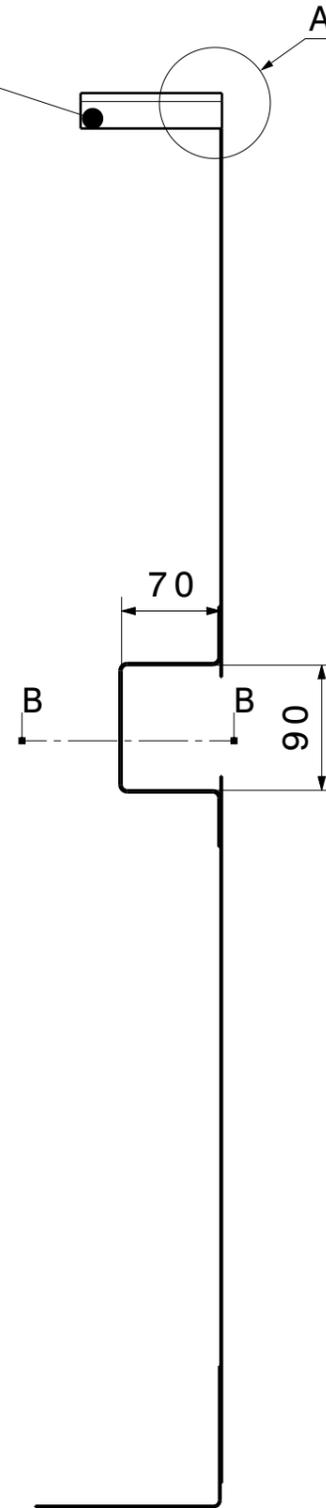
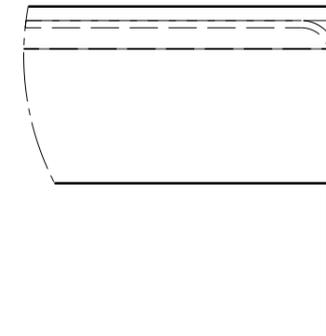
Vorderansicht  
Maßstab: 1:5



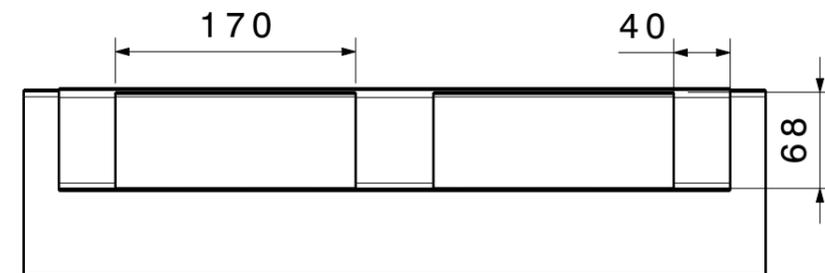
Isometrische Ansicht  
Maßstab: 1:10



Detail A  
Maßstab: 1:1



Schnittansicht B-B  
Maßstab: 1:5



Hierzu gehört Stückliste 2105006\_004

Bauteile gefügt durch  
Popnieten  $\varnothing 4$

Verantwortl. Abtlig. IEA	Technische Referenz BA	Erstellt durch Malte Hoff	Genehmigt von Nestorius Wiegandt
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Baugruppenzeichnung	Dokumentenstatus freigegeben
		Titel, Zusätzlicher Titel <b>Halterung</b>	
Änd. A	Ausgabedatum 15.08.2015	Spr. de	Blatt 01/01

Stückliste 2105006_004				
Pos.	Menge	Einheit	Bauteil	Beschreibung
1	1	Stück	DIN 24041 575x1,5x400	Stahl verzinkt Lochblech, Stärke 1,5 mm
2	1	Stück	DIN 24041 425x1x350	Stahl verzinkt Lochblech, Stärke 1 mm
3	1	Stück	DIN 24041 425x1x320	Stahl verzinkt Lochblech, Stärke 1,5 mm
4	1	Stück	DIN 24041 475x1x500	Stahl verzinkt Lochblech, Stärke 1 mm
5	1	Stück	DIN 24041 525x1x650	Stahl verzinkt Lochblech, Stärke 1 mm
6	4000	mm	DIN 24041 DIN 7337	Kantenschutzprofil 11021 PVC, Klemmbereich 1-2 mm
7	20	Stück	DIN 16941	Popnieten $\varnothing$ 4mm

## A 4 Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

### Erklärung zur selbständigen 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 selbständig 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.

#### Erklärung zur selbständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Hoff

Vorname: Jörn Malte

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Untersuchung der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge eines thermochemischen Speichers

ohne fremde Hilfe selbständig 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.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

23.09.2015

Datum

Malte Hoff

Unterschrift im Original