



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Fabio Cimino

Untersuchung und Optimierung der Wärmeverluste eines thermochemischen Speichers

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Fabio Cimino

**Untersuchung und Optimierung der
Wärmeverluste eines thermochemischen
Speichers**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. H. Frischgesell
Zweitprüfer/in : M.Eng. Nestorius Wiegandt

Abgabedatum: 09.06.2016

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Fabio Cimino

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung und Optimierung der Wärmeverluste eines thermochemischen Speichers

Stichworte

Wärmeverluste; Wärmeströme; Versuchsstand; Rechenwerte; Messwerte; Zeolith; thermochemischer Speicher

Kurzzusammenfassung

Bei einem mit Zeolith gefüllten thermochemischen Speicher wurden in einer vorhergehenden Arbeit erhebliche Wärmeverluste identifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Versuchsanlage beschrieben und die Verluste werden mathematisch untersucht. Es wird eine Möglichkeit zur Isolierung der Versuchsanlage berechnet und konstruktiv umgesetzt. Anschließend wird anhand von mehreren Messungen der Einfluss der umgesetzten Isolierung in der Praxis untersucht.

Name of Student

Title of the paper

Fabio Cimino

Keywords

heat loss; heat flow; test station; calculated values; measured data; zeolite; adsorption; desorption; thermochemical accumulator

Abstract

In a previous work about the characteristics of a thermochemical accumulator significant heat losses were identified. In this study the test facility together with its measurement devices are described and the heat losses are analyzed mathematically. An option to insulate the test facility is calculated and implemented into the original accumulator. The influence of the installed insulation is then analyzed based on several measurements.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Verwendete Formelzeichen/ Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
2 Einführung in das Wissensgebiet	2
2.1 Allgemeine Eigenschaften von Zeolithen.....	2
2.1.1 Grundlagen der Adsorption	2
2.1.2 Grundlagen der Desorption	3
2.2 Grundlagen feuchter Luft	4
2.3 Grundlagen der Wärmeübertragung.....	6
2.3.1 Wärmeleitung	7
2.3.2 Strahlung	8
3 Aufbau und Untersuchung des ursprünglichen Versuchsstandes.....	9
3.1 Aufbau des Versuchsstandes	9
3.2 Verarbeitung der Messdaten.....	12
3.3 Versuchsdurchführung.....	12
3.4 Korrektur der Messwerte unter Berücksichtigung der Wärmeübergänge	16
4 Berechnung der Wärmeübergänge und -ströme im Betrieb.....	19
4.1 Ohne Isolierung	19
4.2 Mit Isolierung	24
4.3 Bewertung der Ergebnisse und konstruktive Umsetzung der ausgewählten Isolierung	25
5 Versuchsdurchführung nach Umsetzung Konstruktiver Maßnahmen	30
5.1.1 Adsorption.....	31
5.1.2 Desorption.....	32
6 Auswertung.....	33
6.1 Vergleich der bleibenden Differenzen am Ende der Versuche	33
6.1.1 Adsorption.....	33
6.1.2 Desorption.....	35
6.2 Betrachtung der Wärmeströme.....	36
6.3 Korrektur der Messreihen.....	39
7 Fazit	42
7.1 Zusammenfassung.....	42
7.2 Ausblick.....	43
Literaturverzeichnis	45

A Anhang	46
A 1 Messwerte der Adsorption.....	46
A 1.1 erster Versuch (31.05.2016).....	46
A 1.2 dritter Versuch (02.06.2016).....	47
A 2 Messwerte Desorption.....	48
A 2.1 erster Versuch (31.05.2016).....	48
A 2.2 dritter Versuch (03.06.2016).....	49
A 3 Technische Zeichnungen.....	50
A 3.1 oberer Deckel	50
A 3.2 unterer Deckel.....	50
A 3.3 Acrylglasisolierung.....	51
A 3.4 Halteplatte.....	52
A 3.5 Anschlussadapter	54
A 3.6 Explosionsansicht	54
A 4 Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit.....	56

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1 EIN- UND AUSTRITTLUFTTEMPERATUREN BEI ADSORPTIONSVORGÄNGEN FÜR ZEOLITH (HAUER, 2002 S. 52).....	3
ABBILDUNG 2.2 TEMPERATURVERLÄUFE DER EIN- UND AUSTRETENDEN STOFFSTRÖME BEI DER DESORPTION (HAUER, 2002 S. 52).....	4
ABBILDUNG 2.3 WÄRMELEITUNG (VON BÖCKH, 2015 S. 4).....	7
ABBILDUNG 2.4 WÄRMEÜBERTRAGUNG DURCH STRAHLUNG (VON BÖCKH, 2015 S. 4)	8
ABBILDUNG 3.1 ZUSTAND DES VERSUCHSSTANDES ZU BEGINN DER BACHELORARBEIT (HOFF 2015, S.27).....	9
ABBILDUNG 3.2 VERFAHRENSFLIEßBILD (HOFF, 2015 S. 28).....	10
ABBILDUNG 3.3 OFFENER ADSORPTIONS-/DESORPTIONSPROZESS (HAUER, 2002 S. 5).....	11
ABBILDUNG 3.4 GESCHLOSSENER ADSORPTION-/DESORPTIONSPROZESS (HAUER, 2002 S. 6)	11
ABBILDUNG 3.5 OBERFLÄCHENTEMPATUREN DES WÄRMESPEICHERS BEI MAXIMALEM TEMPERATURHUB	12
ABBILDUNG 3.6 BLEIBENDE TEMPERATURDIFFERENZ AM ENDE VON EINEM ADSORPTIONSVORGANG	13
ABBILDUNG 3.7 BLEIBENDE DIFFERENZ DER RELATIVEN LUFTFEUCHTIGKEIT AM ENDE EINES ADSORPTIONSVORGANGES .	13
ABBILDUNG 3.8 OBERFLÄCHENTEMPATUREN DES WÄRMESPEICHERS NACH SÄTTIGUNG DES ZEOLITHSPEICHERS.....	14
ABBILDUNG 3.9 BLEIBENDE TEMPERATURDIFFERENZ AM ENDE DES DESORPTIONSVORGANGES	14
ABBILDUNG 3.10 BLEIBENDE DIFFERENZ DER RELATIVEN LUFTFEUCHTIGKEIT AM ENDE DER DESORPTION	15
ABBILDUNG 3.11 BILD DER WÄRMEBILDKAMERA AM VERSUCHSENDE MIT DREI TEMPERATURMESSPUNKTEN	15
ABBILDUNG 3.12 DIFFERENZ DER SPEZ. ENTHALPIE ÜBER DIE DIFFERENZ DER UMGEBUNGSTEMPERATUR ZUR AUSTRITTSTEMPERATUR (HOFF, 2015 S. 53).....	16
ABBILDUNG 3.13 BEREINIGTER TEMPERATURVERLAUF WÄHREND DER ADSORPTION	17
ABBILDUNG 3.14 BEREINIGTER VERLAUF DER RELATIVEN FEUCHTEN WÄHREND DER ADSORPTION.....	17
ABBILDUNG 3.15 BEREINIGTE TEMPERATURVERLÄUFE WÄHREND DER DESORPTION	18
ABBILDUNG 3.16 BEREINIGTE VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTIGKEITEN WÄHREND DER DESORPTION.....	18
ABBILDUNG 4.1 WÄRMELEITUNG IN EINEM HOHLZYLINDER (VON BÖCKH, 2015 S. 27)	19
ABBILDUNG 4.2 WÄRMELEITUNG IN EINEM HOHLZYLINDER MIT MEHREREN SCHICHTEN (VON BÖCKH, 2015 S. 29)	24
ABBILDUNG 4.3 O-RING NUT DER KONSTRUKTION IM SCHNITT	27
ABBILDUNG 4.4 SCHNITTDARSTELLUNG DES ZEOLITHWÄRMESPEICHERS NACH DEM UMBAU	28
ABBILDUNG 4.5 LINKS: URSPRÜNGLICHER AUFBAU DES VERSUCHSSTANDES	29
ABBILDUNG 4.6 RECHTS: ZUSTAND DES VERSUCHSSTANDES NACH UMBAU.....	29
ABBILDUNG 5.1 ZEOLITHWÄRMESPEICHER MIT PLEXIGLASSISOLIERUNG	30
ABBILDUNG 5.2 TEMPERATURVERLÄUFE WÄHREND DER ADSORPTION; MIT ISOLIERUNG	31
ABBILDUNG 5.3 VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTIGKEITEN WÄHREND DER ADSORPTION; MIT ISOLIERUNG.....	31
ABBILDUNG 5.4 (LINKS) WÄRMEBILD DES MAXIMALEN TEMPERATURHUBES WÄHREND DER ADSORPTION.....	31
ABBILDUNG 5.5 (RECHTS) WÄRMEBILD NACH BEENDIGUNG DES ADSORPTIONSVORGANGES.....	31
ABBILDUNG 5.6 TEMPERATURVERLÄUFE WÄHREND DER DESORPTION; MIT ISOLIERUNG	32
ABBILDUNG 5.7 VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTIGKEITEN WÄHREND DER DESORPTION; MIT ISOLIERUNG	32
ABBILDUNG 5.8 WÄRMEBILD DES MAXIMALEN TEMPERATURHUBES WÄHREND DER DESORPTION	33
ABBILDUNG 5.9 WÄRMEBILD DES ABGESCHLOSSENEN DESORPTIONSVORGANGES	33
ABBILDUNG 6.1 GEGENÜBERSTELLUNG DER TEMPERATURDIFFERENZEN AM ENDE DER ADSORPTION VOR UND NACH DEM UMBAU.....	34
ABBILDUNG 6.2 GEGENÜBERSTELLUNG DER DIFFERENZEN DER REL. FEUCHTE AM ENDE DER ADSORPTION VOR UND NACH DEM UMBAU	34
ABBILDUNG 6.3 GEGENÜBERSTELLUNG DER SPEZ. ENTHALPIEDIFFERENZEN AM ENDE DER ADSORPTION VOR UND NACH DEM UMBAU.....	34
ABBILDUNG 6.4 GEGENÜBERSTELLUNG DER TEMPERATURDIFFERENZEN AM ENDE DER DESORPTION VOR UND NACH DEM UMBAU.....	35
ABBILDUNG 6.5 GEGENÜBERSTELLUNG DER DIFFERENZEN DER REL. FEUCHTE AM ENDE DER DESORPTION VOR UND NACH DEM UMBAU	35
ABBILDUNG 6.6 GEGENÜBERSTELLUNG DER SPEZ. ENTHALPIEDIFFERENZEN AM ENDE DER DESORPTION VOR UND NACH DEM UMBAU.....	36

ABBILDUNG 6.7 VERGLEICH DER WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN NACH DER DESORPTION	38
ABBILDUNG 6.8 VERGLEICH DER WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN NACH DER ADSORPTION	38
ABBILDUNG 6.9 DIFFERENZ DER SPEZ. ENTHALPIE ÜBER DIFFERENZ DER UMGEBUNGSTEMPERATUR ZUR AUSTRITTSTEMPERATUR	39
ABBILDUNG 6.10 BEREINIGTE AUSTRITTSTEMPERATUREN WÄHREND DER ADSORPTION	40
ABBILDUNG 6.11 BEREINIGTE RELATIVE FEUCHTEN AM AUSTRITT WÄHREND DER ADSORPTION	40
ABBILDUNG 6.12 BEREINIGTE AUSTRITTSTEMPERATUREN WÄHREND DER DESORPTION	40
ABBILDUNG 6.13 BEREINIGTE RELATIVE FEUCHTEN AM AUSTRITT WÄHREND DER DESORPTION	40
ABBILDUNG A.1 BEREINIGTE TEMPERATUREN AM AUSTRITT WÄHREND DER ADSORPTION (31.05.2016)	46
ABBILDUNG A.2 BEREINIGTE RELATIVE FEUCHTEN AM AUSTRITT WÄHREND DER ADSORPTION (31.05.2016)	46
ABBILDUNG A.3 BEREINIGTE TEMPERATUREN AM AUSTRITT WÄHREND DER ADSORPTION (02.06.2016)	47
ABBILDUNG A.4 BEREINIGTE RELATIVE FEUCHTEN AM AUSTRITT WÄHREND DER ADSORPTION (02.06.2016)	47
ABBILDUNG A.5 BEREINIGTE TEMPERATUREN AM AUSTRITT WÄHREND DER DESORPTION (31.05.2016)	48
ABBILDUNG A.6 BEREINIGTE RELATIVE FEUCHTEN AM AUSTRITT WÄHREND DER DESORPTION (31.05.2016)	48
ABBILDUNG A.7 BEREINIGTE TEMPERATUREN AM AUSTRITT WÄHREND DER DESORPTION (03.06.2016)	49
ABBILDUNG A.8 BEREINIGTE RELATIVE FEUCHTEN AM AUSTRITT WÄHREND DER DESORPTION (03.06.2016)	49

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1 AM VERSUCHSSTAND AUFGENOMMENE MESSWERTE	4
TABELLE 4.1 AUFGENOMMENE MESSWERTE AM ENDE DES DESORPTIONSVORGANGES.....	19
TABELLE 4.2 WÄRMEÜBERTRAGUNGSKOEFFIZIENTEN UND DURCHMESSER DER HOHLZYLINDERSCHICHTEN	25
TABELLE 4.3 TEMPERATURBEREICHE DER O-RINGMATERIALIEN BEI LUFT BZW. WASSER ALS MEDIUM. (HUG INDUSTRIE TECHNIK UND ARBEITSSICHERHEIT GMBH)	26
TABELLE 4.4 EINBAURÄUME FÜR O-RINGE (C.OTTO GEHRCKENS GMBH & Co. KG)	27
TABELLE 4.5 LEGENDE ZU ABBILDUNG 16	28
TABELLE 6.1 VERGLEICH DER BLEIBENDEN WERTEDIFFERENZEN AM ENDE DER ADSORPTION	33
TABELLE 6.2 VERGLEICH DER BLEIBENDEN WERTEDIFFERENZEN AM ENDE DER ADSORPTION	35
TABELLE 6.3 WÄRMEBETRACHTUNG (HOFF, 2015 S. 52).....	36
TABELLE 6.4 WÄRMEBETRACHTUNG MIT ISOLIERUNG	37
TABELLE 6.5 VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN WERTE FÜR Q UND K VOR UND NACH DEM UMBAU DER VERSUCHSANLAGE.....	37

Verwendete Formelzeichen/ Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
L	m	Länge
T	K	Temperatur in Kelvin
ϑ	°C	Temperatur in Grad Celsius
h	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Spezifische Enthalpie
H	kJ	Enthalpie der feuchten Luft
φ	%	Relative Feuchte
w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Strömungsgeschwindigkeit
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
k	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Wärmedurchgangswiderstand
α	---	Wärmeübergangskoeffizient
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	Wärmeübertragungskoeffizient
Re	---	Reynoldszahl
Nu	---	Nußelt-Zahl
Pr	---	Prandtl-Zahl
V	m^3	Volumen
ψ	---	Hohlraumanteil
d	m	Durchmesser
ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Kinematische Viskosität
μ	$\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}$	Dynamische Viskosität
\dot{Q}	W	Wärmestrom
ρ_w	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$	Absolute Feuchte
X	$\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_l}$	Wasserdampfbeladung
ρ_{1+X}	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte der feuchten Luft
h_{1+X}	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Spezifische Enthalpie der feuchten Luft

1 Einleitung

Seit einigen Jahren werden bereits die thermochemischen Eigenschaften der Stoffgruppe der Zeolithe in Haushaltsmaschinen wie z.B. der Spülmaschine eingesetzt. Hierbei erfüllen die zumeist synthetisch hergestellten Mineralien die Aufgabe am Ende des Spülvorganges die in der Maschine befindliche Restfeuchtigkeit aufzunehmen und in warme, trockene Luft umzuwandeln. (Gebt ihnen Kügelchen , 2010) Der hier erwähnte Vorgang nennt sich "Adsorption". Neben der Adsorption ist das Mineral zusätzlich noch zum genau umgekehrten Vorgang fähig. Bei der sogenannten "Desorption" werden die mit Feuchtigkeit bereits gesättigten Zeolithmineralien mit warmer, trockener Luft durchströmt, sodass am Austritt kühle, feuchte Luft ausströmt. Detailliertere Informationen hierzu sind im Kapitel 2 "Einführung in das Wissensgebiet" zu finden.

Die soeben angedeuteten Fähigkeiten des Zeolithes machen diese Mineralien nicht nur für Haushaltsgeräte interessant. Als thermochemischer Wärmespeicher können Zeolithe die z.B. bei einer Industrieanlage produzierte Wärme effektiv über einen langen Zeitraum speichern und bei Bedarf nahezu verlustfrei wieder abgeben, um diese wieder in den Prozess einzuspeisen. Dies führt zu einer wesentlich effizienteren Energieausnutzung als bei konventionellen Wärmespeichern. Diese verlieren über die Zeit Wärme an die Umgebung, sodass ein langfristiges speichern der Wärme nicht möglich ist.

Im Rahmen einer Bachelorthesis im Institut für erneuerbare Energien an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg wurden zuletzt die physikalischen und chemischen Eigenschaften anhand von durchgeführten Versuchen an einem vorhandenen thermochemischen Speicher beschrieben. Hierbei fiel auf, dass die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Temperatur im Inneren des Wärmespeichers hat und somit auch die Ergebnisse für die relative Luftfeuchtigkeit am Austritt verfälscht. (Hoff, 2015 S. 51)

Ziel dieser Arbeit ist es die auftretenden Wärmeströme theoretisch und praktisch zu untersuchen und diese durch konstruktive Maßnahmen an der Versuchsanlage zu reduzieren.

2 Einführung in das Wissensgebiet

2.1 Allgemeine Eigenschaften von Zeolithen

Zeolithe sind sowohl natürlich vorkommende als auch künstlich herstellbare kristalline, hydratisierte Alumosilikate, welche eine extrem hohe innere Oberfläche von bis zu $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ des Minerals aufweisen. Diese Eigenschaft führt dazu, dass Zeolithe als sehr

hydrophil gelten, wobei lediglich synthetisch hergestellte Zeolithe den Ansprüchen der Industrie genügen. (Hauer, 2002 S. 9 & 11)

Von besonderem Interesse ist hierbei, dass die Zeolithe im Falle der Aufnahme von Feuchtigkeit (Adsorption) Wärme erzeugen und bei der Trocknung mit warmer Luft (Desorption) feuchte, kühle Luft generieren.

2.1.1 Grundlagen der Adsorption

Der Begriff der Adsorption beschreibt die Fähigkeit eines Festkörpers (Adsorbens), Flüssigkeiten oder Gase auf dessen Oberfläche zu binden. Entscheidend hierfür ist die Porengröße des Adsorbens. Diese wirkt wie ein Sieb, welches lediglich Moleküle kleinerer Größe hindurch lässt und so von anderen Stoffen trennt. (Hauer, 2002 S. 17)

Durch auf molekularer Ebene wirkende Kräfte wie Van-der-Waals-Dispersionskräfte und elektrostatische Wechselwirkungen wird exotherm Wärme innerhalb der Grenzschicht freigesetzt und an die Umgebung abgegeben.

Als Maß für die abgegebene Wärme kann hier die differentielle Adsorptionseenthalpie (ΔH_d) nach Hauer (2002, S.29) herangezogen werden:

$$\Delta H_d = L + \Delta F - T\alpha'W \left. \frac{\partial \Delta F}{\partial W} \right|_T \quad (1)$$

Wobei L die Verdampfungswärme, ΔF die freie Energie darstellt während der Term $T\alpha'W \left. \frac{\partial \Delta F}{\partial W} \right|_T$ laut Hauer für eine festere Bindung der adsorbierten Phase verantwortlich ist.

Folgende Abbildung stellt die Temperaturverläufe der eintretenden und austretenden Stoffströme über die Zeit eines Adsorptionsvorganges dar.

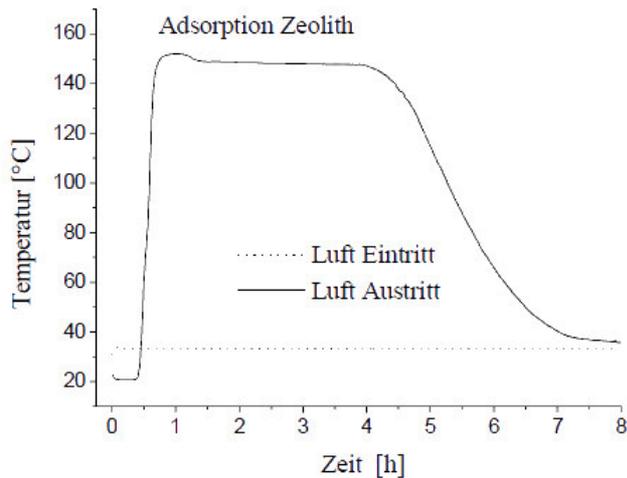


Abbildung 2.1 Ein- und Austrittslufttemperaturen bei Adsorptionsvorgängen für Zeolith (Hauer, 2002 S. 52)

Hierbei ist zu erkennen wie die Lufttemperatur am Eintritt konstant bleibt während am Austritt der Luftstrom sehr schnell auf ein Temperaturplateau erwärmt wird. Dieses Plateau stellt den maximalen Temperaturhub mit

$$\Delta T = T_{aus} - T_{ein} \quad (2)$$

dar.

Nach ca. 4,5 Stunden reduziert sich das Adsorptionsvermögen durch die eintretende Sättigung des Adsorbens. Zu erkennen ist dies an der Reduzierung des Temperaturhubes.

2.1.2 Grundlagen der Desorption

Während bei der Adsorption durch Anreicherung des Adsorbens per Zuführung von in diesem Falle feuchter Luft bei Raumtemperatur exotherm Wärme erzeugt wird, kehrt sich der Vorgang bei der Desorption ins Gegenteil um. Der Ausgangszustand des Adsorbens ist hierbei bereits durch Feuchtigkeit gesättigt. Um die Feuchtigkeit wieder aus dem porösen Medium zu entfernen ist nun trockene, warme Luft von Nöten. Als Resultat dieser endothermen Reaktion erhält man kühle, feuchte Luft am Austritt.

Folgende Abbildung stellt die Temperaturverläufe der eintretenden und austretenden Stoffströme über die Zeit eines Desorptionsvorganges dar.

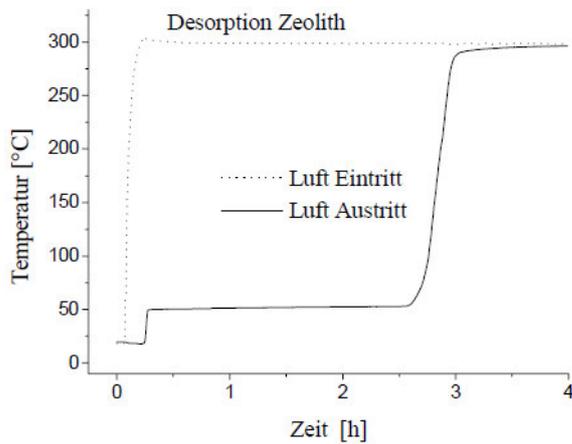


Abbildung 2.2 Temperaturverläufe der ein- und austretenden Stoffströme bei der Desorption (Hauer, 2002 S. 52)

In Abbildung 2.2 ist erkennbar wie der eintretende trockene Luftstrom auf einem konstant hohem Temperaturniveau gehalten wird, während der austretende gekühlte Luftstrom zunächst konstant bei ca. 50°C bleibt. Nach ungefähr 2,5 Stunden ist die meiste Feuchtigkeit bereits aus dem Zeolith desorbiert. Verdeutlicht wird dies durch die schnelle Temperaturzunahme der Luft am Austritt der Anlage. Auch hier ist für diese Arbeit das Ende des Versuches von großer Bedeutung. Nach vier Stunden hat sich die Luft am Austritt der Luft am Eintritt angeglichen.

2.2 Grundlagen feuchter Luft

Die im Computerprogramm „Labview“ durchgeführten Berechnungen der feuchten Luft werden im Folgenden erläutert.

Tabelle 2.1 Am Versuchsstand aufgenommene Messwerte

Gegebene Messwerte vom Versuchsstand	
Eintritt	Austritt
Temperatur ϑ [°C]	Temperatur ϑ [°C]
relative Feuchte φ [%]	relative Feuchte φ [%]
---	Strömungsgeschwindigkeit w [$\frac{m}{s}$]

Der Partialdruck des Wasserdampfes p_w wird nach folgender Formel berechnet:

$$p_w = \frac{\varphi}{100} \cdot p_s \cdot 10^5 \quad (3)$$

p_s stellt hierbei den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck dar und wird mittels linearer Interpolation aus der Dampftafel entnommen.

Die absolute Feuchte ρ_w [$\frac{g}{m^3}$] ergibt sich mit aus:

$$\rho_w = \frac{p_w \cdot 1000}{R_w \cdot T} \quad (4)$$

$$R_w = 461,5 \frac{J}{kg K}$$

Für die Wasserdampfbeladung X [kg/kg] gilt:

$$X = \frac{m_w}{m_l} = 0,622 \cdot \frac{p_s}{\frac{p}{\varphi} - p_s} \quad (5)$$

m_w = Masse des Wassers

m_l = Masse der trockenen Luft

Die Dichte der feuchten Luft wird berechnet aus:

$$\rho_{1+X} = \frac{p}{R_l \cdot T} \left(\frac{1}{1 + 1,608 \cdot X} \right) \quad (6)$$

$$R_w = 287,1 \frac{J}{kg K}$$

Der Massenstrom der austretenden feuchten Luft:

$$\dot{m}_{aus} = A \cdot w \cdot \rho_{1+X} \quad (7)$$

A ist hierbei die durchströmte Querschnittsfläche am Austritt des Versuchszustandes. Zu beachten ist hierbei, dass durch den Rotor im Flügelradanemometer die Fläche A eine Kreisringfläche darstellt.

Mit Hilfe der vorangegangenen Berechnungen wird der Massenstrom der trockenen Luft am Austritt berechnet.

$$\dot{m}_l = \frac{\dot{m}_{aus}}{X_{aus} + 1} \quad (8)$$

Aus dem Massenstrom der trockenen Luft und der Wasserdampfbeladung wird der Massenstrom des Wassers berechnet.

$$\dot{m}_w = X \cdot \dot{m}_l \quad (9)$$

Aus der Differenz der ein- und austretenden Wassermassenströme multipliziert mit der Zeit t [s], die das Programm zum durchlaufen einer Schleife benötigt, wird die vom Zeolith aufgenommene oder abgegebene Menge an Wasser ermittelt.

$$\dot{m}_w = (\dot{m}_{w,aus} - \dot{m}_{w,ein}) \cdot t \quad (10)$$

Die spezifischen Enthalpien des Wassers h_w und der trockenen Luft h_l werden wie folgt berechnet:

$$h_w = \Delta h_v + c_{p,w} \cdot \vartheta \quad (11)$$

$$h_l = c_{p,l} \cdot \vartheta \quad (12)$$

Daraus folgt die spezifische Enthalpie der feuchten Luft:

$$h_{1+X} = h_l + X \cdot h_w \quad (13)$$

$$c_{p,l} = 1,004 \frac{kJ}{kg K}; c_{p,d} = 1,86 \frac{kJ}{kg K}; \Delta h_v = 2500 \frac{kJ}{kg}$$

Multipliziert mit der trockenen Luftmasse ergibt sich die Enthalpie der feuchten Luft ΔH .

$$\Delta H = m_l \cdot \Delta h_{1+X} \quad (14)$$

Δh_{1+X} stellt hierbei die Differenz der ein- und austretenden spezifischen Enthalpien dar.

$$\Delta h_{1+X} = h_{1+X,aus} - h_{1+X,ein} \quad (15)$$

2.3 Grundlagen der Wärmeübertragung

In den Kapiteln 2.2 und 2.3, in denen das Adsorptions- und Desorptionsverhalten des Wärmespeichers im Zustand vor dem Umbau untersucht wurde, wurde durch die bleibenden Temperaturdifferenzen am Ende der Versuche deutlich, dass bei der Adsorption eine nicht unerhebliche Wärmemenge durch die Außenwände des Versuchsstandes ins Innere des Zeolithwärmespeichers gelangt. Ebenso ist zu erkennen, dass bei der Desorption der umgekehrte Fall eintritt: In dem Fall wird die Luft im Inneren des Zeolithwärmespeichers durch die geringere Temperatur der Umgebungsluft

von außen abgekühlt. Hier ist also ein von dem Zeolith nach außen gerichteter Wärmestrom vorhanden.

Um die Wärmeströme über die Außenwände der Versuchsanlage zu minimieren, ist eine Isolierung des Wärmespeichers nötig. Ziel hierbei ist es die Verläufe für Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit dahingehend zu beeinflussen, dass die Differenzen zwischen den ein- und austretenden Werten reduziert und im Idealfall gegen Null gehen.

Um die Wärmeströme zwischen zwei Systemen zu beschreiben, bedient man sich den Prinzipien der Wärmeübertragung. Sie ist ein Teilgebiet der Wärmelehre und definiert sich nach Nußelt über zwei allgemeine Arten der Wärmeübertragung (von Böckh, 2015 S. 3) :

2.3.1 Wärmeleitung

Bei der Berechnung der Wärmeleitung wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Die Wärmeleitung bei ruhenden Fluiden und festen Wänden ist nur von den Stoffeigenschaften und dem Temperaturgradienten abhängig.

Liegt eine Wärmeübertragung zwischen einer festen Wand und einem strömenden Fluid vor spricht man im Allgemeinen von Konvektion. Hierbei ist zwischen erzwungener und freier Konvektion zu unterscheiden. Bei freier Konvektion entsteht die Strömung lediglich durch Dichteunterschiede im Fluid, welche durch eine unterschiedliche Temperatur innerhalb des Fluides hervorgerufen werden. Die erzwungene Konvektion dagegen behandelt eine durch äußerliche Druckunterschiede hervorgerufene Strömung, wie sie durch eine Pumpe verursacht werden könnte. (von Böckh, 2015 S. 4)

In Abbildung 2.3 sind die vereinfachten Prinzipien der Wärmeleitung an einer ebenen Wand dargestellt.

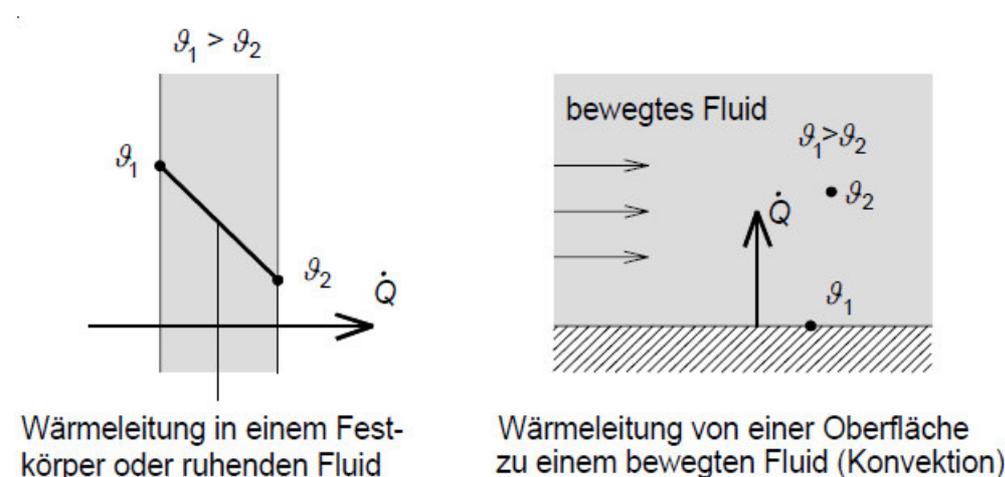
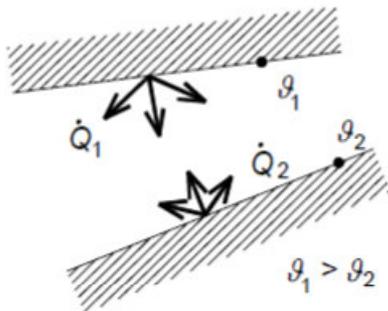


Abbildung 2.3 Wärmeleitung (von Böckh, 2015 S. 4)

2.3.2 Strahlung

Anders als bei der Wärmeleitung bedarf es bei der Strahlung keines Stoffes über welches die Energie transportiert wird. Hier sind elektromagnetische Schwingungen für die Wärmeübertragung verantwortlich. So ist es bei der Strahlung auch möglich Wärme im Vakuum zu übertragen. Als Vergleich bietet sich hier die Sonne an, deren Strahlung trotz des Vakuums des Weltraumes die Erde erwärmt. (Marek, 2015 S. 21)

In Abbildung 2.4 ist eine vereinfachte Darstellung der Wärmeübertragung durch Strahlung zu erkennen.



Wärmeaustausch durch Strahlung
zwischen zwei Oberflächen

Abbildung 2.4 Wärmeübertragung durch Strahlung (von Böckh, 2015 S. 4)

3 Aufbau und Untersuchung des ursprünglichen Versuchsstandes

Im Folgenden wird zunächst der Versuchsstand im Ist-Zustand zu Beginn der Bachelorarbeit beschrieben.

3.1 Aufbau des Versuchsstandes

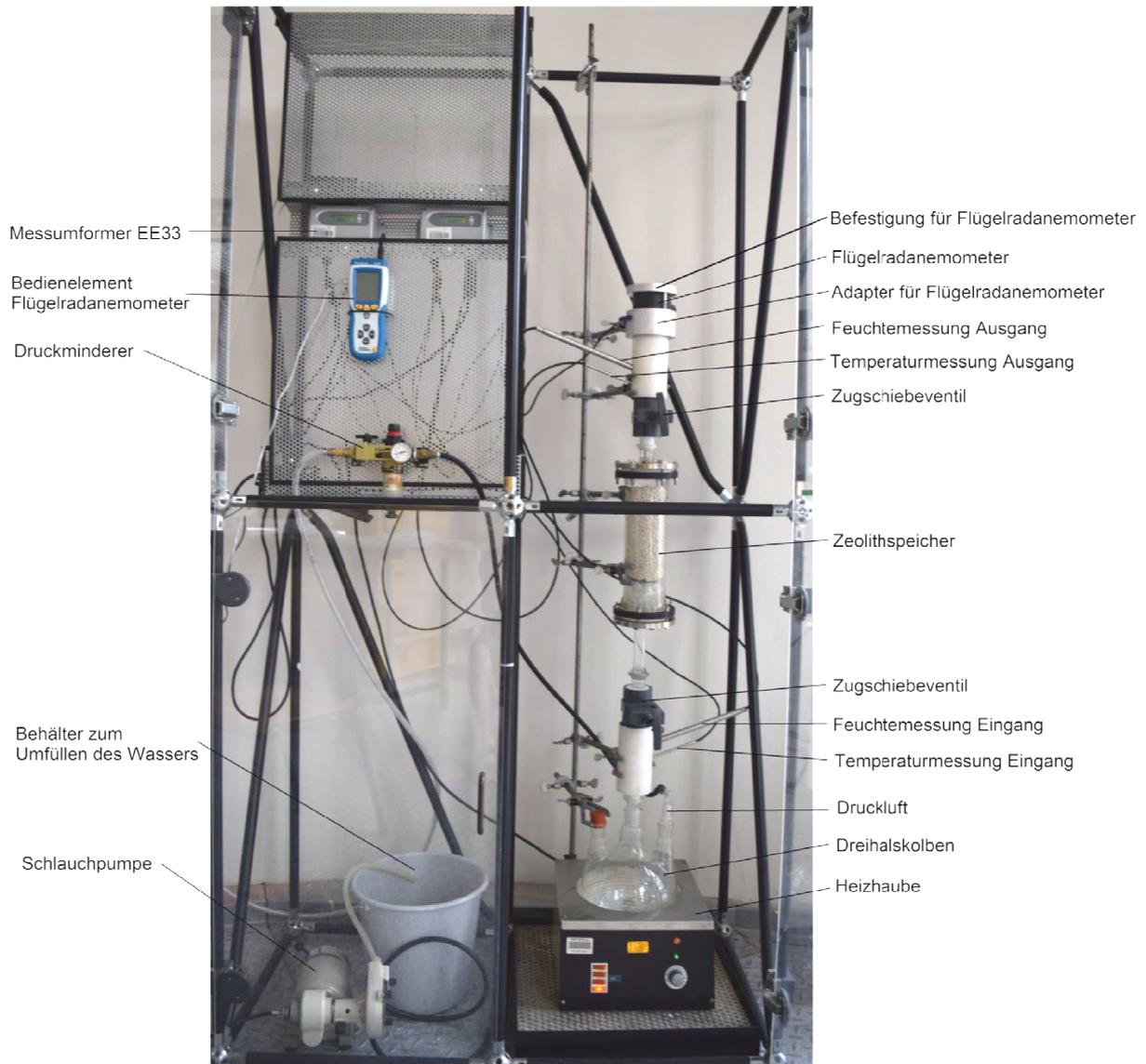


Abbildung 3.1 Zustand des Versuchsstandes zu Beginn der Bachelorarbeit (Hoff 2015, S.27)

Der in Abbildung 3.1 dargestellte Versuchstand besteht aus einem von einer Heizhaube beheizbaren Dreihalskolben. Über diesen kann die über eine Druckluftleitung zugeführte und von einem Druckreduzierer angepasste Zuluft in dem Versuchstand sowohl erwärmt als auch befeuchtet werden. Auf diese Weise können sowohl Adsorptionsvorgänge als auch Desorptionsvorgänge in der Versuchsanlage untersucht werden.

Folgt man nun dem Weg der Zuluft gelangt man zu den Messsonden für Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Über diese wird der Zustand der Zuluft vor den Ad- bzw. Desorptionsvorgängen ermittelt.

Um vor Beginn des eigentlichen Versuches einen stationären Zustand der Luft zu erreichen, ist hier ein Zugschiebeventil installiert. Ein weiteres Zugschiebeventil ist oberhalb des Zeolithspeichers montiert. Zusammen mit dem unteren Zugschiebeventil kann so verhindert werden, dass nach einem Desorptionsversuch Feuchtigkeit in den Speicher gelangen kann.

Der Zeolithwärmespeicher selbst besteht, wie in Abbildung 3.1 zu sehen, im Ursprungszustand aus einem Glaszylinder, welcher an der Ober- und Unterseite durch kreisrunde Edelstahlscheiben begrenzt ist. Am Boden des Glaszylinders ist zunächst ein Sieb eingesetzt. Dieser verhindert, dass die sich oberhalb des Siebes befindlichen Füllkörper und Zeolithkugeln aus der Zuluftöffnung im Boden fallen. Die erwähnten Füllkörper haben hierbei die Aufgabe den Zuluftstrom gleichmäßig vor dem Eintritt in den Bereich, welcher vom Zeolith belegt ist, zu verteilen.

Oberhalb der Austrittsöffnung aus dem Zeolithwärmespeicher befindet sich eine ähnliche Messstation wie bereits für den Bereich unterhalb des Wärmespeichers beschrieben wurde. Auch hier ist zunächst ein Zugschiebeventil mit darauffolgenden Temperatur- und Feuchtigkeitsmesssonden verbaut. Zusätzlich zu den erwähnten Messstellen ist am Austritt aus der Versuchsanlage ein Flügelradanemometer angebracht, welches über den gesamten Versuch die austretenden Strömungsgeschwindigkeiten aufnimmt.

Auf der Abbildung nicht zu sehen ist eine Wärmebildkamera mit Hilfe dessen die Oberflächentemperaturen während der Versuche ermittelt und dokumentiert werden können.

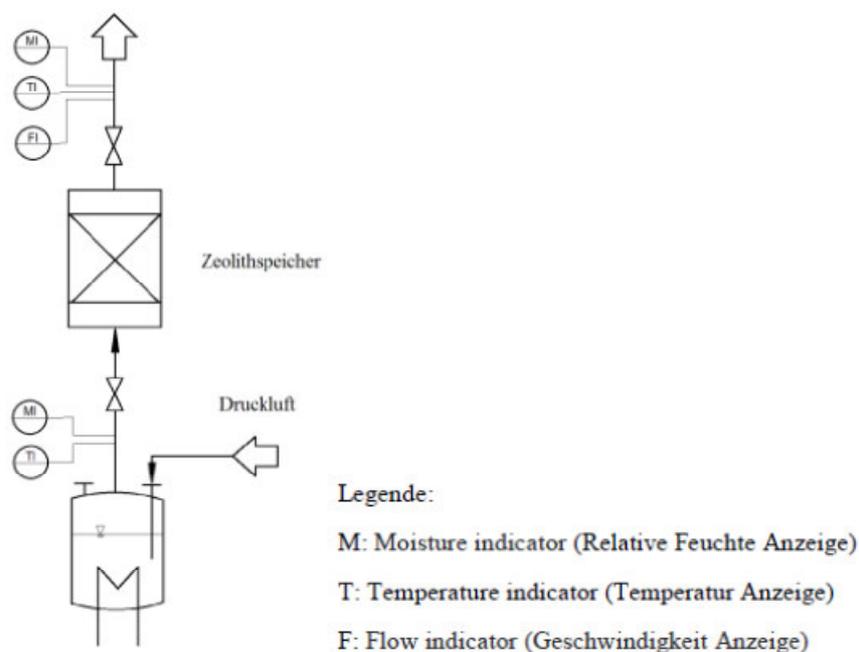


Abbildung 3.2 Verfahrensfließbild (Hoff, 2015 S. 28)

Im Institut für erneuerbare Energien an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg ist die Versuchsanlage als offener Prozess verwirklicht. Das heißt, dass das Mineral mit, im Falle der Adsorption, feuchter Luft aus der Umgebung durchströmt wird, welche hinter dem Zeolith als trockene und deutlich erwärmte Luft wieder an die Umgebung abgegeben wird. Hauer hat dies in folgender Abbildung verdeutlicht.

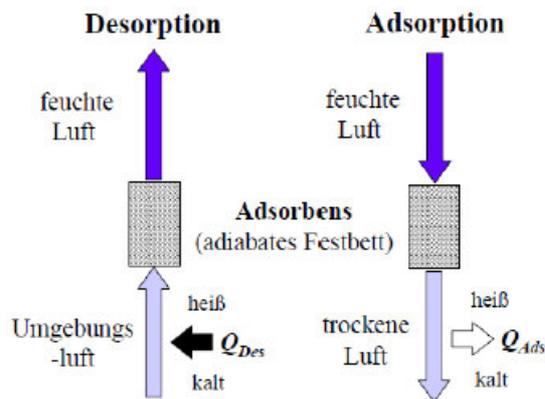


Abbildung 3.3 Offener Adsorptions-/Desorptionsprozess (Hauer, 2002 S. 5)

Ein geschlossener Prozess interagiert im Gegensatz zum offenen Prozess nicht mit der Umgebung. Ein Verdampfer erzeugt hierbei feuchte Luft, welche im Zeolithwärmespeicher eine exotherme Reaktion zur Folge hat. Die dabei entstandene Wärme wird wiederum über einen Wärmetauscher abgeführt.

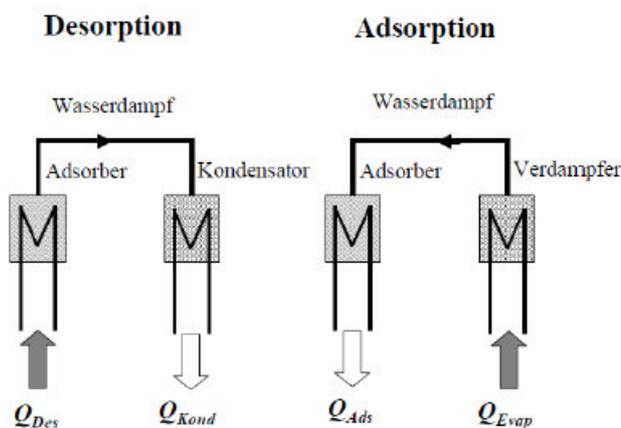


Abbildung 3.4 Geschlossener Adsorption-/Desorptionsprozess (Hauer, 2002 S. 6)

3.2 Verarbeitung der Messdaten

Um die von den verschiedenen Messtellen erzeugten Messsignale verwerten zu können, müssen diese zunächst über COM5 und COM7 Schnittstellen eingelesen werden um anschließend durch das Softwarepaket „Labview“ der Firma „National Instruments“ ausgewertet und in lesbare ASCII Zeichen umgewandelt zu werden. Zusätzlich werden aus den Messdaten mit Hilfe des Programmes einige relevante Werte errechnet und gemeinsam mit den Messdaten in ein externes Text-Dokument ausgegeben. (Hoff, 2015 S. 32). Die Software wurde bei der Bearbeitung einer vorrangegangenen Bachelorarbeit eingerichtet und blieb unverändert.

3.3 Versuchsdurchführung

Im Folgenden wird der Vorgang der Adsorption beim ursprünglichen Versuchsaufbau untersucht. Dabei herrscht eine Umgebungstemperatur von 23°C.

Nach 20 Minuten wird der maximale Temperaturhub von

$$\Delta T = 31,7^{\circ}\text{C}$$

erreicht.

Verdeutlicht wird dies durch eine Aufnahme zu diesem Zeitpunkt mit einer Wärmebildkamera, wobei an drei Messpunkten die Temperatur dargestellt wird.

Pu1=Bereich der Füllkörper

Pu2= Eintritt in den Bereich der Zeolithkugeln

Pu3= Oberfläche der Zeolithschüttung

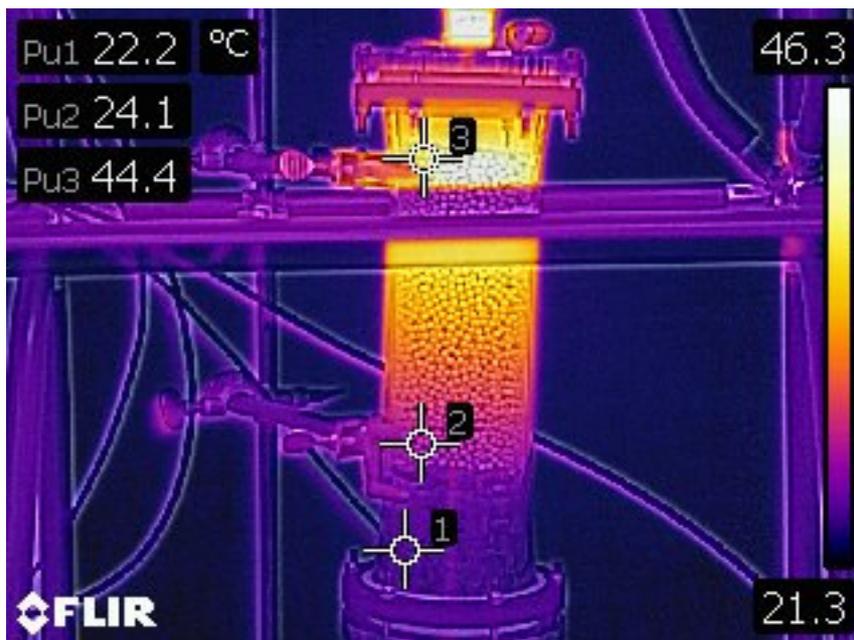


Abbildung 3.5 Oberflächentemperaturen des Wärmespeichers bei maximalem Temperaturhub

Neben dem Temperaturhub zwischen dem ein- und austretenden Luftstrom kann aus dieser Abbildung bereits entnommen werden, dass viel Wärme aus dem Inneren des Zeolithwärmespeichers durch die Glaswandung geleitet wird und an die Umgebung verloren geht.

Für die Bearbeitung dieser Arbeit von entscheidender Bedeutung ist in Abbildung 2.1 auf Seite 3 der Zeitpunkt nach acht Versuchsstunden: Die Temperaturen der ein- und austretenden Stoffströme gleichen sich wieder an, sodass der Temperaturhub am Ende des Adsorptionsvorganges gegen Null geht. Auch bei der relativen Luftfeuchtigkeit zum Ende des Versuches ist ein solches Verhalten zu erwarten.

In Versuchen am vorhandenen Versuchsstand im Institut für erneuerbare Energien der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg ergab sich laut Hoff (2015, S.40) trotz Angleichen der absoluten Luftfeuchten am Ende des Adsorptionsvorganges eine bleibende Temperaturdifferenz und Differenz der relativen Feuchten der ein- und austretenden Luftströme. Diese Ergebnisse konnten anhand von eigenen Versuchen bestätigt werden. Siehe hierzu Abbildung 3.6 und 3.7 nach 3,5 Stunden Versuchszeit.

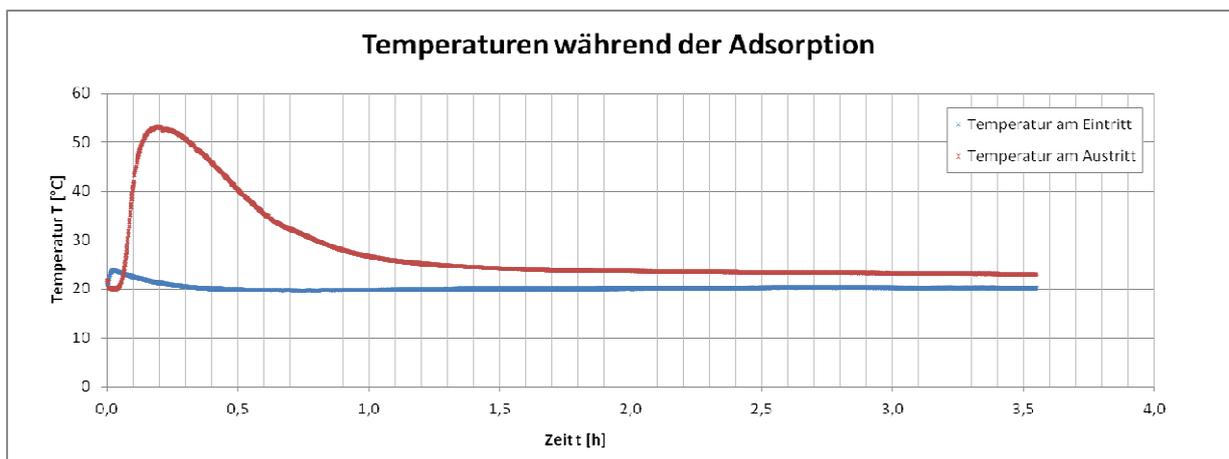


Abbildung 3.6 Bleibende Temperaturdifferenz am Ende von einem Adsorptionsvorgang

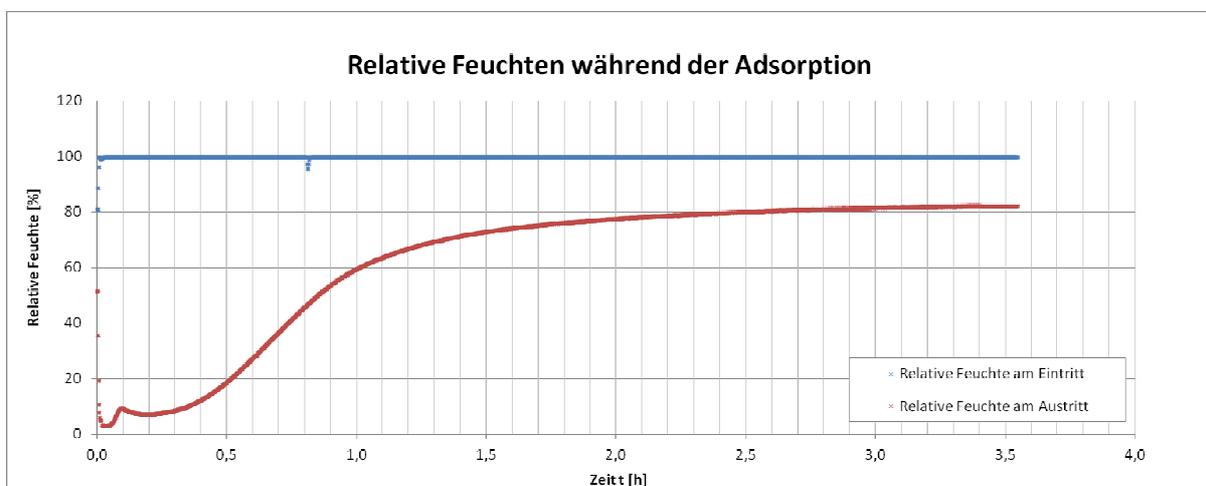


Abbildung 3.7 Bleibende Differenz der relativen Luftfeuchtigkeit am Ende eines Adsorptionsvorganges

Auch hier kann mit Hilfe einer Wärmebildkamera der Zustand nach weitestgehender Angleichung der ein- und austretenden Luftströme näher untersucht werden.

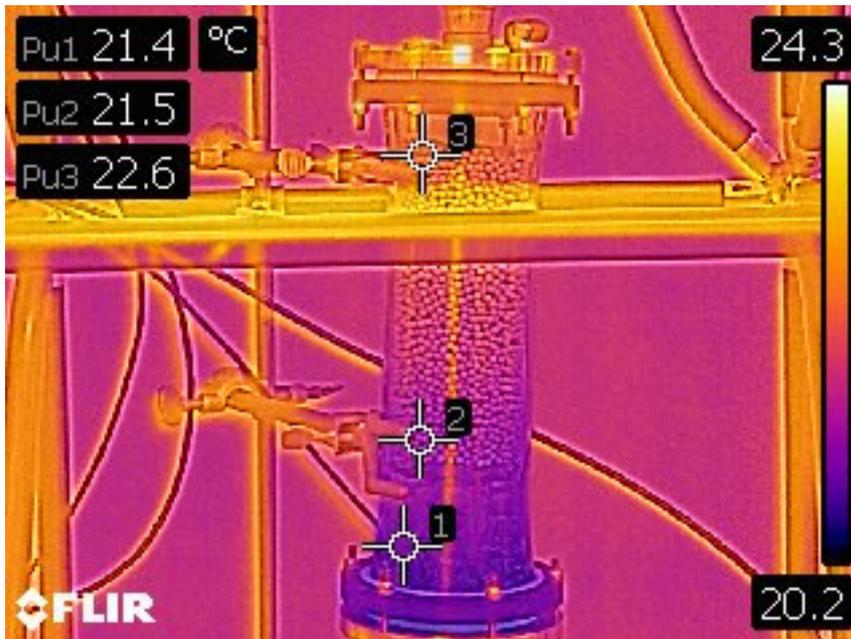


Abbildung 3.8 Oberflächentemperaturen des Wärmespeichers nach Sättigung des Zeolithspeichers

Zu erkennen ist hierbei, dass sich die Oberflächentemperaturen nahezu angeglichen haben. Die bleibende Temperaturdifferenz ist auch hier anhand der Differenz zwischen Messpunkt Pu1 und Pu3 zu erkennen. Anzumerken ist hier, dass der Einfluss von Restwärme in der Glaswandung nicht ausgeschlossen werden kann und so die Temperaturdifferenz an der Oberfläche verfälscht sein können.

Auch bei der Desorption ergaben sich in der Vergangenheit bei Versuchen Abweichungen vom erwarteten Verhalten. So beschreibt auch hier Hoff wie es sowohl bei der Temperatur als auch bei der der relativen Luftfeuchtigkeit am Austritt gegenüber den Werten am Eintritt auch nach Abschluss der Reaktion zu bleibenden Differenzen kommt. In eigenen Versuchen konnten diese Ergebnisse bestätigt werden.

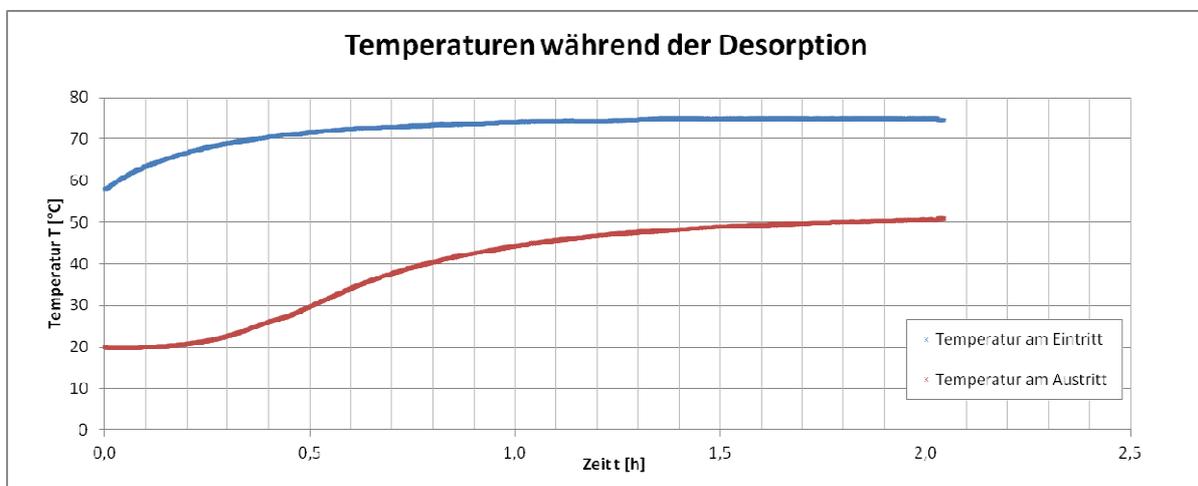


Abbildung 3.9 Bleibende Temperaturdifferenz am Ende des Desorptionsvorganges

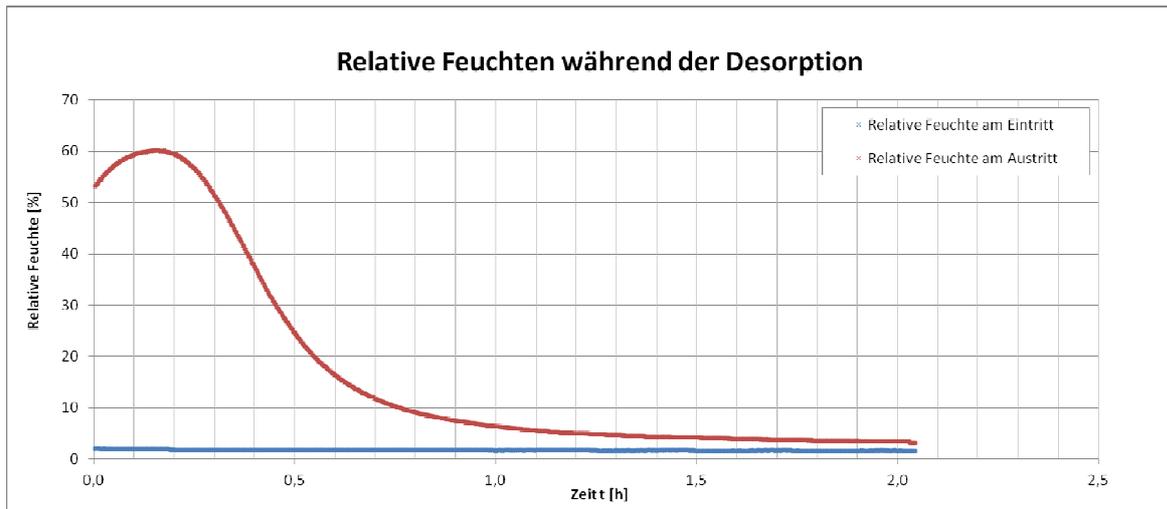


Abbildung 3.10 Bleibende Differenz der relativen Luftfeuchtigkeit am Ende der Desorption

Zusätzlich zu den abgebildeten Verläufen lässt sich mit Hilfe der eingesetzten Wärmebildkamera am Versuchsende die Oberflächentemperatur des Wärmespeichers ermitteln. In Abbildung 3.11 ist deutlich zu erkennen, wie sich der Glaszylinder am Eintritt auf bis zu 49,3°C erwärmt (Pu3), jedoch mit zunehmender Höhe die Wärme an die Umgebung verliert, sodass die Oberflächentemperatur am Austritt nur noch 39,9°C aufweist (Pu1).



Abbildung 3.11 Bild der Wärmebildkamera am Versuchsende mit drei Temperaturmesspunkten

3.4 Korrektur der Messwerte unter Berücksichtigung der Wärmeübergänge

Um den Einfluss der Wärmeübertragung über die Außenwände des Versuchstandes zu berücksichtigen und schließlich zu korrigieren, kann rechnerisch wie folgt vorgegangen werden:

Durch das Auftragen der spezifischen Enthalpiedifferenzen Δh_u über der Differenz der Umgebungstemperatur ϑ_u zur Austrittstemperatur ϑ_2 ist ein linearer Zusammenhang der Werte erkennbar, welcher laut Hoff (2015, S.53) durch eine Geradengleichung ausgedrückt werden kann.

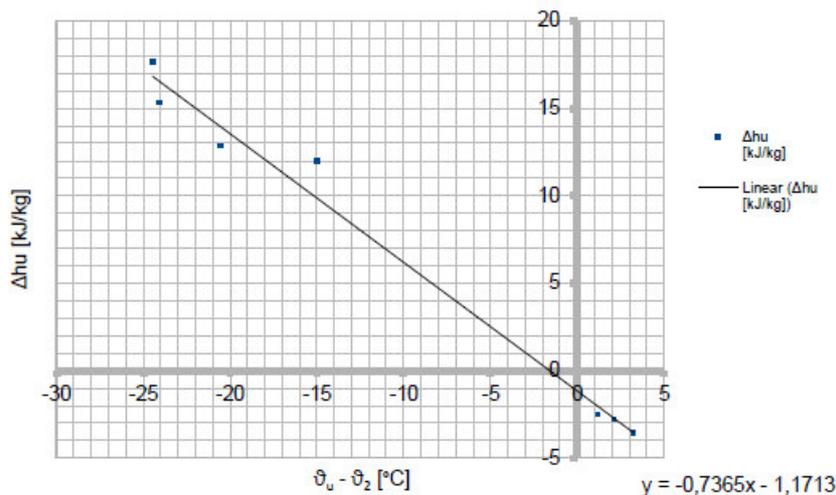


Abbildung 3.12 Differenz der spez. Enthalpie über die Differenz der Umgebungstemperatur zur Austrittstemperatur (Hoff, 2015 S. 53)

$$\Delta h_u = -0,7365 \cdot (\vartheta_u - \vartheta_2) - 1,1713 \quad (16)$$

Durch diese ist es möglich für jede Austrittstemperatur die entsprechende Enthalpiedifferenz zu ermitteln. Die Enthalpiedifferenz wiederum wird verwendet um eine neue bereinigte Enthalpie am Austritt zu berechnen.

$$h_{2,bereinigt} = h_2 + \Delta h_u \quad (17)$$

Mit der erhaltenen bereinigten Enthalpie am Austritt kann über folgende Formel die bereinigte Austrittstemperatur ermittelt werden:

$$\vartheta_{2,bereinigt} = \frac{h_{2,bereinigt} - X \cdot 2500}{1,004 + 1,86 \cdot X} \quad (18)$$

Durch die Ermittlung eines neuen bereinigten Sättigungsdampfdruckes ist es möglich eine bereinigte relative Feuchte zu berechnen.

$$\varphi_{bereinigt} = \frac{p}{0,622 \cdot \frac{p_{s,bereinigt}}{X} + p_{s,bereinigt}} \quad (19)$$

Mit Hilfe der bereinigten Werte konnten die Verläufe für die Temperaturen und relativen Feuchten korrigiert werden und so das Vorgehen seitens Herrn Hoff bestätigt werden.

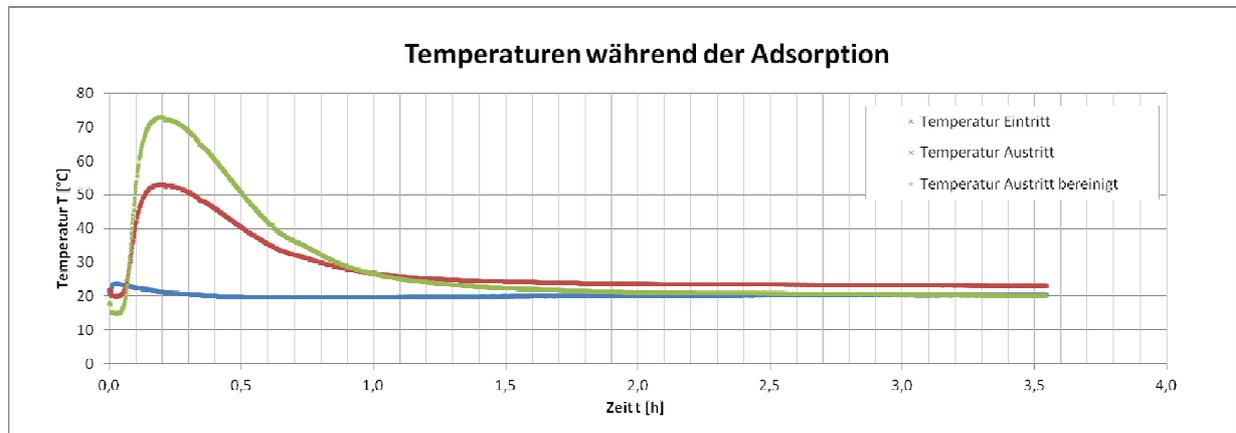


Abbildung 3.13 Bereinigter Temperaturverlauf während der Adsorption

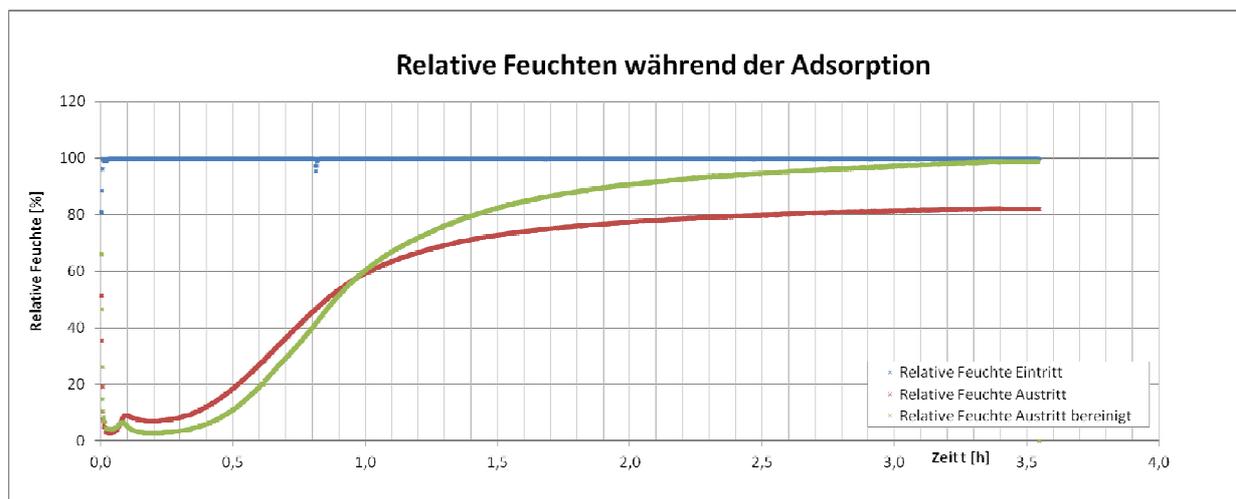


Abbildung 3.14 Bereinigter Verlauf der relativen Feuchten während der Adsorption

Anhand der Abbildungen 3.13 und 3.14 ist gut zu erkennen, wie sich die Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte beim Adsorptionsvorgang nach Bereinigung der Werte einander annähern und so den theoretischen Erwartungen entsprechen.

Mit Hilfe der Berechnung, welche Analog zu jener die bei der Adsorption verwendet wurde, um die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit zu bereinigen, kann auch bei der Desorption der Einfluss der mangelnden Isolierung der Anlage entfernt werden.

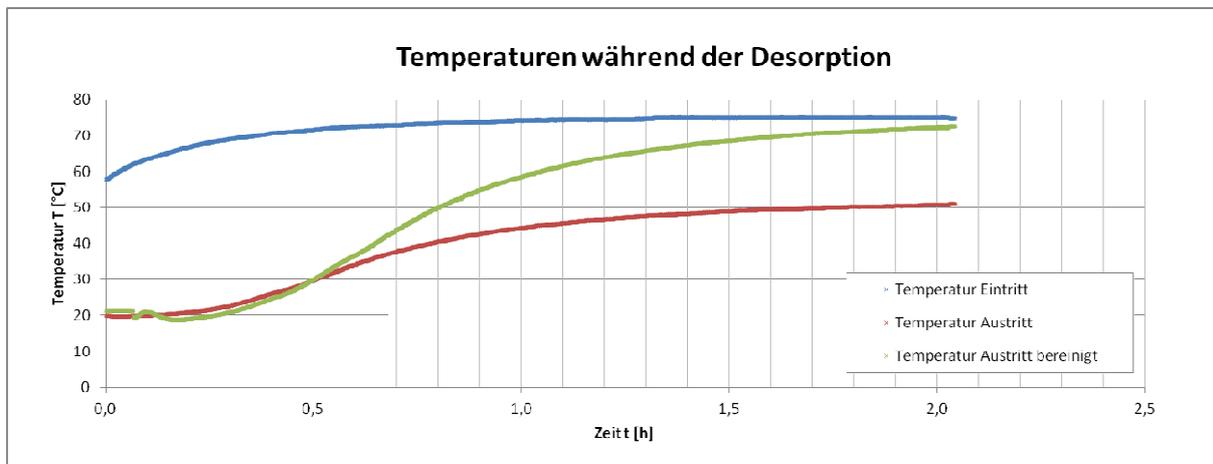


Abbildung 3.15 Bereinigte Temperaturverläufe während der Desorption

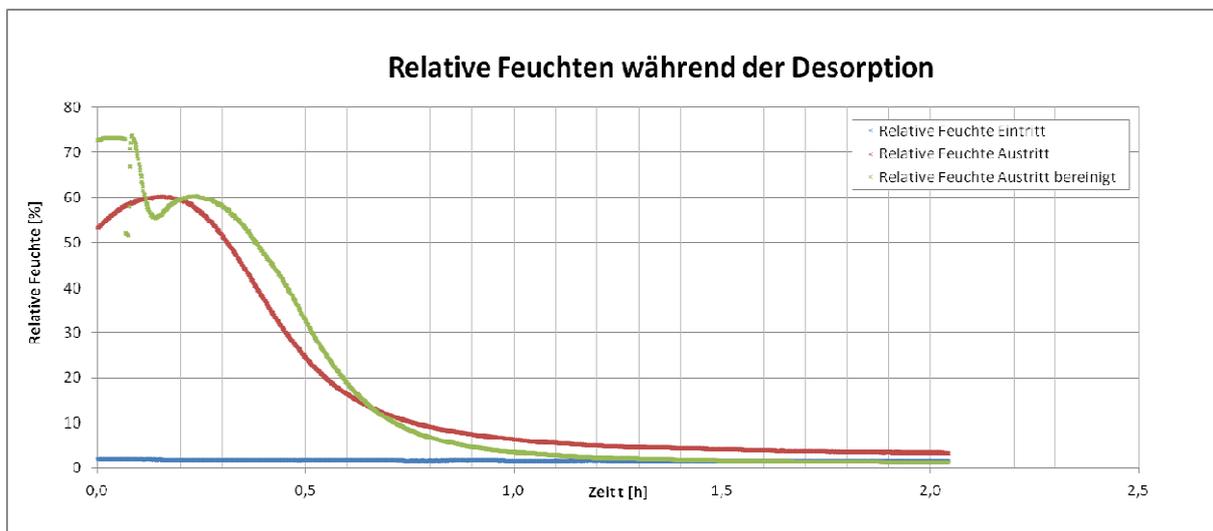


Abbildung 3.16 Bereinigte Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeiten während der Desorption

Auch hier erkennt man deutlich wie die bereinigten Verläufe am Ende des Desorptionsvorganges keine Differenz zu den Werten am Eintritt aufweisen.

4 Berechnung der Wärmeübergänge und -ströme im Betrieb

4.1 Ohne Isolierung

Im Folgenden wird der Wärmestrom, welcher über die zylinderförmige Glaswand ohne Isolierung an die Umgebung verloren geht, berechnet. Dieser Zustand spiegelt den Ist-Zustand der Anlage vor dem Umbau wieder. Für die Berechnungen werden die Daten am Ende eines Desorptionsvorganges genutzt. Der Grund hierfür ist, dass der Vorgang der Desorption gegenüber dem Adsorptionsvorgang einen größeren Temperaturunterschied zur Umgebung aufweist und damit auch größere und aussagekräftigere Wärmeströme errechnet werden können. Auch der Zeitpunkt am Ende des Desorptionsvorganges wird aus demselben Grund gewählt. Auch hier ist die Temperatur im Inneren des Wärmespeichers am höchsten und zu dem gleichmäßiger verteilt. Bei der folgenden Berechnung der Wärmeströme wird das Prinzip der Wärmeleitung mit erzwungener Konvektion angewendet. Die Wärmeübertragung über Wärmestrahlung wird vernachlässigt.

Tabelle 4.1 Aufgenommene Messwerte am Ende des Desorptionsvorganges

Eintritts- temperatu r	Austritts- temperatur	Umgebungs- temperatur	Austritts- geschwindigkeit	Dichte
$\vartheta_1 [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_2 [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_u [^{\circ}\text{C}]$	$w_{aus} [\text{m/s}]$	$\rho [\text{kg/m}^3]$
74,6	51,0	18,5	1,64	1,09

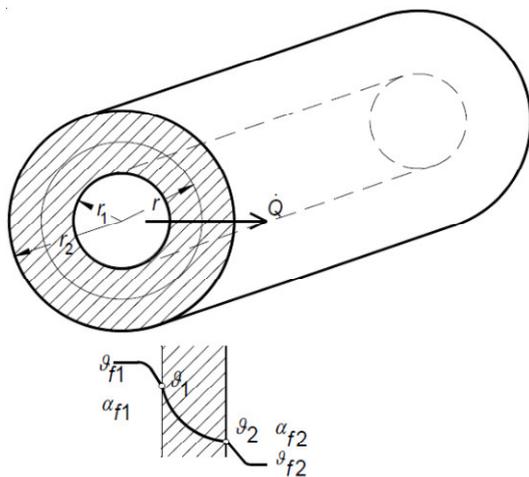


Abbildung 4.1 Wärmeleitung in einem Hohlzylinder (von Böckh, 2015 S. 27)

Bevor der Wärmestrom über die zylindrische Außenwand bestimmt werden kann, muss zunächst eine Reihe anderer Werte ermittelt werden.

Um den inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i zwischen strömender Luft und Glasoberfläche zu ermitteln kann folgende Formel herangezogen werden:

$$\alpha_i = \alpha_{f1} = \frac{Nu \cdot \lambda_{Fluid}}{L} \quad (20)$$

L = charakteristische Systemabmessung = 0,2m

$$\lambda_{Luft} \approx 0,025 \frac{W}{mK}$$

Um die Nußelt-Zahl Nu, welche eine dimensionslose Kennzahl ist, berechnen zu können kann vereinfacht von einer längs angeströmten Platte ausgegangen werden. (Marek, 2015 S. 187) In diesem Fall ergeben sich je nach Strömungsverhalten unterschiedliche Lösungsansätze.

Für eine Laminare Strömung mit einer Reynoldszahl $Re < 10^5$:

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (21)$$

Für turbulente Strömungen mit $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$:

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (22)$$

Die Reynoldszahl innerhalb der Schüttung wird hierfür nach Wagner (2012 S. 143) berechnet.

Das Gesamtvolumen V_{ges} berechnet sich aus:

$$V_{ges} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H \quad (23)$$

und ergibt somit:

$$V_{ges} = \frac{\pi \cdot (0,07m)^2}{4} \cdot 0,2m = 7,70 \cdot 10^{-4} m^3$$

Das Volumen, welches nicht von den Zeolithkugeln eingenommen wird, wird hier als freies Volumen bezeichnet. Hierfür gilt:

$$V_L = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H - \left(\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_k^3 \cdot z \right) \quad (24)$$

Z ist hierbei die Anzahl der Zeolithkugeln innerhalb des Wärmespeichers und wurde auf 11142 Stück ermittelt (Hoff, 2015 S. 46). d_k stellt den Durchmesser der Zeolithkugeln dar und beträgt 0,004m.

Somit ergibt sich für das freie Volumen:

$$V_L = \frac{\pi \cdot (0,07m)^2}{4} \cdot 0,2m - \left(\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot (0,004m)^3 \cdot 11142 \right) = 3,963 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (25)$$

Die Division der zuvor berechneten Volumina führt zum Hohlraumanteil ψ :

$$\psi = \frac{V_L}{V_{ges}} \quad (26)$$

$$\psi = \frac{3,963 \cdot 10^{-4} m^3}{7,69 \cdot 10^{-4} m^3} = 0,515$$

welcher wiederum dazu führt, dass der hydraulische Durchmesser d_h berechnet werden kann:

$$d_h = \frac{2}{3} \cdot \frac{\psi}{1 - \psi} \cdot d_k \quad (27)$$

Somit ergibt sich für d_h folgender Zahlenwert:

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

Um die eintretende Luftgeschwindigkeit zu ermitteln wird die maximal auftretende Geschwindigkeit am Flügelradanemometer gemessen. Durch das Verhältnis der durchströmten Querschnittsflächen wird die Luftgeschwindigkeit am Eintritt in den Wärmespeicher berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass die Fläche, welche durch die Welle des Flügelrades eingenommen wird von der Gesamtfläche am Austritt subtrahiert wird. Als Resultat erhält man eine Kreisringfläche, welches die durchströmte Fläche am Austritt bildet.

$$w_{ein} = \frac{w_{aus} \cdot (d_{aus1}^2 - d_{aus2}^2)}{d_{ein}^2} \quad (28)$$

$$d_{aus1} = 0,07 m; d_{aus2} = 0,03 m; d_{ein} = 0,06 m; w_{aus,max} = 1,64 \frac{m}{s}$$

Daraus folgt:

$$w_{ein} = \frac{1,64 \frac{m}{s} \cdot ((0,07 m)^2 - (0,03 m)^2)}{(0,06 m)^2} = 1,82 \frac{m}{s}$$

Zusammen mit dem Hohlraumanteil lässt sich daraus die mittlere Geschwindigkeit ermitteln:

$$\bar{w} = \frac{w_{ein}}{\psi} = \frac{1,82 \frac{m}{s}}{0,515} = 3,55 \frac{m}{s} \quad (29)$$

Um die Reynoldszahl berechnen zu können fehlt abschließend die kinematische Viskosität ν . Diese berechnet sich aus der dynamischen Viskosität welche bei $p=1\text{bar}$ und $\vartheta=50^\circ\text{C}$ bei $\mu = 19,25 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$ liegt. (Leder S. 9)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{19,25 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}}{1,09 \frac{kg}{m^3}} = 1,77 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s} \quad (30)$$

Die Reynoldszahl kann nun mit folgender Formel berechnet werden:

$$Re = \frac{\bar{w} \cdot d_h}{\nu} \quad (31)$$

Durch einsetzen der zuvor berechneten Werte erhält man:

$$Re = \frac{3,55 \frac{m}{s} \cdot 2,83 \cdot 10^{-3} m}{1,77 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 567,6$$

Da $Re < 10^5$ liegt eine laminare Strömung vor. Formel 21 kann nun zur Berechnung der Nußelt-Zahl verwendet werden:

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$

Da die Prandtl-Zahl in den Vorliegenden Temperaturbereichen nur in geringer Weise variiert, kann ein Tabellenwert von $Pr = 0,71$ angenommen werden (von Böckh, 2015 S. 309). Somit ergibt sich:

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot 567,6^{1/2} \cdot 0,71^{1/3} = 14,113 \quad (32)$$

Mit Hilfe der Nußelt-Zahl kann nun der Wärmeübergangskoeffizient zwischen innenliegender Luftströmung und Glaswand berechnet werden.

$$\alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda_{Fluid}}{L} = \frac{14,113 \cdot 0,025 \frac{W}{m \cdot K}}{0,2m} = 1,7641 \quad (33)$$

Um den Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenwand zu berechnen kann nach Böckh (2015 S. 28) folgende Formel herangezogen werden:

$$\alpha_a = \alpha_{f2} = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{Glas}}}{d_a \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)} \quad (34)$$

Mit eingesetzten Werten erhält man auf diese Weise:

$$\alpha_a = \alpha_{f2} = \frac{2 \cdot 0,76 \frac{W}{mK}}{0,07m \cdot \ln\left(\frac{0,07m}{0,06m}\right)} = 140,864$$

Zusammen mit dem inneren Wärmeübergangskoeffizienten kann nun der Wärmedurchgangskoeffizient bestimmt werden.

$$k = \left(\left(\frac{d_a}{d_i} \right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} \right) + \frac{d_a}{2 \cdot \lambda_{\text{Glas}}} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) + \frac{1}{\alpha_a} \right)^{-1} \quad (35)$$

$$k = \left(\left(\frac{0,07m}{0,06m} \right) \cdot \left(\frac{1}{1,7641} \right) + \frac{0,07m}{2 \cdot 0,76 \frac{W}{mK}} \cdot \ln\left(\frac{0,07m}{0,06m}\right) + \frac{1}{140,864} \right)^{-1} = 1,48 \frac{W}{m^2K}$$

Um den errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten besser einordnen zu können wird im Folgenden der Wärmestrom durch die Glaswandung berechnet (Marek, 2015 S. 112).

$$\dot{Q}_u = k \cdot L \cdot d_i \cdot \pi \cdot \Delta\vartheta_u \quad (36)$$

Umgebungstemperatur: $\vartheta_u = 18,5^\circ\text{C}$

Mittlere Lufttemperatur im Glaszylinder: $\vartheta_L = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} = \frac{74,6^\circ\text{C} + 51,0^\circ\text{C}}{2} = 62,8^\circ\text{C}$

$$\dot{Q}_u = 1,48 \frac{W}{m^2K} \cdot 0,2m \cdot 0,07m \cdot \pi \cdot (62,8^\circ\text{C} - 18,5^\circ\text{C}) = 2,47W$$

4.2 Mit Isolierung

Nachdem im vorigen Kapitel der Wärmestrom über die zylindrische Wandung ohne Isolierung berechnet wurde, wird nun eine theoretische Konstruktion betrachtet, bei welchem um das Glasrohr zusätzlich ein Plexiglasrohr angebracht wird. Das Plexiglas und die zwischen den konzentrisch angeordneten Rohrstücken liegende Luftschicht dienen hierbei als Isolatoren. Alle übrigen Werte entsprechen denen im Kapitel zuvor aufgeführten Werten.

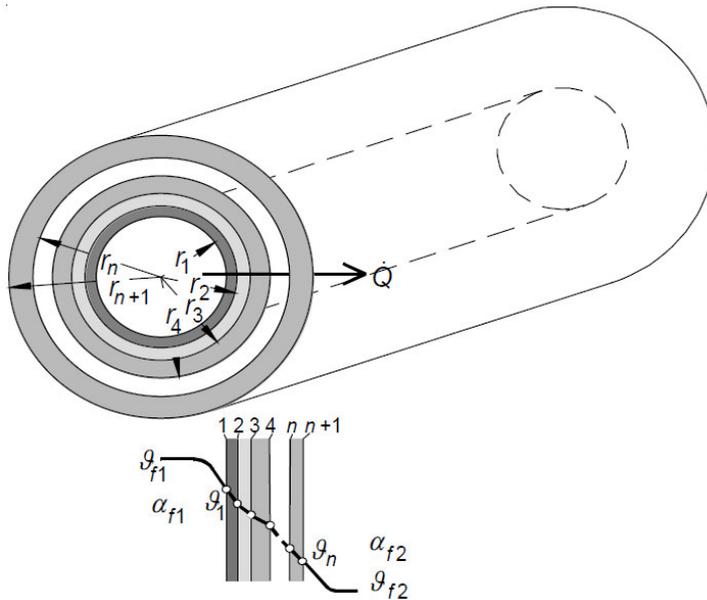


Abbildung 4.2 Wärmeleitung in einem Hohlzylinder mit mehreren Schichten (von Böckh, 2015 S. 29)

Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten k durch zwei Isolationsschichten werden lediglich zwei zusätzliche Terme in die Formel 35 aus Kapitel 4.1 eingefügt. Im Allgemeinen lautet die Formel für mehrschichtige Hohlzylinder wie folgt (von Böckh, 2015 S. 31):

$$k = \left(\frac{d_{n+1}}{d_1} \cdot \frac{1}{\alpha_{f1}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_{n+1}}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \left(\frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_{f2}} \right)^{-1} \quad (37)$$

Für diesen Fall mit drei Schichten (Glas, Luft, Plexiglas) ergibt sich:

$$k = \left(\frac{d_4}{d_1} \cdot \frac{1}{\alpha_{f1}} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{\text{Glas}}} \cdot \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{d_3}{2 \cdot \lambda_{\text{Luft}}} \cdot \ln \left(\frac{d_3}{d_2} \right) + \frac{d_4}{2 \cdot \lambda_{\text{Plexi}}} \cdot \ln \left(\frac{d_4}{d_3} \right) + \frac{1}{\alpha_{f2}} \right)^{-1} \quad (38)$$

Tabelle 4.2 Wärmeübertragungskoeffizienten und Durchmesser der Hohlzylinderschichten

Wärmeübertragungskoeffizienten der Einzelschichten					
λ_{Glas}		λ_{Luft}		λ_{Plexi}	
0,76		0,025		0,19	
Innen- und Außendurchmesser der Einzelschichten					
Glas		Luft		Plexiglas	
d_1 [m]	d_2 [m]	d_2 [m]	d_3 [m]	d_3 [m]	d_4 [m]
0,06	0,07	0,07	0,1935	0,1935	0,2035

Gemeinsam mit den im Kapitel zuvor errechneten Wärmeübergangskoeffizienten ergibt sich für den Wärmedurchgangskoeffizienten k:

$$k_{mehrschichtig} = 0,1695 \frac{W}{m^2K}$$

Somit ergibt sich für den Wärmestrom mit Isolation nach Formel 36 folgende Berechnung:

$$\dot{Q}_{u,mehrschichtig} = 0,1695 \frac{W}{m^2K} \cdot 0,2m \cdot 0,06m \cdot \pi \cdot (62,8^\circ C - 18,5^\circ C) = 0,2831W$$

4.3 Bewertung der Ergebnisse und konstruktive Umsetzung der ausgewählten Isolierung

Der Bereich in dem sich das Ergebnis für den Wärmedurchgangskoeffizienten ohne Isolierung bewegt, deckt sich mit aus dem Bauwesen für Glasfenster bekannten Richtwerten zwischen $1,1 \frac{W}{m^2K}$ und $2,3 \frac{W}{m^2K}$. (BaunetzWissen)

Beim theoretischen Vergleich der Anlagenvarianten mit und ohne Isolierung kann die prozentuale Wärmeverlustdifferenz "u" durch folgende Berechnung ermittelt werden:

$$u = 100 - \frac{\dot{Q}_{u,mehrschichtig}}{\dot{Q}_u} \cdot 100 = 100 - \frac{0,2831W}{2,47W} \cdot 100 = 88,54\% \quad (39)$$

Dies führt zu dem Ergebnis, dass der Wärmeverlust mit Isolierung theoretisch um bis zu 88,54% gegenüber der Variante ohne zusätzliche Isolierung verringert werden könnte.

Zu beachten ist hierbei, dass lediglich der Wärmestrom über die zylindrischen Außenwände des Zeolithwärmespeichers untersucht wurde. Der Einfluss von anderen konstruktiven Veränderungen des Wärmespeichers, sowie der Einfluss der Wärmestrahlung sind bei der Berechnung unberücksichtigt geblieben.

Um die Isolierung mit Hilfe des zusätzlichen Acrylglasrohres zu verwirklichen, ist eine Rekonstruktion des Zeolithwärmespeichers nötig.

Anspruch an die Konstruktion:

- Verringerung der Wärmeverluste über den Wärmespeicher.
- Die Anlage soll sowohl mit als auch ohne Isolierung betrieben werden können, um gegeben falls im Laborbetrieb die Auswirkungen dieser untersuchen zu können.
- Die Gesamte Konstruktion soll erhöht montiert werden, um so eine bessere Einsicht in die Anlage zu garantieren.
- Die Isolierung der Versuchsanlage soll die Sicht auf die Mineralfüllung im Inneren nicht behindern.
- Über Dichtungen soll ein Austreten von Feuchtigkeit und Luft verhindert werden.

Um das Plexiglasrohr mit in die Konstruktion aufnehmen zu können, ist es notwendig die unteren und oberen Begrenzungen des mit den Zeolithkugeln befüllten Glasrohres im Durchmesser zu vergrößern. Das Plexiglasrohr, welches als äußere Isolationsschicht dienen soll, hat hierbei folgende feste Dimensionen:

Innendurchmesser: $D_{i,plex} = 193,5 \text{ mm}$

Wandstärke: $s_{plex} = 5 \text{ mm}$

Durch diese Maße befindet sich zwischen Glaswandung und Plexiglasisolierung ein Spalt von ca. 60mm. Dieser kann bei Bedarf in Zukunft genutzt werden um zusätzliche Messensoren in den Zwischenraum zu installieren.

Das Plexiglasrohr wird radial von innen über O-Ringe abgedichtet. Hierbei wurde die O-Ring-Größe 181x6,99 mm ausgewählt, wobei die erste Angabe dem Innendurchmesser und die zweite Angabe der Schnurstärke entspricht.

Um eine Auswahl für das Material der O-Ringe zu treffen ist eine Betrachtung der einzelnen zulässigen Temperaturbereiche nötig.

Tabelle 4.3 Temperaturbereiche der O-Ringmaterialien bei Luft bzw. Wasser als Medium. (HUG Industrietechnik und Arbeitssicherheit GmbH)

zul. Temperaturen	NBR	EPDM	MVQ	FPM
$\vartheta_{min} [^{\circ}\text{C}]$	-30	-40	-55	-20
$\vartheta_{max} [^{\circ}\text{C}]$	100	100	200	200

Da die Dichtung lediglich gegen Luft bzw. Wasser abdichten soll und die zu erwartenden Temperaturbereiche ebenfalls keine speziellen Anforderungen an das Material stellen, wird hier das gängige und kostengünstige Material NBR (Nitrilkautschuk) ausgewählt.

Anhand der festgelegten Dimensionen der O-Ringe können über Tabellenwerte die Einbauträume der Dichtungen ermittelt werden.

Tabelle 4.4 Einbauträume für O-Ringe (C.Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)

Darstellung einer typischen Rechtecknut

- t = Nuttiefe
- b = Nutbreite
- h = Höhe des Einbautraums
- g = Dichtspalt (Spaltmaß)
- P = Mediendruck
- A = Oberfläche der Gegenlauffläche
- B = Oberfläche der Nutflanken und des Nutgrunds
- C = Oberfläche der Einführungschräge
- r₁ = Radius im Nutgrund
- r₂ = Radius an der Nutoberkante
- z = Länge der Einführungschräge

Schnurstärke d _z	Radialer O-Ring Einbau			Axialer O-Ring Einbau		Radius r ₁	Einführ- chräge z
	Nuttiefe t		Nutbreite b b +0,05 0	Nuttiefe t + 0,1 0	Nutbreite b + 0,25 0		
	dynamisch hydraulisch +0,05 0	statisch +0,05 0					
1,00	0,75	0,70	1,58	0,70	1,90	0,30	0,62
1,50	1,15	1,05	2,19	1,10	2,80	0,30	0,92
1,78	1,40	1,30	2,53	1,30	3,20	0,30	1,10
2,00	1,60	1,50	2,78	1,50	3,40	0,30	1,15
2,50	2,00	1,90	3,37	1,90	3,90	0,30	1,43
2,62	2,10	2,00	3,51	2,00	4,00	0,30	1,50
3,00	2,40	2,30	3,98	2,30	4,60	0,60	1,53
3,53	2,80	2,70	4,67	2,70	5,30	0,60	1,80
4,00	3,30	3,10	5,23	3,10	6,00	0,60	2,03
4,50	3,80	3,50	5,90	3,50	6,50	0,60	2,28
5,00	4,30	3,90	6,48	3,90	7,40	0,60	2,53
5,33	4,60	4,20	6,86	4,20	7,60	0,60	2,70
5,50	4,80	4,40	7,05	4,40	7,60	1,00	2,83
6,00	5,20	4,80	7,59	4,80	8,00	1,00	3,09
6,50	5,60	5,30	8,17	5,30	8,40	1,00	3,35
6,99	6,00	5,80	8,68	5,70	8,70	1,00	3,60
7,50	6,50	6,30	9,29	6,20	9,50	1,00	3,86
8,00	7,00	6,80	9,88	6,70	9,80	1,00	4,12
9,00	7,90	7,70	11,14	7,60	11,10	1,00	4,64
10,00	8,80	8,60	12,38	8,60	12,20	1,00	5,15

Im Falle des zuvor ausgewählten O-Ringes mit einer Schnurstärke von 6,99mm ergeben sich folgende Konstruktionsrichtlinien für die nötige Rechtecknut bei radialem Einbau:

Nuttiefe bei statischer Beanspruchung: $t_{statisch} = 5,80 \text{ mm}$

Nutbreite: $b = 8,68 \text{ mm}$

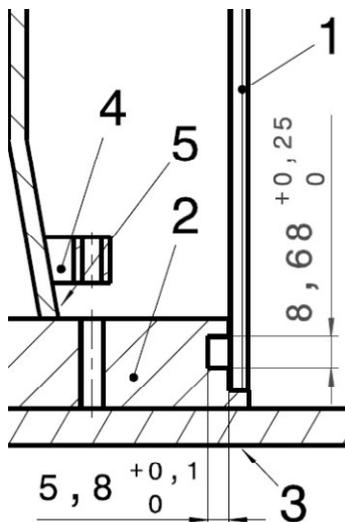


Abbildung 4.3 O-Ring Nut der Konstruktion im Schnitt

Tabelle 4.5 Legende zu Abbildung 16

Nummer	Bezeichnung
1	Plexiglasrohr
2	Unterteil
3	Halteplatte
4	Fixierring
5	Glasrohr

Die Befestigung des Bodens und des Deckels erfolgt wie in der ursprünglichen Version der Anlage über zwei Ringe, welche sich an den sich zu den Enden hin vergrößernden Durchmessern des Glasrohres abstützen. Diese wiederum werden durch Schrauben durch die Anlagendeckel hindurch von außen gespannt.

In Folgendem Schnitt durch den Zeolithwärmespeicher ist die geplante Rekonstruktion veranschaulicht:

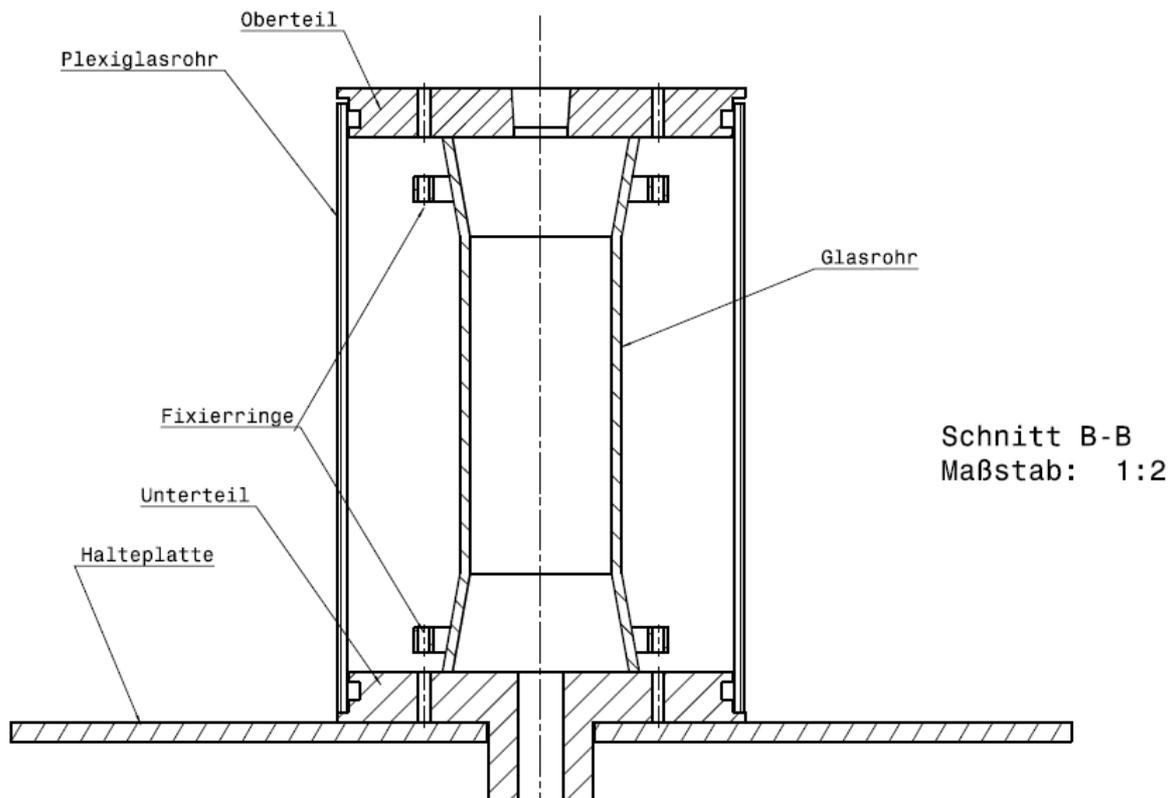


Abbildung 4.4 Schnittdarstellung des Zeolithwärmespeichers nach dem Umbau

Zusätzlich werden die Messstellen für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit näher an den Wärmespeicher verlegt. Hierdurch werden Messwertabweichungen zwischen den Messstellen und dem eigentlichen Wärmespeicher reduziert.

Damit die Anlage innerhalb einer Laborveranstaltung für Studenten besser einsehbar ist, wird der Wärmespeicher insgesamt um ca. 40cm höher als zuvor aufgehängt.

Im Folgenden ist der direkte Vergleich zwischen der ursprünglichen Version und der neuen Konstruktion zu sehen:



Abbildung 4.5 links: Ursprünglicher Aufbau des Versuchsstandes

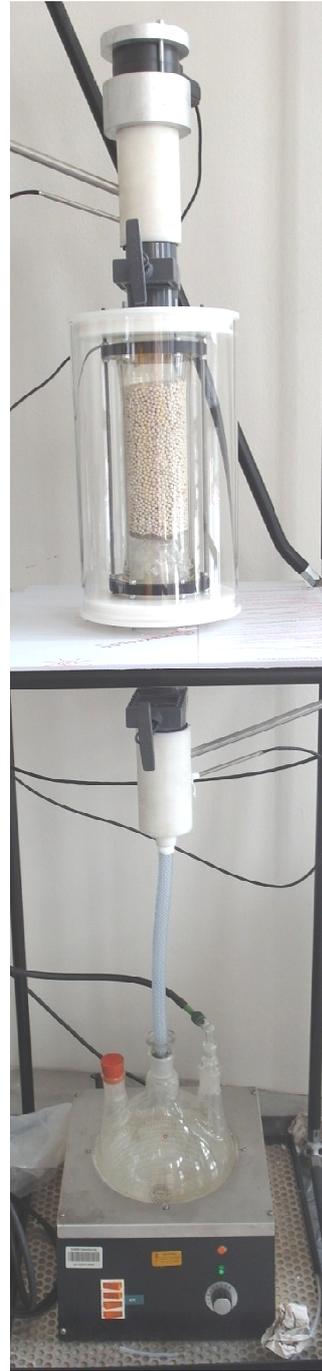


Abbildung 4.6 rechts: Zustand des Versuchsstandes nach Umbau

Im Anhang sind die Konstruktionszeichnungen der neu konstruierten Einzelkomponenten aufgeführt.

5 Versuchsdurchführung nach Umsetzung Konstruktiver Maßnahmen

In Abbildung 5.1 ist der Versuchsaufbau des Wärmespeichers mit Isolierung zu erkennen. Es werden jeweils drei Datensätze zur Adsorption und Desorption aufgenommen.



Abbildung 5.1 Zeolithwärmespeicher mit Plexiglasisolierung

5.1.1 Adsorption

Die beispielhaft im Folgenden aufgeführten Verläufe für Temperaturen und relative Luftfeuchten wurden am 01.06.2016 bei 24,5°C Umgebungstemperatur aufgenommen. Die Druckluftzufuhr war hierfür auf 1,5bar eingestellt.

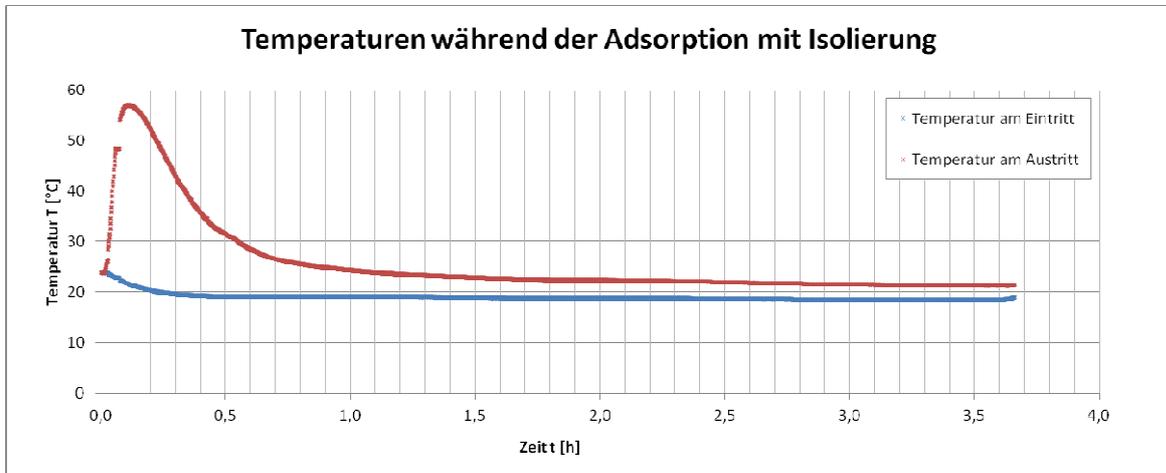


Abbildung 5.2 Temperaturverläufe während der Adsorption; mit Isolierung

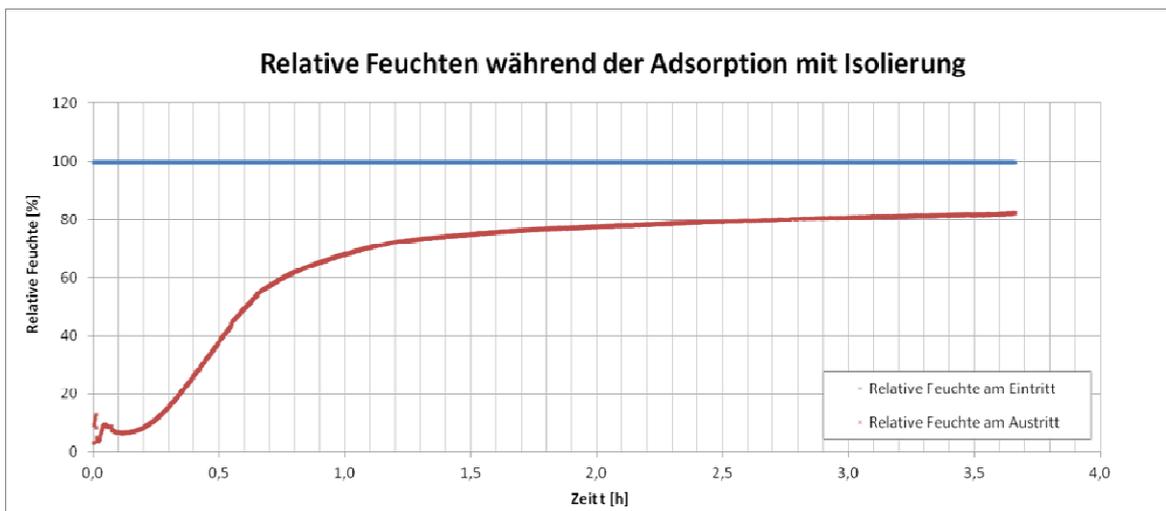


Abbildung 5.3 Verläufe der relativen Luftfeuchten während der Adsorption; mit Isolierung

Aufnahmen durch die Wärmebildkamera zeigen anschaulich den Zeitpunkt des maximalen Temperaturhubes (l.) und des abgeschlossenen Adsorptionsvorganges (r.).

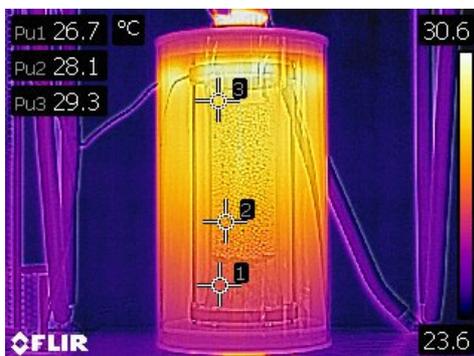


Abbildung 5.4 (links) Wärmebild des maximalen Temperaturhubes während der Adsorption

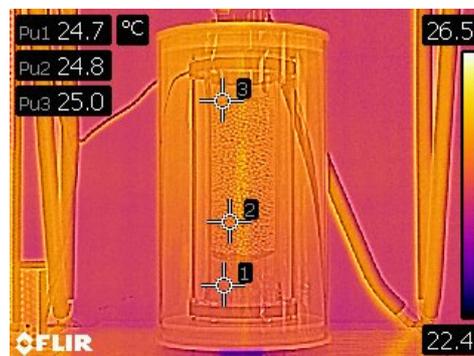


Abbildung 5.5 (rechts) Wärmebild nach Beendigung des Adsorptionsvorganges

5.1.2 Desorption

Der dargestellte Verlauf wurde am 02.06.2016 bei einer Umgebungstemperatur von 24,5°C aufgenommen. Die Druckluftzufuhr war hierbei auf 1,5 bar eingestellt.

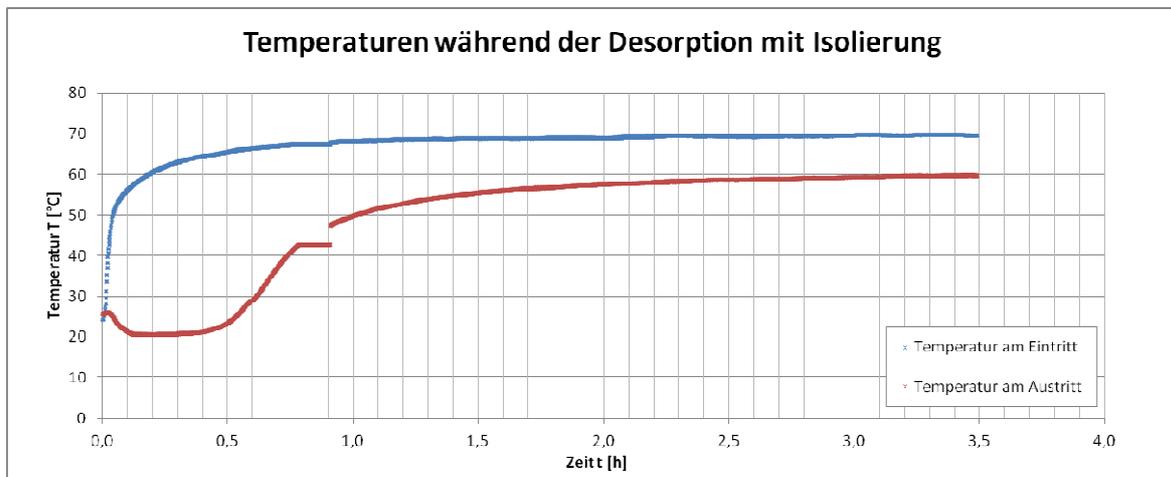


Abbildung 5.6 Temperaturverläufe während der Desorption; mit Isolierung

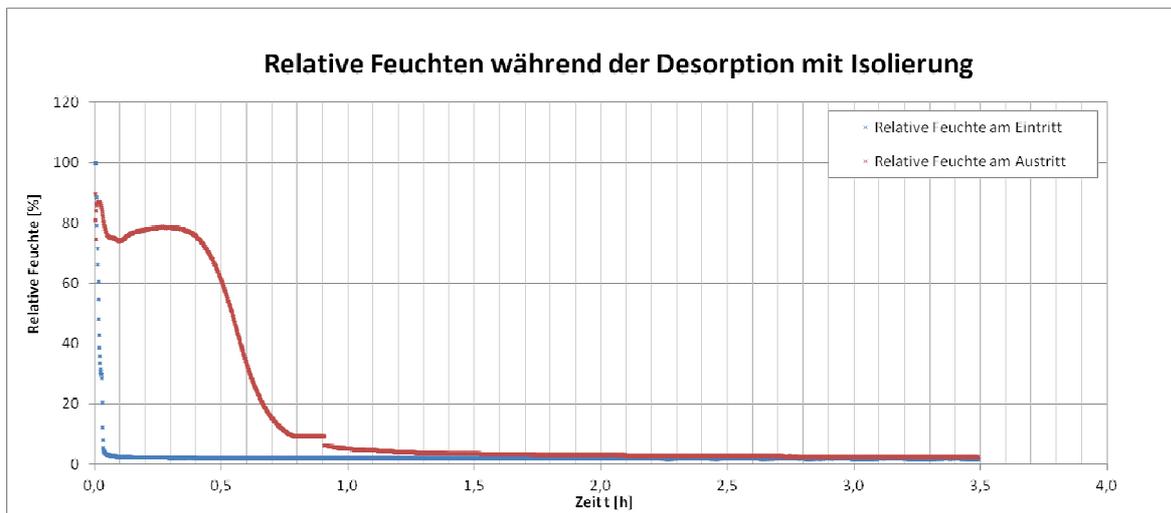


Abbildung 5.7 Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeiten während der Desorption; mit Isolierung

Im Zeitraum zwischen 0,8 und 0,9 Stunden ist ein Softwarefehler aufgetreten, welcher dazu geführt hat, dass die Messwerte als konstant bleibend registriert wurden. Dies ist jedoch real nicht der Fall gewesen.

Durch die Wärmebildkamera kann der Zeitpunkt des maximalen Temperaturhubes (l.) und dem vollständig abgeschlossenen Desorption (r.) veranschaulicht werden.

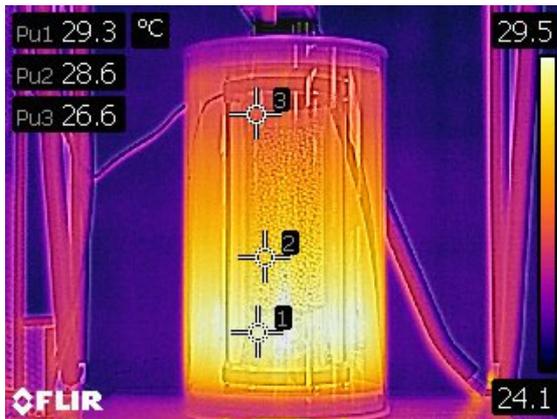


Abbildung 5.8 Wärmebild des maximalen Temperaturhubes während der Desorption

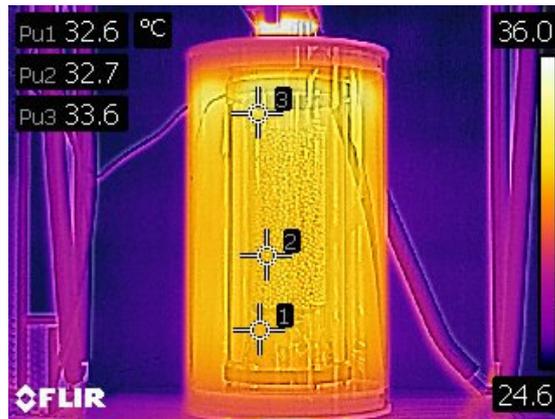


Abbildung 5.9 Wärmebild des abgeschlossenen Desorptionsvorganges

Gut sind hierbei die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten während des maximalen Temperaturhubes zu erkennen (links). Auch das nahezu vollständige Angleichen der Temperaturen nach Abschluss des Desorptionsvorganges ist deutlich erkennbar (rechts).

6 Auswertung

6.1 Vergleich der bleibenden Differenzen am Ende der Versuche

6.1.1 Adsorption

Der Vergleich der bleibenden Differenzen von Temperatur, relativen Feuchten und spezifischen Enthalpien am Ein- und Austritt des Versuchsstandes stellt sich am Ende der Adsorption folgendermaßen dar:

Tabelle 6.1 Vergleich der bleibenden Wertedifferenzen am Ende der Adsorption

Adsorption						
Versuchsaufbau	Datum	Versuchsdauer	Druckluft [bar]	$\vartheta_2 - \vartheta_1$ [°C]	$\phi_2 - \phi_1$ [%]	Δh_u [kJ/kg]
ursprünglicher Versuchsaufbau	03.08.2015	4h32min	1	3,465	-20,106	-3,183
	25.08.2015	4h5min	1,5	2,791	-16,387	-2,90420864
	24.05.2016	3h33min	1	2,753	-17,669	-2,09094
			Durchschnitt	3,003	-18,054	-2,726
nach Umbau; mit Isolierung	31.05.2016	4h32min	1	2,654	-16,293	-1,82042
	01.06.2016	3h35min	1,5	2,903	-18	-2,15843
	02.06.2016	3h45min	1,5	2,947	-18,112	-2,60509
			Durchschnitt	2,835	-17,468	-2,195

Zu erkennen ist hierbei, wie die bleibenden Differenzen nach der Neugestaltung des Versuchsstandes geringer ausfallen als bei der ursprünglichen Version der Versuchsanlage. Um Verlässliche Aussagen bezüglich der Wirksamkeit der zusätzlichen

Isolierung machen zu können, sind jedoch bei der Adsorption gegen Ende des Versuches die Temperaturdifferenzen zu gering.

In Balkendiagrammen sind die durchschnittlichen Differenzen von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und spezifischer Enthalpie der jeweils drei Versuchsdurchläufe gegenübergestellt:

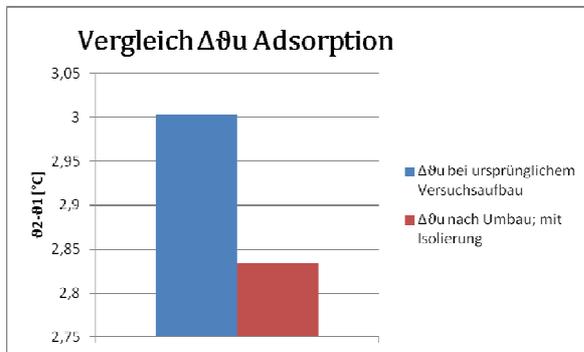


Abbildung 6.10 Gegenüberstellung der Temperaturdifferenzen am Ende der Adsorption vor und nach dem Umbau

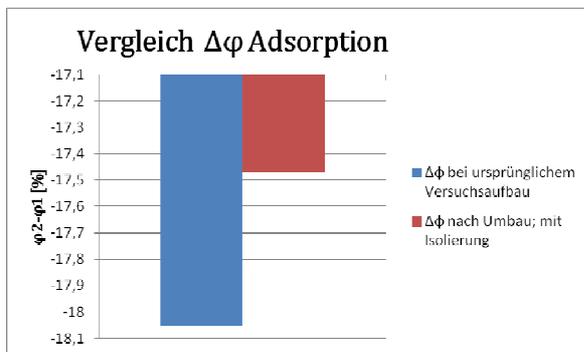


Abbildung 6.11 Gegenüberstellung der Differenzen der rel. Feuchte am Ende der Adsorption vor und nach dem Umbau

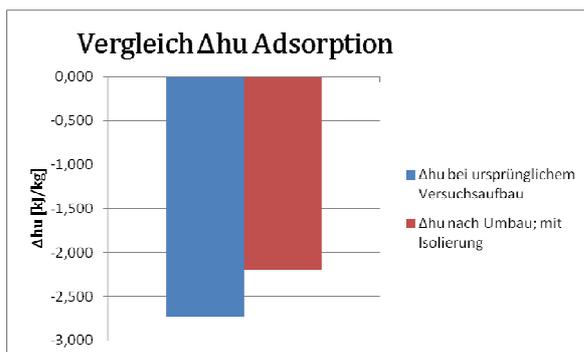


Abbildung 6.12 Gegenüberstellung der spez. Enthalpiedifferenzen am Ende der Adsorption vor und nach dem Umbau

6.1.2 Desorption

Am Ende der Desorptionsversuche sind durch die höheren Temperaturdifferenzen zur Umgebung die Verbesserungen gegenüber dem Ursprungsversuchsaufbau deutlicher zu erkennen. In rot dargestellt sind hierbei die Durchschnittswerte des ursprünglichen Versuchsaufbaues. Die durchschnittlichen Werte der Versuchsanlage nach der Umsetzung der Isolierungsmaßnahmen sind grün dargestellt.

Tabelle 6.2 Vergleich der bleibenden Wertedifferenzen am Ende der Adsorption

Desorption	Datum	Versuchsdauer		$\vartheta_2 - \vartheta_1$ [°C]	$\phi_2 - \phi_1$ [%]	Δh_u [kJ/kg]
ursprünglicher Versuchsaufbau	03.08.2015	2h59min	1	-18,897	2,562	17,6722049
	25.08.2015	2h32min	1,5	-16,259	1,806	15,3163567
	28.04.2016	2h4min	1	-23,567	1,5	27,4822
			Durchschnitt	-19,574	1,956	20,157
nach Umbau; mit Isolierung	31.05.2016	2h34min	1	-15,187	1,075	19,40965
	02.06.2016	3h29min	1,5	-9,776	0,644	11,06606
	03.06.2016	3h22min	1,5	-9,979	0,668	11,03187
			Durchschnitt	-11,647	0,796	13,836

Mit Hilfe von Balkendiagrammen lässt sich die Reduzierung der bleibenden Regeldifferenzen zum Ende der Versuche darstellen.

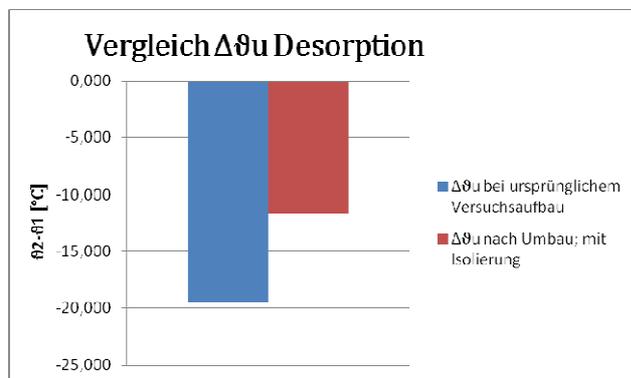


Abbildung 6.13 Gegenüberstellung der Temperaturdifferenzen am Ende der Desorption vor und nach dem Umbau

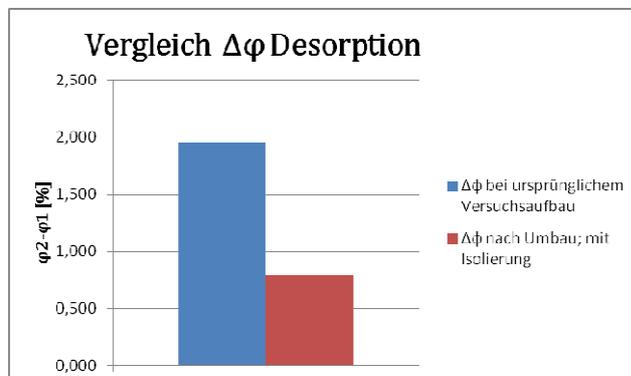


Abbildung 6.14 Gegenüberstellung der Differenzen der rel. Feuchte am Ende der Desorption vor und nach dem Umbau

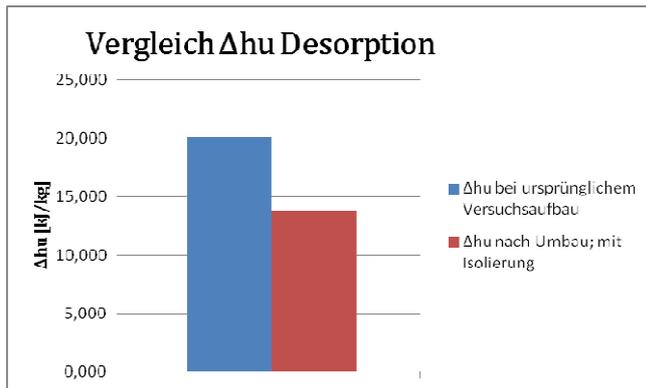


Abbildung 6.15 Gegenüberstellung der spez. Enthalpiedifferenzen am Ende der Desorption vor und nach dem Umbau

6.2 Betrachtung der Wärmeströme

Beim Ursprünglichen Versuchsaufbau wurde seitens Herrn Hoff (2015 S. 52) über folgende Gleichung der auf die Höhe des Zeolithwärmespeichers bezogene spezifische Wärmestrom [W/m] ermittelt:

$$\dot{q}_u = \frac{(\dot{H}_{ein} - \dot{H}_{aus})}{L} = \frac{\Delta h_u \cdot \dot{m}_l}{L} \quad (40)$$

Aus dem spezifischen Wärmestrom \dot{q}_u lässt sich wiederum der Wärmedurchgangskoeffizient k ermitteln (Marek, 2015 S. 113):

$$k = \frac{\dot{q}_u}{\pi \cdot d_i \cdot (\vartheta_u - \vartheta_1)} \quad (41)$$

Die Ergebnisse hierzu wurden von Hoff tabellarisch aufgeführt:

Tabelle 6.3 Wärmebetrachtung (Hoff, 2015 S. 52)

Versuch	Datum	Δhu [kJ/kg]	ϑ _u [°C]	ϑ ₁ [°C]	ϑ ₂ [°C]	ϑ _u - ϑ ₂ [°C]	m1 [m/s]	Q [W/m]	k Wert [W/(m ² *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

Nachfolgend sind die Ergebnisse aufgeführt, welche nach Neugestaltung des Versuchstandes mit Plexiglassolierung aufgenommen wurden.

Tabelle 6.4 Wärmebetrachtung mit Isolierung

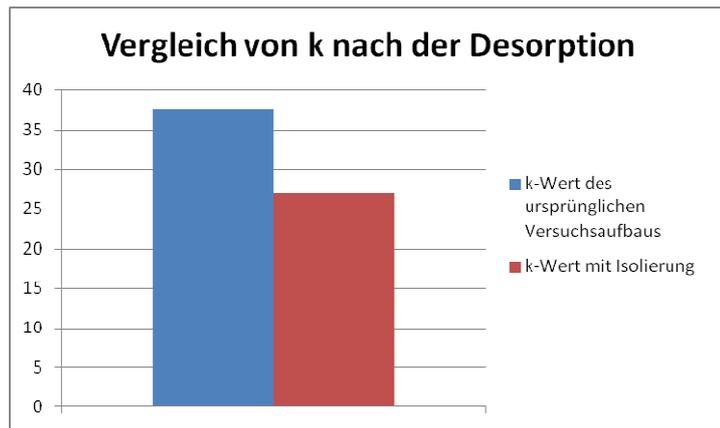
	Adsorption mit Isolierung			Desorption mit Isolierung		
	1	2	3	1	2	3
Versuch	1	2	3	1	2	3
Datum	31.05.2016	01.06.2016	02.06.2016	31.05.2016	02.06.2016	03.06.2016
Druck am Druckminderer [bar]	1	1,5	1,5	1	1,5	1,5
ϑ_u [°C]	25,8	22,5	24,6	20	25,5	25,5
ϑ_1 [°C]	21,568	18,498	19,808	77,001	69,609	69,285
ϑ_2 [°C]	24,222	21,401	22,755	61,814	59,833	59,306
$\vartheta_u - \vartheta_1$ [°C]	-4,232	-4,002	-4,792	57,001	44,109	43,785
$\vartheta_u - \vartheta_2$ [°C]	-1,578	-1,099	-1,845	41,814	34,333	33,806
logarithmische Temperaturdifferenz ΔT_m [°C]	-2,690	-2,246	-3,321	49,016	39,017	38,581
Δh_{12} [kJ/kg]	-2,8	-2,15843	-2,605	19,40965	11,06606	11,03187
m_1 [kg/s]	0,0057	0,00722	0,00692	0,00572	0,00712	0,00714
Q [W]	-15,960	-15,584	-18,027	111,023	78,790	78,768
q [W/m]	-51,484	-50,271	-58,150	358,139	254,162	254,089
Wärmedurchgangskoeffizient k	55,319	57,120	55,181	28,571	26,202	26,388
Maximaler Temperaturhub [°C]	47,069	38,57	59,12	-55,585	-49,387	-49,562
$\vartheta_2 - \vartheta_1$ [°C]	2,654	2,903	2,947	-15,187	-9,776	-9,979

Der Übersicht halber werden die durchschnittlichen Ergebnisse der spezifischen Wärmeströme und Wärmedurchgangskoeffizienten den durchschnittlichen Ergebnissen von Herrn Hoff gegenübergestellt.

Tabelle 6.5 Vergleich der Durchschnittlichen Werte für q und k vor und nach dem Umbau der Versuchsanlage

	Adsorption		Desorption	
	q [W/m]	k	q [W/m]	k
ursprünglicher Versuchsaufbau	-54,33	45,012	297,175	37,616
mit Plexiglassolierung	-53,302	55,873	288,797	27,054

Hierbei fällt auf, dass sich der k-Wert bei den Desorptionsversuchen mit der Isolierung gegenüber dem ursprünglichen Aufbau der Anlage verringert hat und somit auf eine bessere Wärmedämmung hindeutet. Das Ausmaß der Verbesserung bleibt jedoch hinter den theoretischen

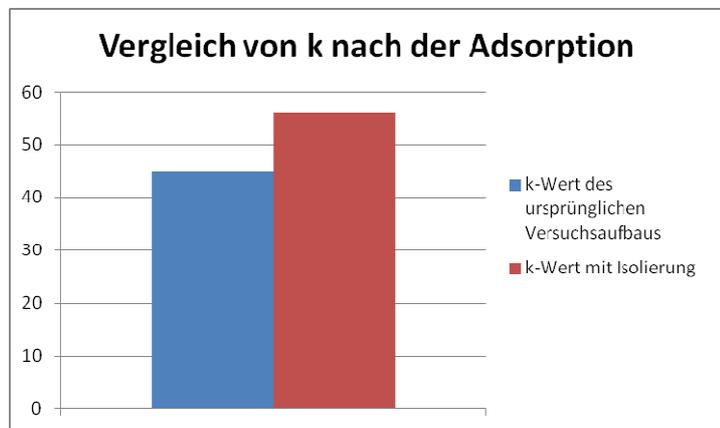


Erwartungen zurück. Gründe hierfür könnten sein, dass bei der ursprünglichen Berechnung

Abbildung 6.16 Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten nach der Desorption

die Wärmeübertragung lediglich über die zylindrischen Außenwände berechnet wurde. Die Wärmeleitung über die oberen und unteren Abdeckungen und deren Änderung des verwendeten Materials blieben unberücksichtigt. Zusätzlich denkbar wäre, dass die Messtechnik noch ein Potential bezüglich der Genauigkeit aufweist. Auch wurde der Einfluss der Wärmeübertragung durch Strahlung nicht beachtet. Spätere Versuche mit um die Versuchsanlage gewickelten wärmestrahlungreflektierenden Folien ergaben hier jedoch keinen merklichen Unterschied.

Bei den Adsorptionsversuchen hingegen ergibt sich das gegenteilige Ergebnis. Hier hat sich der Wert für k erhöht, was eine schlechtere Isolierung als zuvor bedeuten würde. Zurückzuführen ist dies auf die zu geringen Temperaturdifferenzen zwischen den Messwerten am



Ein- und Austritt des Wärmespeichers und der Umgebung. Dies führt dazu, dass

Abbildung 6.17 Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten nach der Adsorption

eine geringe Abweichung zwischen der abgelesenen und der tatsächlichen Umgebungstemperatur einen großen Einfluss auf den errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten hat. (Siehe hierzu Formel 51) Auch ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Temperaturmessung der Umgebungsluft nicht in direkter Umgebung zur Anlage gemessen wird, wodurch halleninterne Temperaturunterschiede unberücksichtigt bleiben. Auch andere dynamische Einflüsse, wie die tageszeitabhängige Sonneneinstrahlung, welche durch das Nachbargebäude reflektiert werden, können bei den geringen Temperaturdifferenzen eine Auswirkung auf die Messungen haben.

6.3 Korrektur der Messreihen

Die in Kapitel 3.4 veranschaulichte Bereinigung der aufgenommenen Messwerte, kann an dieser Stelle gleichermaßen angewendet werden.

Für die mit Isolierung aufgenommenen Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit ist es zunächst nötig erneut die spezifischen Enthalpiedifferenzen zwischen Ein- und Austritt in Abhängigkeit der Differenzen zwischen Umgebungs- und Austrittstemperatur darzustellen.

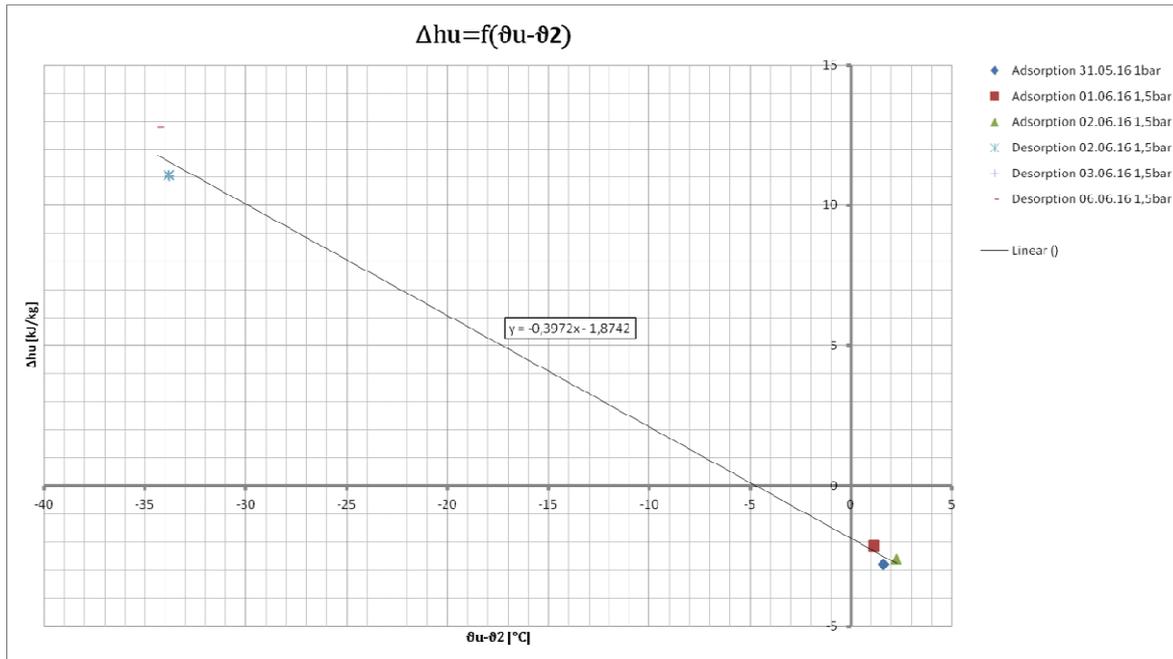


Abbildung 6.18 Differenz der spez. Enthalpie über Differenz der Umgebungstemperatur zur Austrittstemperatur

Die neue Funktion der Ausgleichsgeraden lautet:

$$\Delta h_u = -0,3972 \cdot (\vartheta_u - \vartheta_2) - 1,18742 \quad (42)$$

Auf Grund der geringeren Verluste durch die Isolierung verläuft die neue Ausgleichsgerade mit einer flacheren Steigung als die zuvor von Herrn Hoff ermittelte Gerade und weist dadurch auf eine bessere Isolierung der Anlage hin.

Im Weiteren werden analog zum in Kapitel 3.4 beschriebenen Vorgehen die Messwerte für Temperatur und relativer Feuchte korrigiert und als bereinigte Verläufe Diagrammen dargestellt.

Es wurden hierfür die Diagramme aus Kapitel 5 als Grundlage verwendet.

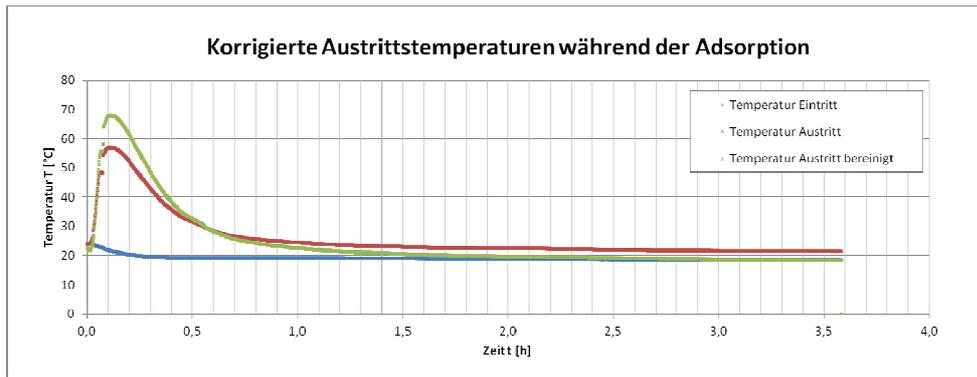


Abbildung 6.19 Bereinigte Austrittstemperaturen während der Adsorption

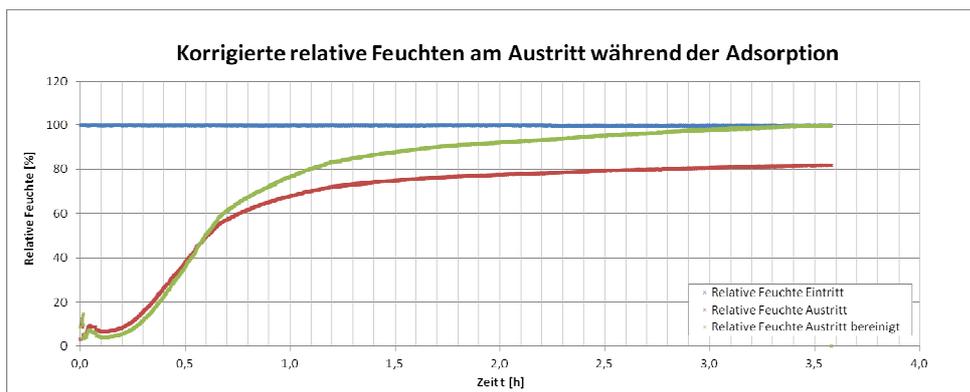


Abbildung 6.20 Bereinigte relative Feuchten am Austritt während der Adsorption

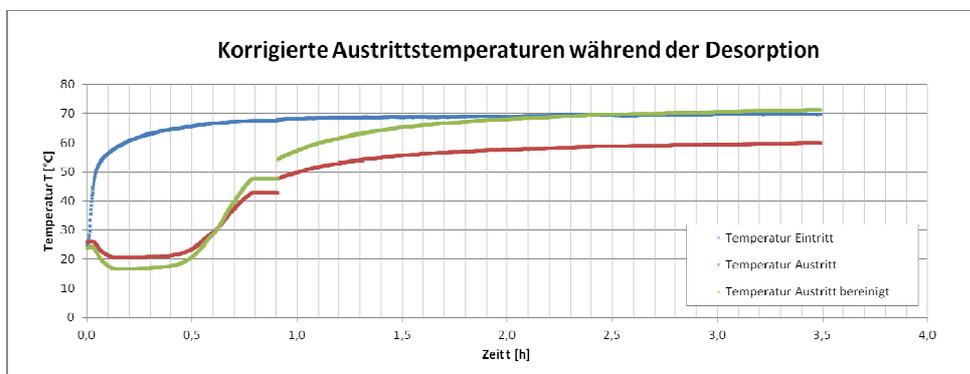


Abbildung 6.21 Bereinigte Austrittstemperaturen während der Desorption

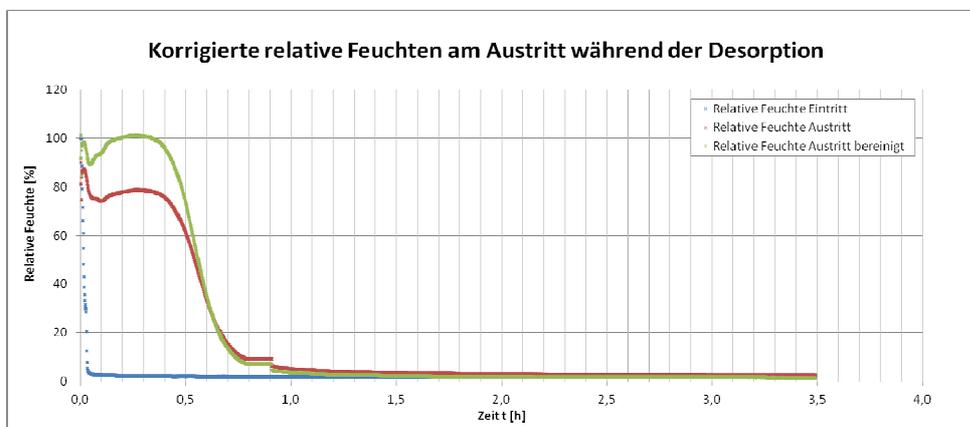


Abbildung 6.22 Bereinigte relative Feuchten am Austritt während der Desorption

Nach der Datenbereinigung mit der neuen Geradengleichung geht die bleibende Temperaturdifferenz und Differenz der relativen Feuchten zwischen Ein- und Austritt gegen null und entspricht so den aus der Literatur hervorgehenden zu erwartenden Ergebnissen.

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

Anhand von eigenen Messungen an der ursprünglichen Versuchsanlage konnten die in einer vorangegangenen Bachelorarbeit beschriebenen bleibenden Differenzen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit zwischen Ein- und Austritt aus der Versuchsanlage bestätigt werden.

Durch Berechnungen auf Grundlage der Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion bei Hohlzylindern wurde festgestellt, dass sich der Wärmeverlust und die damit verbundenen Differenzen deutlich reduzieren ließen indem eine isolierende Hülle mit dazwischenliegendem Luftspalt installiert wird. Bei der Materialauswahl für die äußere Isolierung wurde sowohl auf eine geringe Wärmeleitfähigkeit als auch auf Transparenz Wert gelegt. Die Wahl fiel hierbei auf Polymethylmethacrylat (PMMA/Acrylglas). Die berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten entsprechen in der Größenordnung denen, welche im Bauwesen als Richtwert genannt werden.

Bei der Neukonstruktion der Versuchsanlage wurde neben der Transparenz der Isolierung beachtet, dass der Wärmespeicher im späteren Einsatz sowohl mit als auch ohne Isolierung betrieben werden kann. Ebenfalls wurde der gesamte Speicher auf eine besser einsehbare Höhe installiert. Die Messstellen am Ein- und Austritt wurden näher an den Wärmespeicher gerückt und sind für spätere Umbau-, Reparatur- und Wartungsarbeiten schnell von der Gesamtkonstruktion ablösbar. Durch die Halteplatte auf welcher der Wärmespeicher steht und die damit verbundene untere Messstelle ruht das Gewicht der Gesamtkonstruktion nicht länger auf dem empfindlichen Glaskolben am Boden der Anlage. Die oberen und unteren Begrenzungen des Zeolithwärmespeichers wurden auf Grund des geringeren Gewichtes und der besseren Isoliereigenschaften statt wie zuvor aus Edelstahl aus Polyoxymethylen (POM) gefertigt.

Nach Umsetzung der Konstruktion wurde der Einfluss der installierten Isolierung durch Aufnahme neuer Messungen beim Ad- und Desorptionsvorgang untersucht. Diese ergaben, dass am Ende der Versuche lediglich bei der Desorption eine Verringerung der bleibenden Differenzen von Temperatur und relativer Feuchte zwischen Ein- und Austritt zu verzeichnen war. Bei der Befeuchtung des Minerals dagegen war nach Abschluss der exothermen Reaktion im Inneren noch immer eine deutliche bleibende Differenz der Messwerte erkennbar. Lediglich der maximale Temperaturhub war in beiden Betriebsweisen größer als zuvor. Zurückzuführen ist dies auf die geringen Temperaturdifferenzen zwischen den Werten innerhalb des Wärmespeichers und der Umgebung gegen Ende des Adsorptionsversuches. Diese geringen Differenzen zur Umgebung führen dazu, dass äußere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung oder andere dynamische Einflüsse die Messungen verfälschen können.

Die Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten k durch Betrachtung der Änderung der spezifischen Enthalpien zwischen Ein- und Austritt ergab, dass bei der Desorption eine Reduzierung des k -Wertes erzielt werden konnte. Jedoch bleibt die Verbesserung deutlich hinter den zu Anfang durch Berechnung erzeugten Erwartungen zurück.

Gründe hierfür könnten sein, dass bei der ursprünglichen Berechnung die Wärmeübertragung lediglich über die zylindrischen Außenwände berechnet wurde. Die Wärmeleitung über die oberen und unteren Abdeckungen und deren Änderung des verwendeten Materials blieben unberücksichtigt. Zusätzlich denkbar wäre, dass die Messtechnik noch ein Potential bezüglich der Genauigkeit aufweist.

Die ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten am Ende der Adsorptionsvorgänge wiesen keine Unterschiede zu den ursprünglichen Werten auf. Hier sind die Messwertdifferenzen zu gering um aussagekräftige Ergebnisse zu generieren.

Die Bereinigung der Messwertverläufe durch Verwendung einer neuen flacher verlaufenden Geradengleichung, basierend auf der linearen Abhängigkeit der spezifischen Enthalpiedifferenzen zwischen Ein- und Austritt und der Differenzen zwischen Umgebungs- und Austrittstemperatur, führt dazu, dass die bleibenden Differenzen am Ende der Versuche gegen null gehen. Somit kann sowohl bei der Desorption als auch bei der Adsorption eine Verbesserung der Isolation der Versuchsanlage nachgewiesen werden.

7.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse deuten auf weiteres Optimierungspotential hin. Es konnte die Isolierung des Wärmespeichers verbessert und damit der Wärmeübergang reduziert werden, jedoch weisen die aufgezeichneten Daten in ihrer Charakteristik noch immer Unterschiede zu den in der Literatur dargestellten zu erwartenden Verläufen auf. Durch die Bereinigung der aufgenommenen Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit konnte nachgewiesen werden, dass weitere Isoliermaßnahmen erforderlich sind um den Versuchsstand optimal betreiben zu können. Denkbar wäre hier die Erprobung einer Acrylglasisolierung mit gleichbleibendem Innendurchmesser, jedoch einer größeren Wandstärke als die zum jetzigen Zeitpunkt installierte Isolierung. So könnte der Wärmedurchgangskoeffizient der Isolierung ohne großen Konstruktionsaufwand reduziert werden. Mit größerem Aufwand verbunden wäre das Installieren weiterer transparenter Isolierschichten mit dazwischenliegenden Luftspalten.

Bei der Aufnahme der Messwertverläufe kam es vor, dass die Datenverarbeitungssoftware über einen Zeitraum von bis zu 20 Minuten fälschlicherweise keine Veränderung der Messwerte aufgezeichnet hat. Eine Analyse und Korrektur der fehlerhaften Abläufe innerhalb des Programms ist unerlässlich um zu jedem Zeitpunkt während des jeweiligen Versuches verlässliche Messwerte zu erhalten.

Für die theoretische Betrachtung der Wärmeströme ist es sinnvoll eine Simulation des kompletten thermochemischen Speichers zu erstellen. Hier wäre es möglich auch die Einflüsse der instationären Wärmeleitung sowie der Wärmestrahlung mit einzubeziehen.

Zur Veranschaulichung der Wärmeübergänge könnten weitere Temperatursensoren direkt an die Glaswandung des Wärmespeichers sowie an der Innen- und Außenseite der Isolierschicht angebracht werden. Im Laborbetrieb könnten auf diese Weise die praktisch ermittelten Temperaturunterschiede graphisch aufgezeichnet und mit der Theorie verglichen werden.

Literaturverzeichnis

BaunetzWissen. [Online] BauNetz Media GmbH.

http://www.baunetzwissen.de/impressum/impressum_37651.html.

C.Otto Gehrckens GmbH & Co. KG. *Einbauräume für O-Ringe.* <http://www.cog.de/oringeprodukte/einbauraeume-der-o-ringe/tabellarisch.html>.

Gebt ihnen Kügelchen . **Asendorpf, Dirk.** 2010. Nr. 10, Hamburg : Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG, 2010.

Hauer, Andreas. 2002. *Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen.* Berlin : Technische Universität Berlin, 2002. Dissertation.

Hoff, Jörn Malte. 2015. *Untersuchung der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge eines thermochemischen Speichers.* Hamburg : Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015.

HUG Industrietechnik und Arbeitssicherheit GmbH. *O-Ring Materialauswahl bei Luft als Medium.* http://www.hug-technik.com/oring_materialauswahl.html#LUFT.

Ingenieure, Verein Deutscher. 1997. *VDI-Wärmeatlas.* s.l. : Springer Verlag, 1997. Bd. 11.

Leder, A. *Grundlagen der Strömungsmechanik.* Universität Rostock : s.n.

Marek, Rudi. 2015. *Praxis der Wärmeübertragung.* Deggendorf : Carl Hanser Verlag München, 2015.

Verein Deutscher Ingenieure. 1997. *VDI-Wärmeatlas.* s.l. : Springer Verlag, 1997. Bd. 11.

von Böckh, Peter. 2015. *Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis.* Karlsruhe : Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2015. Bd. 6.

Wagner, Walter. 2012. *Strömung und Druckverlust.* s.l. : Vogel Business Media, 2012.

Anhang

A 1 Messwerte der Adsorption

A 1.1 erster Versuch (31.05.2016)

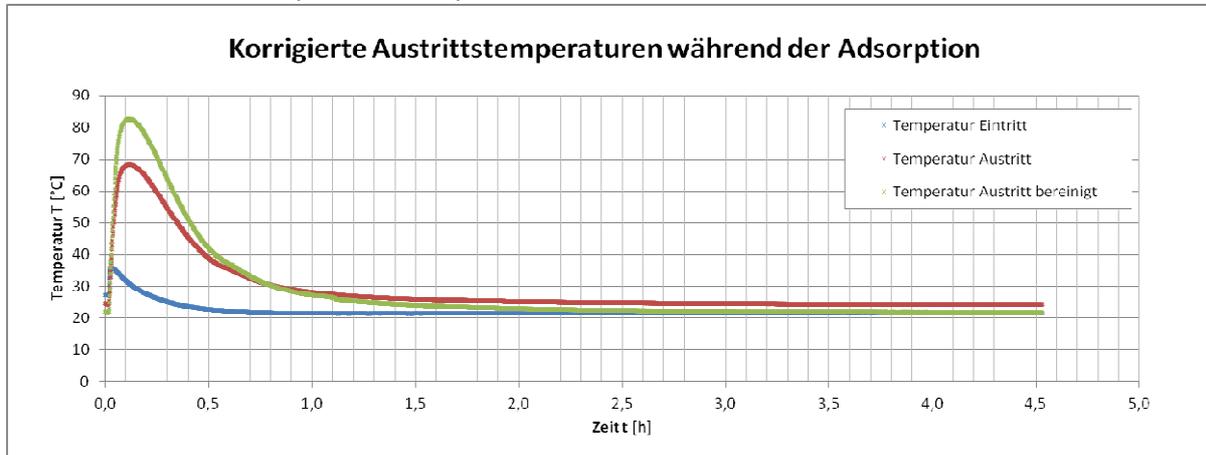


Abbildung A.1 Bereinigte Temperaturen am Austritt während der Adsorption (31.05.2016)

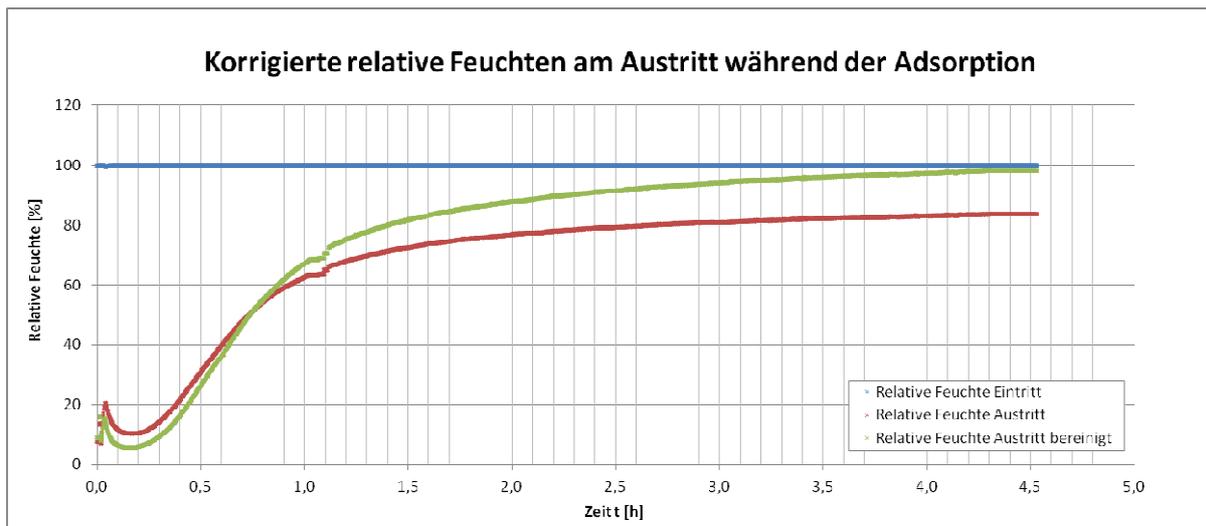


Abbildung A.2 Bereinigte relative Feuchten am Austritt während der Adsorption (31.05.2016)

A 1.2 dritter Versuch (02.06.2016)

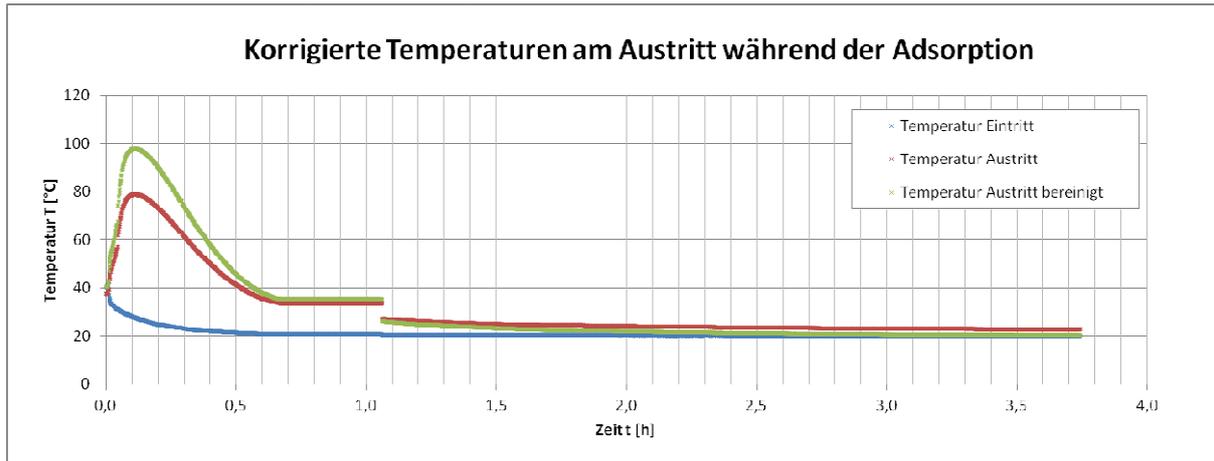


Abbildung A.3 Bereinigte Temperaturen am Austritt während der Adsorption (02.06.2016)

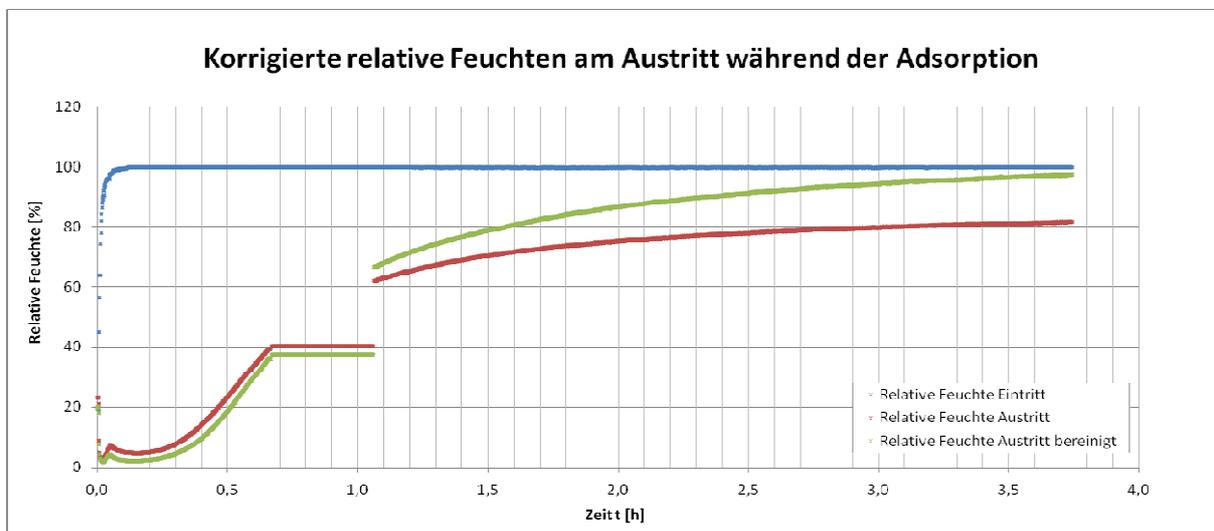


Abbildung A.4 Bereinigte relative Feuchten am Austritt während der Adsorption (02.06.2016)

A 2 Messwerte Desorption

A 2.1 erster Versuch (31.05.2016)

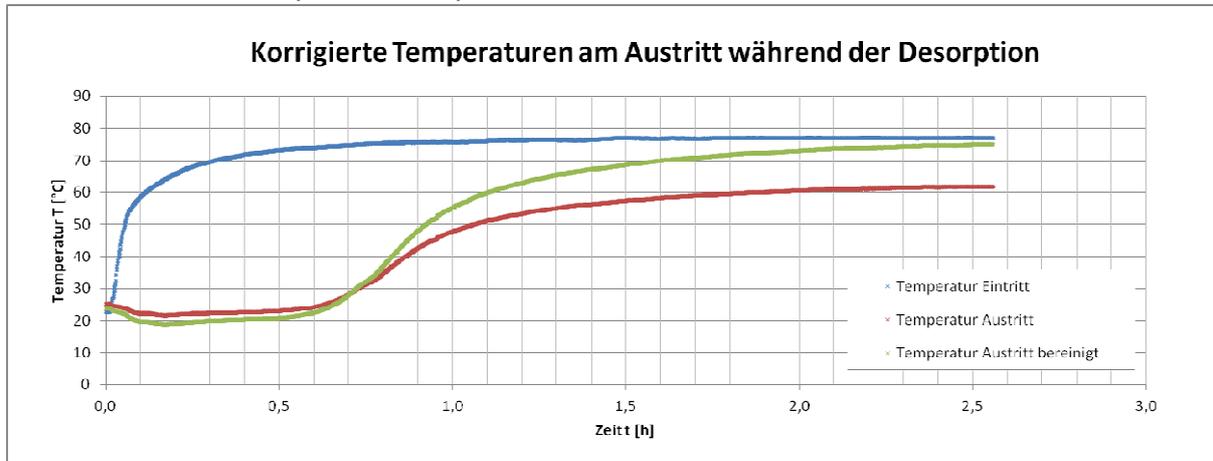


Abbildung A.5 Bereinigte Temperaturen am Austritt während der Desorption (31.05.2016)

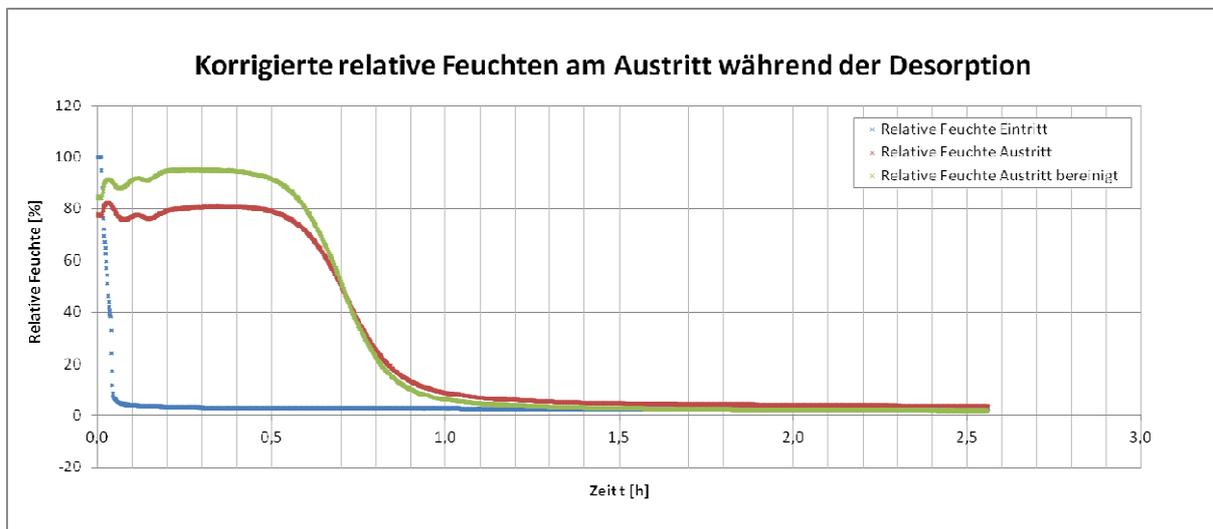


Abbildung A.6 Bereinigte relative Feuchten am Austritt während der Desorption (31.05.2016)

A 2.2 dritter Versuch (03.06.2016)

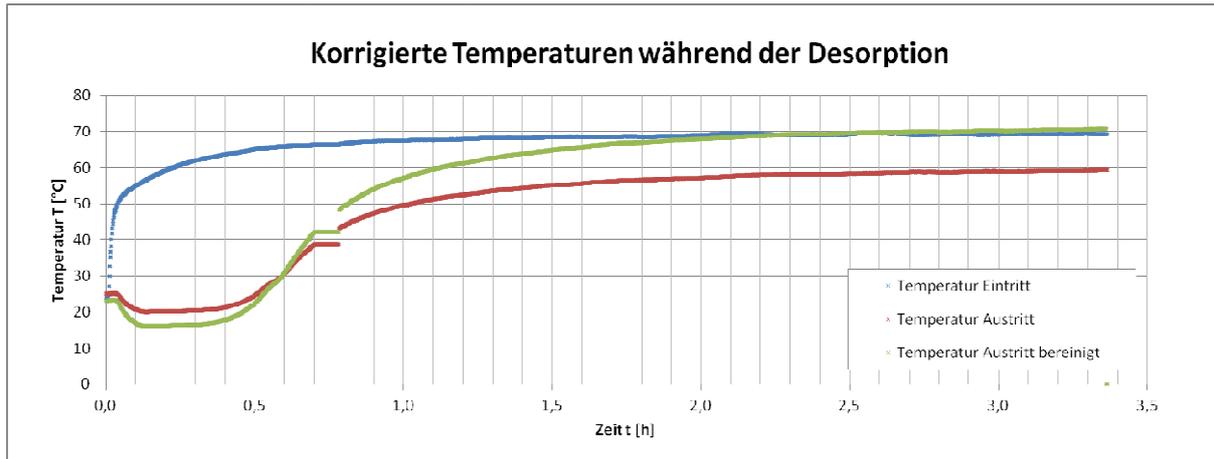


Abbildung A.7 Bereinigte Temperaturen am Austritt während der Desorption (03.06.2016)

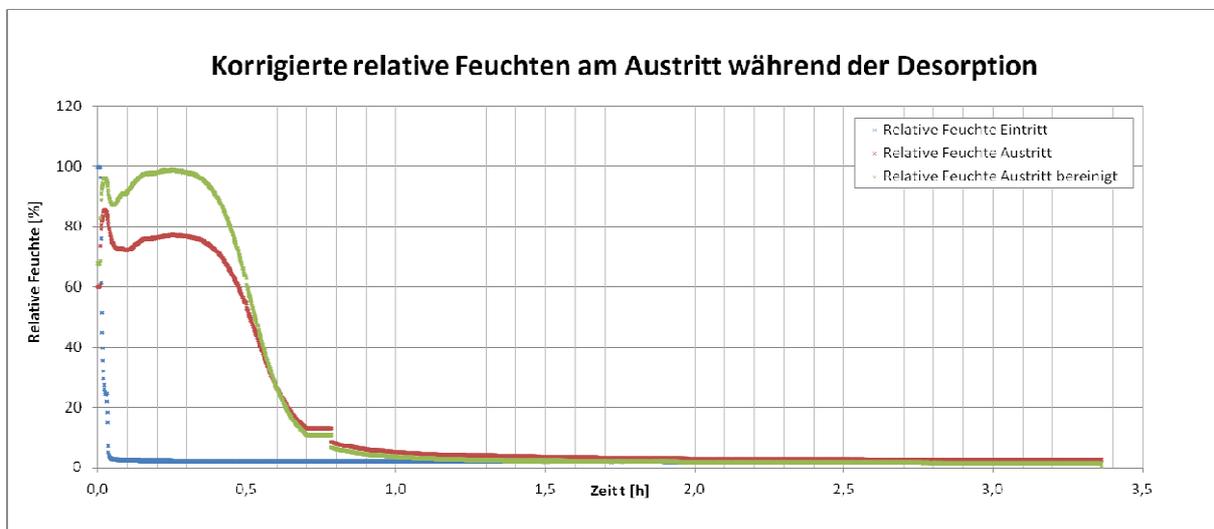
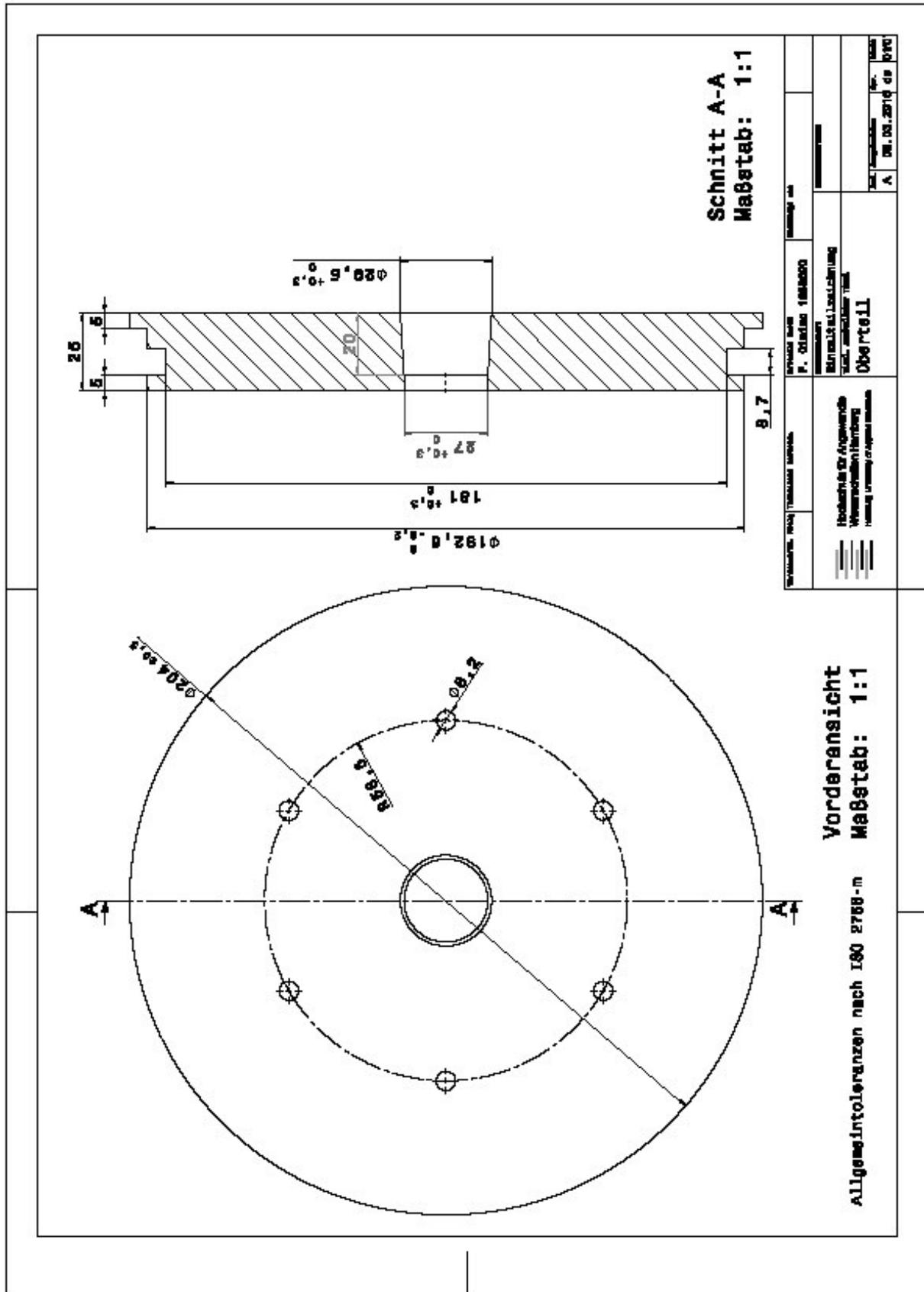


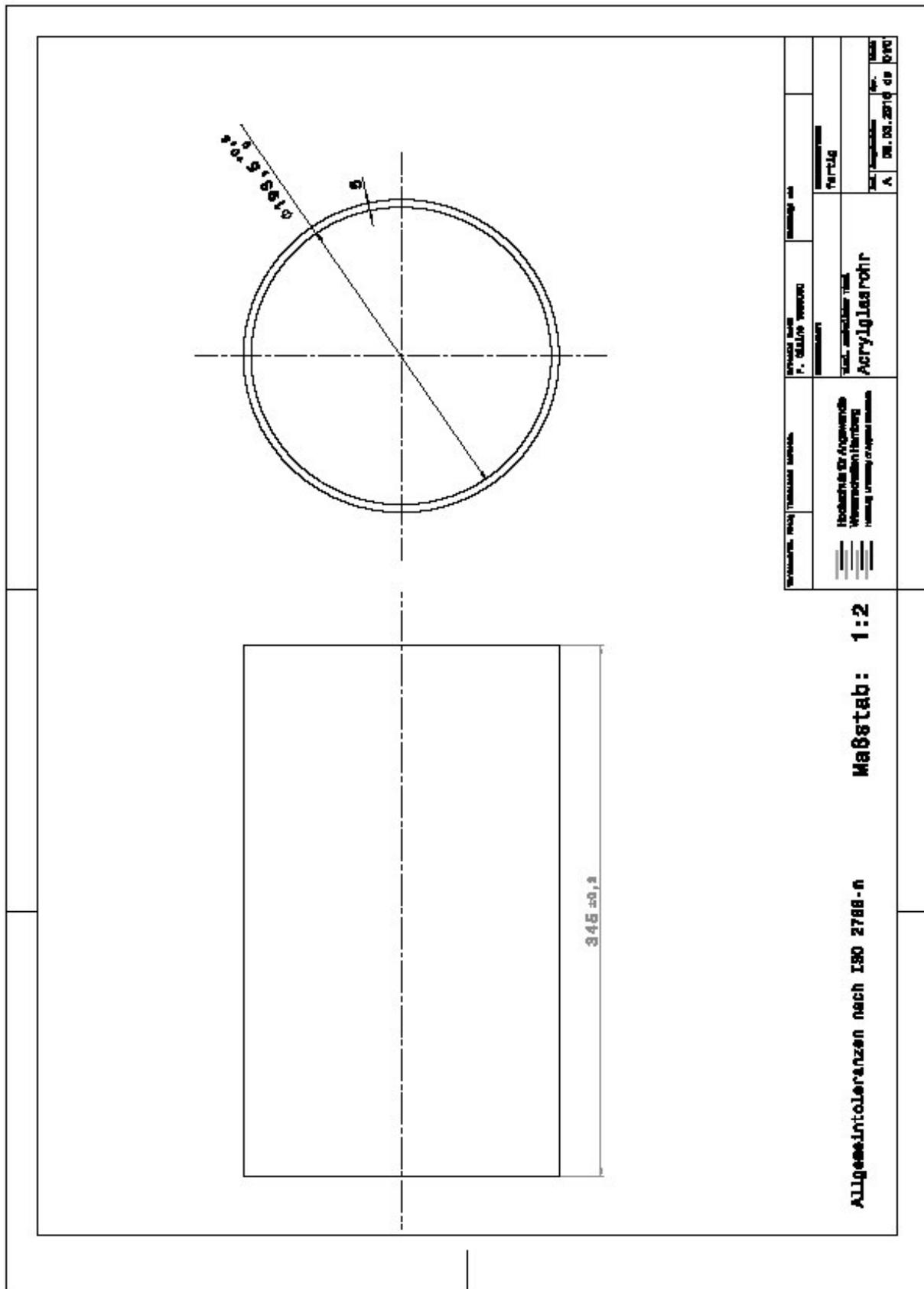
Abbildung A.8 Bereinigte relative Feuchten am Austritt während der Desorption (03.06.2016)

A 3 Technische Zeichnungen

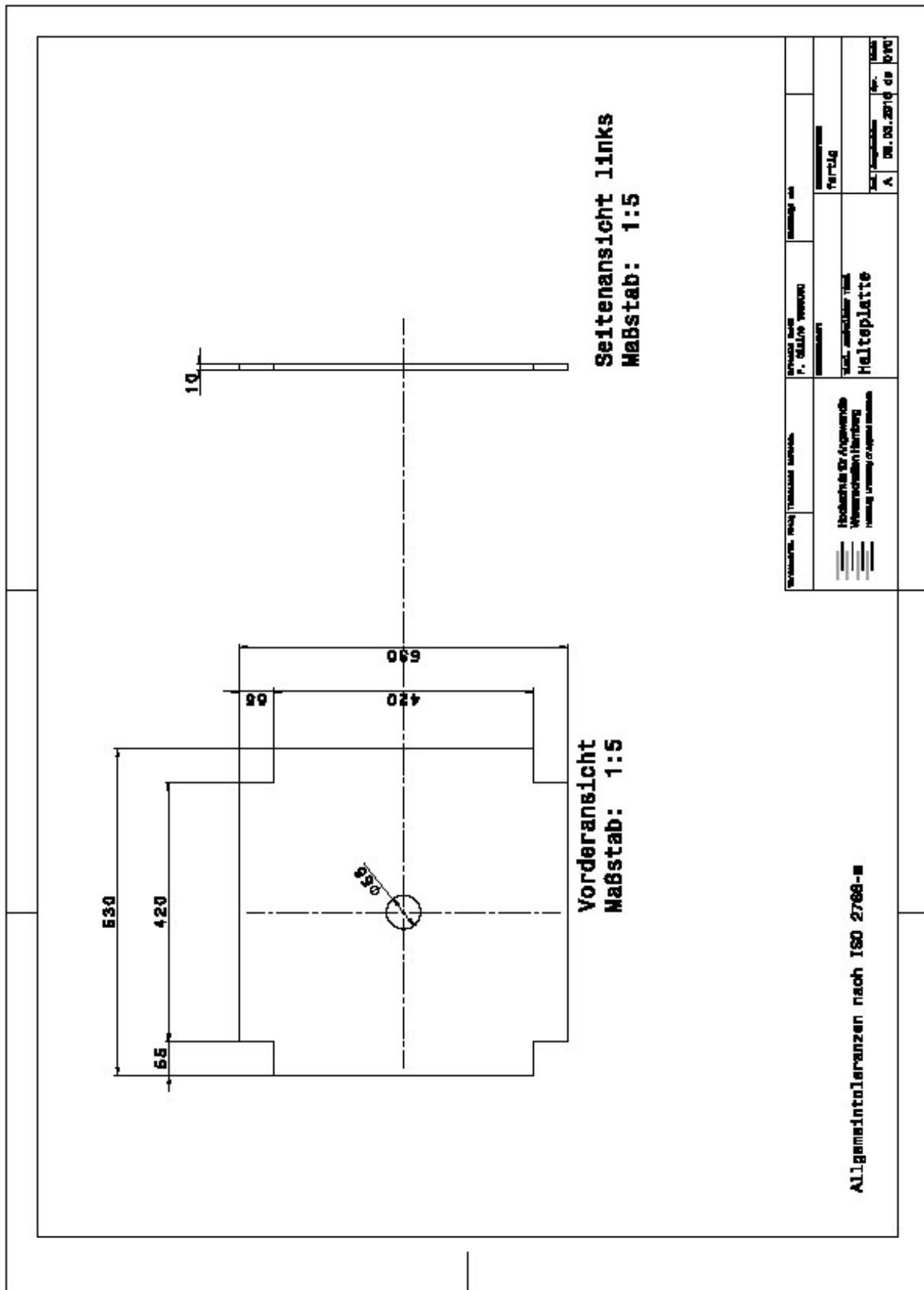
A 3.1 oberer Deckel



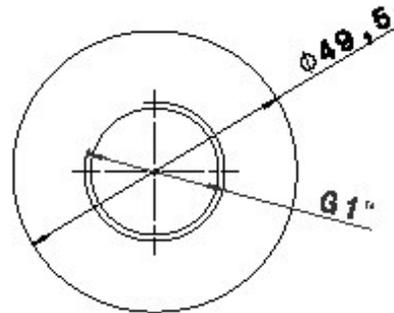
A 3.3 Acrylglasisolierung



A 3.4 Halteplatte



A 3.5 Anschlussadapter



Vorderansicht
Maßstab: 1:1



Draufsicht
Maßstab: 1:1

Allgemeintoleranzen nach ISO 2768-m

numer. abt. IEA	technische referenz BA	erstellt durch F.Ciarro 1958090	genehmigt von Herr
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Zeichnungstyp Einzelteilzeichnung	Zeichnungszustand erstellt
		Schlauchadapter	
		Art. A	Angelegtes Datum 12.03.2018
		Op. ds	Blatt 01/01

A 4 Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

<u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u>		
Hiermit versichere ich,		
Name:	<u>Cimino</u>	
Vorname:	<u>Fabio</u>	
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:		
Untersuchung und Optimierung der Wärmeverluste eines thermochemischen Speichers		
ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.		
<i>- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -</i>		
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:		
<u>Hamburg</u>	<u>09.06.2016</u>	
Ort	Datum	Unterschrift im Original