



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Kalttestphase eines sensiblen Hochtemperaturwärmetauschers

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider

(E302 - Institut für Energietechnik und Thermodynamik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Josef Gatterer, BSc

0926187

Mariazellerstraße 7

3200 Ober-Grafendorf

Wien, im Jänner 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Jänner 2018

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeiter der Versuchsanlage am Standort Arsenal für die gute und produktive Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt auch Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider für die Möglichkeit diese Arbeit am Institut für Energietechnik und Thermodynamik schreiben zu können, sowie für die Unterstützung bei theoretischen Fragestellungen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Studienkollegen mit denen ich während meiner Zeit an der TU Wien viele schöne und unvergessliche Stunden verbrachte habe. An dieser Stelle möchte ich mich namentlich bei Andreas Ruthmeier und Stefan Schoder bedanken.

Ich möchte diesen Anlass vor allem nutzen mich bei meinen Eltern zu bedanken die mir dieses Studium ermöglicht haben und mich zu jenen Menschen machten der ich heute bin.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meiner Freundin welche mich durch viele schwierige Stunden begleitet hat und mit immer eine positive Unterstützung war.

Kurzfassung

Diese Arbeit begleitet die Kaltversuchsphase eines thermischen Energiespeicher-Prototypen der TU Wien. Die Hauptkomponente stellt dabei ein sensibler Wärmetauscher dar, welcher als Speichermedium Sand führt und dadurch den Namen SandTES trägt. Um eine sichere und zuverlässige Bedienung dieser $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ Anlage auch für den Hochtemperaturbereich zu gewährleisten werden verschiedenste Versuche in einer Kaltversuchsphase absolviert.

In dieser Arbeit werden alle durchgeführten Versuche beschrieben und analysiert. Auch durchgeführte Arbeiten an der Anlage sowie Vorbereitungen für die Heißphase werden angeführt.

Abstract

This work accompanies the cold test phase of a thermal energy storage prototype of the Vienna University of Technology. The main component is a sensitive heat exchanger, which carries sand as Hot Storage Media and thus bears the name SandTES. In order to ensure a safe and reliable operation of this $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ system also for the high temperature range, various tests are carried out in a cold test phase.

In this thesis, all experiments carried out are described and analyzed. Also realized work on the plant as well as preparations for the hot phase are given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Energiespeicherarten	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Thermodynamische Grundbegriffe	5
2.1.1	Thermische Energie	5
2.1.2	Wärmeübertragung	5
2.1.3	Wärmeverlust und Dämmung	6
2.1.4	Sensible thermische Energiespeicher	6
2.2	Einführung in die Wirbelschichttechnik	7
3	Wirbelschichten	9
3.1	Kategorisierung von Partikel	9
3.1.1	Partikelform und Partikelgröße	9
3.1.2	Porosität	11
3.2	Zustandsbereiche von Wirbelschichten	11
3.2.1	Einteilung nach Geldart	13
3.3	Druckverlust	14
3.3.1	Druckabfall im Festbett	14
3.3.2	Druckabfall in der Wirbelschicht	15
3.4	Lockerungspunkt	16
3.5	Zustandsdiagramm nach Reh	19
3.6	Gasblasen in Wirbelschichten	21
3.7	Feststoffdurchmischung in Wirbelschichten	25
4	SandTES-Konzept	29
4.1	Schlüsseltechnologien	29
4.1.1	Energiespeichermedium	29
4.1.2	Fluidisations-Konzept	31
5	Beschreibung der Versuchsanlage	35
5.1	Technische Komponenten der Anlage	35
5.1.1	Wärmetauscher HEX	37
5.1.2	Gebälse	39
5.1.3	Rekuperator	39
5.1.4	Saugzug	41
5.1.5	Kompressor	41
5.1.6	Luftverrohrung	42
5.1.7	Förderanlage	42

5.1.8	Speichersilos	44
5.1.9	Messcontainer und Leitsystem	44
6	Durchgeführte Versuche	47
6.1	Rückstau-Versuch	47
6.2	Dynamikversuche	48
6.2.1	Start-Stop Versuch	48
6.2.1.1	Durchführung Start-Stop Versuch	49
6.2.1.2	Ergebnisse Start-Stop Versuch	59
6.2.2	Richtungswechsel-Versuch	60
6.2.2.1	Durchführung Richtungswechsel-Versuch	62
6.2.2.2	Ergebnisse Richtungswechsel-Versuch	65
6.2.3	Düsenboden-Versuch	66
6.2.3.1	Durchführung Düsenboden-Versuch	68
6.2.3.2	Ergebnisse Düsenboden-Versuch	76
6.2.4	Umbau	78
6.2.5	Überprüfung der Schneckenkennlinie	79
6.2.5.1	Durchführung Schneckenkennlinien-Versuch	80
6.2.5.2	Ergebnisse Schneckenkennlinien-Versuch	81
6.2.6	Rückstauversuch 2.0	81
6.2.6.1	Durchführung Rückstauversuch 2.0	83
6.2.6.2	Einfluss der Wärmetauscher-Höhe auf den Rückstau	87
6.2.6.3	Ergebnisse Rückstauversuch 2.0	91
6.2.7	Düsenboden-Versuch 2.0	92
6.2.7.1	Durchführung Düsenboden-Versuch 2.0	92
6.2.7.2	Ergebnisse Düsenboden-Versuch 2.0	100
7	Fazit und abschließende Worte	103
7.1	Gesammelte Erfahrungen und Optimierungspotential	103
7.1.1	Feuchtigkeit	103
7.1.2	Sandtransport- und Ablagerungen in der Luftverrohrung	104
7.1.3	Verstopfungen an der Saugzuganlage	106
7.2	Mögliche Einsatzgebiete SandTES-Konzept	107
7.3	Ausblick	108
A	Anhang1	109
	Abkürzungsverzeichnis	117
	Literaturverzeichnis	120

Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	125

1. Einleitung

Die Veränderung des Weltklimas und seine Folgen gehören heute zu den größten gesellschaftlichen Herausforderungen für Gegenwart und Zukunft. Werden hier keine einschneidenden Gegenmaßnahmen ergriffen, wird eine weitere signifikante Erhöhung der CO_2 Konzentration zu einer Temperaturerhöhung der Erde mit unvorhersehbaren Folgen und Gefahren führen.

Dieser CO_2 Anstieg und die damit einhergehenden Veränderungen im Ökosystem Erde lassen den Ruf nach einer einschlägigen Änderung in der Energieversorgung immer lauter werden. Vor allem die weitverbreitete Nutzung der schwindenden fossilen Energiequellen, welche bei ihrer Verbrennung unweigerlich zu einer Erhöhung der Treibhausgase führen, sollen durch umweltschonende Alternativen ersetzt werden.

Bereits heute ist durch den stetig wachsenden Energieverbrauch der Weltbevölkerung sowie die Einbindung von regenerativen Methoden eine Versorgung ohne Energiespeicherung unmöglich.

Das unter Umständen ambitionierte Vorhaben von Gesellschaft und Politik alternative Energiequellen wie zum Beispiel Sonnen- oder Windenergie zukünftig stärker in die Energieversorgung einzubinden, lässt Speichermöglichkeiten immer mehr in den Fokus der Energiewirtschaft rücken. Um auf diese diskontinuierliche Energiebereitstellung reagieren zu können ist eine breite Palette an Speichermöglichkeiten ein zentraler Baustein für die künftige Bereitstellung von Energie.

1.1. Energiespeicherarten

Die grundlegende Funktionsweise der verschiedensten Energiespeicher ist immer gleich und kann in die Prozesse:

- Laden
- Speichern und
- Entladen

eingeteilt werden. In Abbildung 1.1 wird dies deutlich dargestellt



Abbildung 1.1.: Funktionsprinzip von Energiespeicher [17].

Dabei wird grundsätzlich zwischen den physikalisch unterschiedlichen Energieformen, welche im Speicher eingelagert werden, unterschieden. Diese sind:

- mechanische Energie
- chemische Energie
- biologische Energie
- elektrischer Strom
- thermische Energie

Daraus ergibt sich nun folgende Einteilung für Energiespeicher, welche in Abbildung 1.2 dargestellt ist.

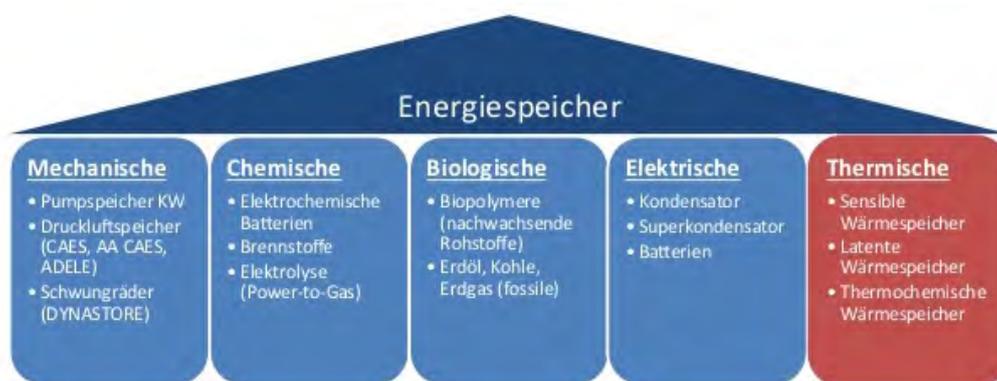


Abbildung 1.2.: Einteilung von Energiespeicher [10].

In dieser Arbeit werden ausschließlich thermische Energiespeicher behandelt. Diesen thermischen Speichern wird für die Zukunft eine wichtige Rolle prophezeit, zumal der Energieverbrauch für Heizung und Kühlung einen Anteil von ca. 50% des europäischen Energieverbrauchs ausmacht. Dies ist damit der größte Anteil, noch vor dem Transport- und Elektrizitätssektor.[17]

Auf welche Art und Weise thermische Energie gespeichert werden kann ist in Abbildung 1.3 ersichtlich. In dieser Abbildung sind auch die Energiedichten sowie der technische Entwicklungsstand dieser Speichermöglichkeiten erkennbar.

Sensible Wärmespeicher Das Laden und Entladen dieser Speicher ist stets mit einer fühlbaren Änderung der Temperatur verbunden, wobei ein Speichermedium erhitzt oder abgekühlt wird. Dabei ist die spezifische Wärmekapazität (c_p Wert) des Speichermediums entscheidend für die Menge der gespeicherten Energie. Da bei sensiblen Energiespeichern die Temperaturdifferenzen zwischen Speichermedium und Umgebung in der Regel größer sind als bei den anderen Speicherarten, spielt hier die Wärmedämmung eine große Rol-

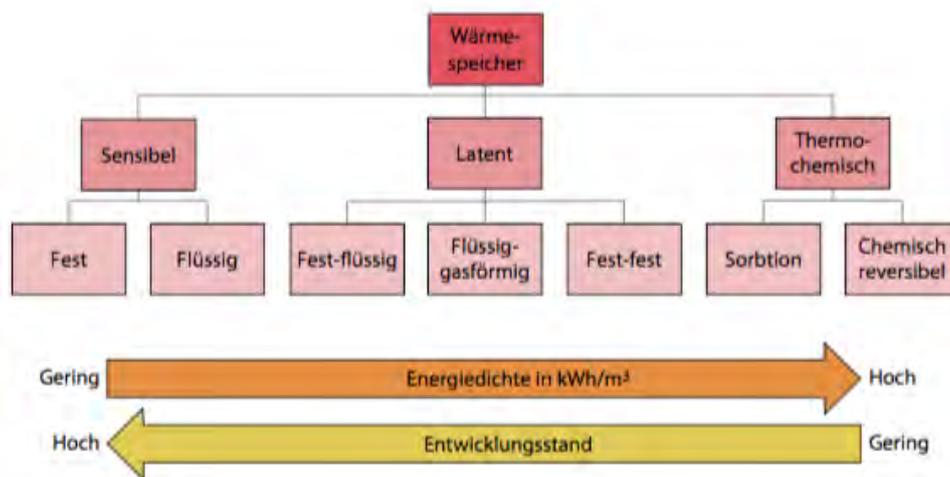


Abbildung 1.3.: Übersicht der verschiedenen Technologien zur Speicherung thermischer Energie [17].

le. Auf Grund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität, der Verfügbarkeit und weiteren Vorteilen ist die Verwendung von Wasser sehr gebräuchlich. Der Nachteil einer geringeren Energiedichte kann hier durch die ausgereifte Technik sowie den Kostenvorteil vor allem im Haustechnikbereich ausgeglichen werden (siehe dazu Abbildung 1.3).[17]

Latent Wärmespeicher bei dieser Speichertechnologie wird neben der sensiblen Wärme auch die Energie einer Aggregatzustandsänderung genutzt. Auf Grund der meist durch den Phasenwechsel (fest-flüssig, flüssig-gasförmig bzw. Änderung der Kristallstruktur) hervorgerufenen physikalischen Auswirkungen kommt es unter anderem zu volumetrischen Änderungen, wobei meist der Phasenübergang fest-flüssig verwendet wird, da die Änderungen (ca. 10%) technisch leichter beherrschbar sind. Konstante Temperaturen beim Laden und Entladen sowie höhere Energiedichten gegenüber sensibler Speicher sind ein positives Eigenschaftsmerkmal.

Thermochemische Speicher Die höchsten potentiellen Energiedichten, veranlasst durch die Wärmeumsetzung auf Grund einer chemischen Reaktion, sind bei thermochemischen Speichern zu finden. Beim Laden wird dem Speicher Energie zugeführt (endotherme Reaktion) wobei es zur Aufspaltung der Reaktanten kommt. Diese können nun ohne Energieverlust über lange Zeit gespeichert werden. Die Entladung dieses Speichers ist die Umkehrreaktion, hier wird bei der Harmonisierung in Form einer exothermen Reaktion die Energie wieder freigesetzt. Vorhandene molekulare Bindungskräfte spielen dabei die entscheidende Rolle, da diese in den meisten Fällen sehr hoch sind und daher die Auswahl geeigneter Speicher minimiert wird. Aktuell wird unter anderem in Richtung Hydratverbindungen geforscht, jedoch befinden sich diese Speichertechniken weitgehend noch in der Grundlagenforschung. Das beschriebene Arbeitsprinzip ist in Abbildung 1.4 zu sehen.

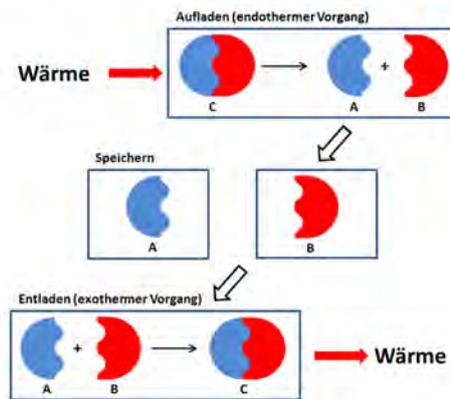


Abbildung 1.4.: Funktionsprinzip thermochemische Speicher[3].

Thermische Energiespeicher können aber auch nach anderen Gesichtspunkten eingeteilt werden. Unter anderem in:

- Temperaturbereich
- Lang-/Kurzzeitspeicher
- Zentrale/dezentrale Speicher
- Stationäre/mobile Speicher

Temperaturbereich Der Anwendungsbereich reicht von 600 °C im Hochtemperaturbereich bis –18 °C für das Tiefgefrieren von Lebensmittel.

Lang-/Kurzzeitspeicher Während Kurzzeitspeicher die thermische Energie nur für einen Zeitraum von einigen Stunden bis wenigen Tagen speichern können, ermöglichen Langzeitspeicher eine Aufbewahrung von mehreren Wochen bis hin zu einem Jahr.

Zentrale/dezentrale Speicher Geben Auskunft über den Standort eines Speichers.

Stationäre/mobile Speicher Meist sind sensible Wärmespeicher nur in stationärer Form realisierbar, latente und thermochemische Speicher können aber durchaus auch transportabel konzipiert werden. Dies könnte für die Zukunft einen entscheidenden Faktor darstellen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Pilotanlage am Laborgelände der TU Wien, bei welcher es sich um einen sensiblen Energiespeicher handelt. Aufgrund dessen wird im Folgenden das Hauptaugenmerk auf diese Speichertechnologie gerichtet.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel soll der theoretische Hintergrund vor allem für alle in dieser Arbeit relevanten Abläufe vermittelt werden.

2.1. Thermodynamische Grundbegriffe

Da das SandTES Konzept für die Speicherung von thermischer Energie erstellt wurde, spielen hier die thermodynamischen Grundlagen eine entscheidende Rolle. Diese sollen im folgenden Kapitel erarbeitet werden.

2.1.1. Thermische Energie

Bei der Speicherung von thermischer Energie setzt sich diese immer aus

- Exergie und
- Anergie

zusammen.

Hierbei stellt der Begriff der Exergie jenen Teil der Gesamtenergie dar, welcher sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung, vollständig in jede andere Energieform umwandeln lässt. Dadurch ist Anergie jener Teil der sich nicht in Exergie umwandeln lässt.[1]

Gleichung:

$$[1] \quad \dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \dot{Q} = \eta_C(T_u, T) \dot{Q} \quad (2.1)$$

wobei der Therm η_C als Carnot-Faktor bezeichnet wird.

2.1.2. Wärmeübertragung

Bei Wärmespeichern ist der Energietransport über die Systemgrenzen von entscheidender Bedeutung, dieser kann wie folgt eingeteilt werden:

- Konvektion
- Wärmestrahlung
- Wärmeleitung

Konvektion ist der Mittransport von Materie die thermische Energie mitführen → Wärmeströmung. Diese kann entweder durch thermodynamisches Ungleichgewicht oder das

Einbringen von mechanischer Energie (z.B. Pumpen) entstehen.

Wärmestrahlung ist die auf Grund der Temperatur expandierende elektromagnetische Strahlung eines Objekts. Diese Strahlung ist materialunabhängig wodurch sie auch im Vakuum zu finden ist.

Stefan-Boltzmann- Gesetz:
$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (2.2)$$

Wärmeleitung ist Wärmetransport ohne Materialstrom. Dieser Effekt entsteht alleine durch den Temperaturunterschied zwischen zwei benachbarten Atomen.

Fouriersches Gesetz:
$$\dot{Q} = \frac{\lambda A}{l} (T_2 - T_1) \quad (2.3)$$

unter l wird hier die Dicke des Körpers verstanden.

2.1.3. Wärmeverlust und Dämmung

Auf Grund des hohen Temperaturunterschiedes zwischen Speicher und Umgebung ist es bei sensiblen Wärmespeichern unbedingt notwendig den Verlust von thermischer Energie zu minimieren. Die Verluste sind dabei abhängig von der Oberfläche der Temperaturdifferenz ΔT und dem Wärmedurchgangskoeffizienten U (siehe Gleichung 2.4).

$$Q_{\text{Verlust}} = U A (T_S - T_U) \quad (2.4)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient gibt an, wie groß der Wärmedurchgang durch einen festen Körper zwischen zwei Fluiden ist. Wie in Gleichung 2.5 zu erkennen ist, wird er durch die Wärmeleitfähigkeit λ , der Wärmeübergangszahl α und den Schichtdicken bestimmt.

$$U = \alpha_i + \frac{\lambda_1}{s_1} + \frac{\lambda_2}{s_2} + \dots + \frac{\lambda_n}{s_n} + \alpha_a \quad (2.5)$$

2.1.4. Sensible thermische Energiespeicher

Die Auf- bzw. Abgabe von sensibler Wärme kann durch die spürbare Änderung der Temperatur des Speichermediums erfasst werden. Mit folgender Gleichung 2.6 wird der Zusammenhang zwischen Temperaturänderung und Wärmemenge gefunden:

$$Q = m c_p (T_2 - T_1) \quad (2.6)$$

Diese Wärmemenge ist neben Temperaturdifferenz und Stoffmasse von der spezifischen Wärmekapazität c_p abhängig. Unter dieser physikalischer Stoffeigenschaft versteht man jene Wärme die notwendig ist um einem Kilogramm eines Stoffes um ein Kelvin zu erhöhen.

Es ist leicht zu erkennen, dass eine hohe spezifische Wärmekapazität für die Wärmespeicherung hilfreich ist, da für eine gewisse Energiemenge eine geringere Menge des Stoffes benötigt wird und somit der Speicher kleiner ausfällt.[17]

Die experimentelle Bestimmung dieser thermodynamischen Größen ist chronologisch für die Heißtestphase vorgesehen, weshalb diese Ausführungen nur als theoretische Ergänzung für die Arbeit anzusehen sind.

2.2. Einführung in die Wirbelschichttechnik

Der Begriff Wirbelschicht doziert die hinreichende Fluidisierung bzw. Aufwirbelung fester Partikel (granulare Medien), die im Ruhezustand als Feststoffschüttung vorliegen und durch die von unten vertikale Anströmung (Gas- oder Flüssigkeitsströmung) in Schwebelage gehalten werden. Wie bereits der Name vermuten lässt, sieht man bei einer stationären Wirbelschicht ein flüssigkeitsähnliches Verhalten beobachten. Die Wirbelschicht bildet stets eine horizontale Oberfläche, welche sich auch Neigungsänderungen anpassen kann. Partikel mit einer kleineren spezifischen Dichte gegenüber der Wirbelschicht schwimmen somit an der Oberfläche auf, Körper mit höherer spezifischer Dichte sinken dagegen ab (die industrielle Nutzung dieser Eigenschaft wird unter anderem für die Sortierung von Feststoffen herangezogen). Siehe dazu Abbildung 2.1.

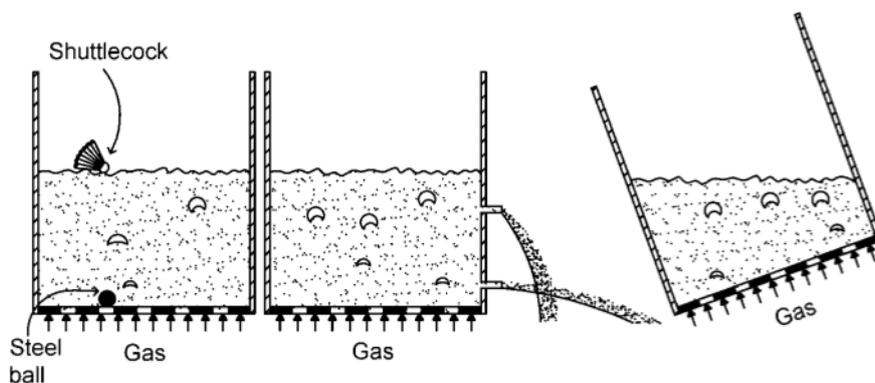


Abbildung 2.1.: Eigenschaften einer Wirbelschicht [2].

Neben der Dichte sind auch noch andere Partikeleigenschaften für diverse Sortier- bzw. Segregationsphänomene ausschlaggebend. Auch im Alltag stolpern wir über granulare Medien wie zum Beispiel das Müsli am Frühstückstisch. Es stellt sich die Frage warum gerade größere Zutaten (z.B. Rosinen) meist oben in der Packung zu finden sind - die Antwort liefert der Paranuss-Effekt.[22] Es entstehen durch Rüttelbewegungen der Packung immer wieder Hohlräume welche bevorzugt durch kleinere Bestandteile ausgefüllt werden, womit sich größere tendenziell nach oben bewegen. Dieser Effekt ist natürlich von Form, Dichte und Oberflächenbeschaffenheit sowie der äußeren Bewegung abhängig.[13]

Erstmals im Jahre 1926 wurde, durch die Erfindung des deutschen Chemikers Fritz Winkler¹, die Wirbelschichttechnik in großtechnischer Produktion eingesetzt und findet seitdem in verschiedensten Anwendungsbereichen rege Verwendung. Bis zum heutigen Tag ist das Prinzip des Wirbelschichtreaktors aktuell.

Wirbelschichtanlagen zeichnen sich durch eine Reihe von Vorteilen aus. Abgesehen von den flüssigkeitsähnlichen Eigenschaften, welche zu einer exzellenten Durchmischung der Partikel in der Wirbelschicht führen, wird auch die große Reaktionsfläche für Wärme- und Stoffübertragungsprozesse verwendet. Die Eigenschaften dieses Verfahrens lassen sich damit für viele unterschiedliche technische Prozesse nützlich einsetzen. Neben chemischen Produktionsprozessen (u.a. Adsorptionsprozesse, Trocknung, Beschichtung) werden die verschiedensten verfahrenstechnischen Prozesse sowie Vergasung und biotechnische Verfahren mit Hilfe von Wirbelschichten industriell realisiert.

Nachteilige Eigenschaften des Verfahrens liegen in der starken Erosion des Wirbelschichtreaktors. Diese Verschleißmechanismen verursachen einerseits kleinere Partikelgrößen und dadurch bedingt einen Alterungsprozess der granularen Medien, andererseits kommt es auch zum Abrieb des Gehäusematerials. Zu starker Fluidisierungsgrad führt neben erhöhtem Energieverbrauch auch zur Austragung von Feststoffen.

Folgende Parameter stellen [21] für den Betrieb von Wirbelschichten eine besondere Bedeutung dar:

- Feststoffvolumenkonzentration
- Feststoffgeschwindigkeit
- Feststoffmassenfluss
- vertikale und horizontale Feststoffverteilung im System
- Querverteilung des fluidisierenden Gases
- Temperatur
- Gaskonzentrationen

Diese Parameter gilt es abhängig vom Verwendungszweck der Wirbelschicht zu bestimmen um einen reibungslosen und verlässlichen Betrieb dieser Technik zu garantieren. Auf die wichtigsten Betriebseigenschaften für Wirbelschichten soll nun eingegangen werden.

¹Fritz Winkler 1888–1950, deutscher Chemiker, entdeckte bei der Optimierung des Haber-Bosch-Verfahrens das Prinzip der Wirbelschichtvergasung, dieses wird heute zur Vergasung verschiedenster Stoffe eingesetzt

3. Wirbelschichten

Wie bereits erwähnt entsteht eine Wirbelschicht durch ein von unten nach oben strömendes Fluid, welches die Partikel eines Schüttgutes in Schwebelage hält.

Hier unterscheidet man zwischen folgenden Zweiphasensystemen:

- Flüssig-Feststoff-System
- Gas-Feststoff-System

Wirbelschichten können aber auch dreiphasig als Gas/Flüssigkeit/Feststoff-System betrieben werden. Auf dieses soll aber in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

3.1. Kategorisierung von Partikel

Fundamental für jede Wirbelschicht sind die zu fluidisierenden Partikel. Diese müssen in ihren Eigenschaften richtig klassifiziert werden um später für Berechnungen und Versuche richtige Schlussfolgerungen zuzulassen.

Eine Charakterisierung kann nach folgenden Eigenschaften getroffen werden:

- Größe
- Form
- Dichte
- Morphologie

Industriell verwendete Partikel unterscheiden sich im Normalfall relativ stark vom Idealfall Kugel. Es treten hier meist in allen zuvor erwähnten Charakterisierungseigenschaften grobe Unterschiede auf, daher ist es besonders schwer eine passende Kategorisierung zu finden.

3.1.1. Partikelform und Partikelgröße

Für die Größeneinteilung werden in der Literatur verschiedenste Referenz-Durchmesser angegeben, die gebräuchlichsten werden in Tab. 3.1 angeführt.

Sphärizität Φ Diesem Begriff (in der Literatur auch teilweise als Formfaktor bezeichnet) kommt in der Wirbelschichttechnik eine besondere Bedeutung zu. So kann mit seiner Hilfe ein Zusammenhang zwischen den verschiedenen zuvor genannten Durchmesser hergestellt werden.

$$\Phi = \frac{\text{Oberfläche der volumengleichen Kugel}}{\text{Oberfläche des Partikels}} = \left(\frac{d_V}{d_S}\right)^2 = \frac{d_{SV}^3}{d_V^2} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.1.: gebräuchliche Referenzdurchmesser zur Partikelcharakterisierung

	Definition	Beschreibung
Sieb \varnothing	d_A	d_A entspricht der Seitenlänge eines Siebquadrates, in welchen das Partikel gerade noch durchschlüpft
Volumenbezogener \varnothing	$d_V = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{1/3}$	d_V ist der Durchmesser einer Kugel mit dem selben Volumen wie das Partikel
Oberflächenbezogener \varnothing	$d_S = \left(\frac{A_p}{\pi}\right)^{1/2}$	d_S ist der Durchmesser einer Kugel mit der selben Oberfläche wie das Partikel
Oberflächen-Volumen \varnothing	$d_{SV} = \frac{6V_p}{A_p} = \frac{d_V^3}{d_S^2}$	für nicht kugelförmige Partikel wird d_{SV} als Durchmesser einer Kugel mit gleicher volumenbezogener Oberfläche verwendet

Für eine Kugel nimmt Φ den Wert 1 an, bei anderen Partikelformen liegt er zwischen $0 < \Phi < 1$. In Tabelle 3.2 [14] ist der Formfaktor für diverse gebräuchliche Materialien ersichtlich.

Tabelle 3.2.: Sphärizität für unterschiedliche nicht kugelige Materialien

Material	Formfaktor
abgerundeter Sand	0.86
scharfkantiger Sand	0.66
gebrochener Sandstein	0.66
Kohlepulver	0.73
Kohle gebrochen	0.63 – 0.75
Weizen	0.85
gewöhnliches Salz	0.84
Glas gebrochen	0.65
Sillimanit	0.75
Eisenkatalysator	0.60 – 0.65

Wie bereits geschildert ist die Charakterisierung der Partikel sehr komplex. In der Praxis findet dadurch die Siebanalyse häufigen Gebrauch um den Partikeldurchmesser d_A zu bestimmen. Gemeinsam mit der Sphärizität, die durch optische Verfahren oder Tabellenwerte erioiert werden kann, lässt sich so der Referenzpartikeldurchmesser d_p ausdrücken. Dieser Referenzpartikeldurchmesser, auch Equivalentdurchmesser genannt, wird für weitere Untersuchungen verwendet und bildet das Produkt aus Sphärizität und dem Ergebnis der Siebanalyse.

$$d_p = \Phi \cdot d_V \approx \Phi \cdot d_A \quad (3.2)$$

Natürlich besteht ein Schüttgut immer aus einer Vielzahl an Partikeln die ähnliche Form- und Größeneigenschaften aufweisen, womit an dieser Stelle der Begriff der Größenverteilung erwähnt werden sollte. Eine enge Verteilung, sprich die Partikel besitzen eine ähnliche Größe und Form, ist dabei zu bevorzugen. Eine enge Größenverteilung steht aber im Gegensatz zum finanziellen Mitteleinsatz, wodurch hier ein sinnvoller Kompromiss anzustreben ist.

3.1.2. Porosität

Die Porosität (auch als Lückengrad bezeichnet) stellt das Verhältnis des Lückenvolumens in einer Schüttung zum gesamten Schichtvolumen V_{ges} dar.

$$\Psi = \frac{V_{ges} - V_{Pges}}{V_{ges}} = 1 - \frac{M}{\rho_p V_b} \quad (3.3)$$

In der obigen Formel entspricht V_{Pges} dem gesamten Partikelvolumen, M der Partikel-Gesamtmasse und ρ_p der Partikeldichte des gesamten Bettvolumens V_b .

Nach folgender Gleichung kann die Schüttguldichte ρ_b bestimmt werden

$$\rho_b = \frac{M}{V_b} \quad (3.4)$$

damit ergibt sich für die Porosität

$$\Psi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (3.5)$$

Die Lockerungsporosität Ψ_{mf} kann nicht vorausberechnet werden, sie ist daher entweder aus bekannten Beispielen wie in Tabelle 3.3 abzuschätzen oder aus dem Wirbelschichtversuch (siehe dazu Abbildung 3.5) zu berechnen. Bei der Betrachtung von Tabelle 3.3 ist zu erkennen:

- Ψ_{mf} steigt mit abnehmender mittlerer Partikelgröße
- Ψ_{mf} sinkt mit steigender Sphärizität
- Ψ_{mf} ist abhängig von der Kornverteilung

3.2. Zustandsbereiche von Wirbelschichten

Wirbelschichten können in unterschiedlichen Formen und Ausprägungen auftreten. Entscheidend dafür ist in erster Linie der Fluidvolumenstrom \dot{V}_f welcher über einen nur für das Fluid durchlässigen Boden die Schüttung durchströmt. Dabei liegen zunächst bei ge-

Tabelle 3.3.: Experimentelle Werte Porosität im Lockerungspunkt Ψ_{mf} [19].

Teilchen	Mittlere Partikelgröße in μm						
	20	50	70	100	200	300	400
scharfkantiger Sand ($\Phi = 0,67$)	-	0,60	0,59	0,58	0,54	0,50	0,49
abgerundeter Sand ($\Phi = 0,86$)	-	0,56	0,52	0,48	0,44	0,42	-
Sandmischung (runde Teilchen)	-	-	0,42	0,42	0,41	-	-
Kohle- und Glaspulver	0,72	0,67	0,64	0,62	0,57	0,56	-
Anthrazit ($\Phi = 0,63$)	-	0,62	0,61	0,60	0,56	0,53	0,51
Aktivkohle	0,74	0,72	0,71	0,69	-	-	-
Fischer-Tropsch-Katalysator ($\Phi = 0,58$)	-	-	-	0,58	0,56	0,55	-
Karborundum	-	0,61	0,59	0,56	0,48	-	-

ringen Geschwindigkeiten ein Festbett mit der Porosität $\Psi_{Festbett}$ und der Höhe $h_{Festbett}$ vor. Abbildung 3.1a

Wird nun die Anströmgeschwindigkeit erhöht kommt es auch zu einer Steigerung der übertragenen Kräfte auf das Feststoffgerüst, und damit zu ersten begrenzten Bewegungen einiger Partikel. Bei wiederholter Steigerung des Fluiddurchsatzes entsteht ein Zustand bei dem alle Partikel ohne permanenten Kontakt im Fluid suspendiert sind. Der gemessene Druckverlust Δp entspricht nun dem, um den Auftrieb verminderten, Gewicht des Feststoffs, bezogen auf die Querschnittsfläche des Apparates. Auf Grund der in Schwebelage gehaltenen Partikel wird dieser Punkt als Lockerungspunkt bezeichnet und ist durch die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit v_{mf} charakterisiert (Abbildung 3.1b). Die während des Lockerungspunktes im Bett zu findende Porosität wird als Ψ_{mf} und die Höhe als h_{mf} benannt.

Durch eine weitere Steigerung des Fluiddurchsatzes führt der über die Minimalfluidisierung hinausgehende Gasanteil zu praktisch partikelfreien Bereichen, welche sich zu Fluidblasen ausbilden. Durch diese Blasenbildung steigt auch die Betthöhe bzw. Porosität an. Abbildung 3.1c-d

In Folge von Koaleszenz kommt es zum Anwachsen der Blasen während des Aufstiegs wenn diese nicht durch diverse Einbauten oder Hindernisse zerteilt werden. Es bildet sich eine inhomogene Wirbelschicht aus. Abbildung 3.1d

Vor allem bei schlanken und hohen Apparaten breiten sich die Gasblasen über den gesamten Querschnitt aus und bilden in Folge von Gaskolben eine stoßende Wirbelschicht. Abbildung 3.1e

Als letzte Stufe charakterisiert man die turbulente Wirbelschicht, bei welcher keine abgrenzende Schichtoberfläche mehr existiert. Blasen werden meist durch Strähnen verdrängt

wodurch es zu einer hohen Partikelaustragung kommt. Will man diesen Wirbelschichttyp aufrecht erhalten muss ausgetragenes Material bzw. frische Partikel ständig dem System zugeführt werden. Auf Grund der hohen Austragung und dem zirkulierenden Material wird diese auch zirkulierende Wirbelschicht genannt.[19] Abbildung 3.1f

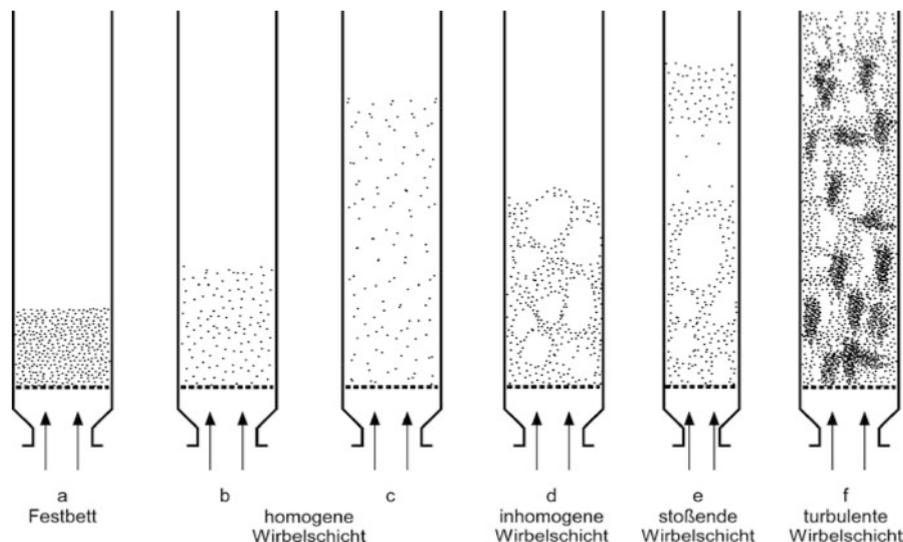


Abbildung 3.1.: Charakteristische Strömungszustände in Wirbelschichten [11].

3.2.1. Einteilung nach Geldart

Gas-Feststoff Wirbelschichten werden einschlägig durch die Feststoffeigenschaften beeinflusst. Eine anschauliche Einteilung, die das Verhalten der Schüttgüter in einer Wirbelschicht beschreibt, geht auf Derek Geldart zurück. Diese Klassifizierung ist in Abbildung 3.2 mit den Grenzen nach Molerus und Kunii & Levenspiel ersichtlich und hat sich bis heute bewährt.

Gruppe A Feststoffe der Gruppe A (engl. aeratable) sind feine Partikel und expandieren merklich über der Fluidisierungsgeschwindigkeit zu einer homogenen Wirbelschicht worauf später Blasenbildung einsetzt. Bei schlagartiger Drosselung der Gaszufuhr entweichen die Blasen schneller als das Restgas, wodurch das Bett langsam kollabiert. Es existiert eine maximale Blasengröße.

Gruppe B Vertreter dieser Gruppe B (engl. bubbling) unterscheiden sich von der Gruppe A durch die sofortige Blasenbildung oberhalb der Fluidisierungsgeschwindigkeit. Die Blasen wachsen schnell durch Koaleszenz, wobei es scheinbar keine Obergrenze gibt. Die auftretende Bettausdehnung ist dabei gering. Wird das fluidisierende Gas gestoppt kollabiert das Bett schlagartig.

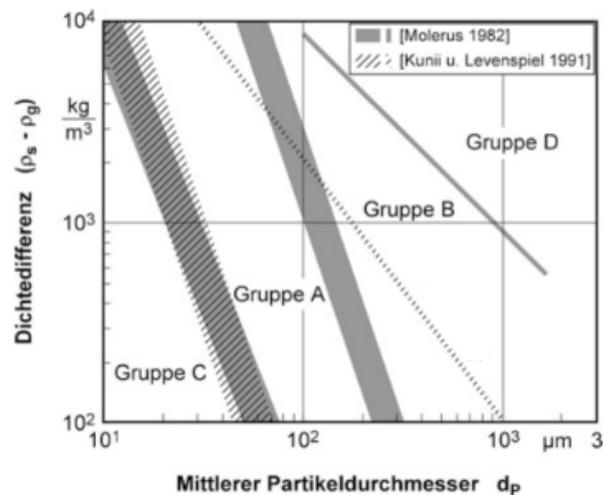


Abbildung 3.2.: Unterscheidung verschiedener Typen von Gas-fluidisierten Feststoffen nach Geldart [11].

Gruppe C Diese Gruppe wird von sehr feinen, kohäsiven (engl. cohesive) Schüttgütern gebildet, die schwierig zu fluidisieren sind, da sie oft zur Bildung von Pfropfen und Strömungskanälen in der Wirbelschicht neigen und der Druckverlust stark sinkt.

Gruppe D In dieser Gruppe sind Schüttgüter mit großen Partikelabmessungen und/oder hoher Dichte zu finden. Gas im Zwischenraum der Suspensionsphase steigt schneller auf als Gasblasen. Wirbelschichten mit Feststoffen dieser Gruppe werden bevorzugt in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. (z.B Getreide oder Kaffeebohnen)

3.3. Druckverlust

3.3.1. Druckabfall im Festbett

Es sind zwei gängige Modelle zur Beschreibung des Strömungsverlustes innerhalb des Festbettes bekannt:

- Modell der Einzelpartikelumströmung
- Modell des hydraulischen Durchmessers

Zweiteres wird in dieser Arbeit, wegen des häufigeren Gebrauches, verwendet. Dieses Modell bedient sich der Vorstellung, dass die Durchströmung des realen Festbettes durch eine Parallelschaltung von verwundenen Strömungskanälen mit sich ändernden Querschnittsflächen erfolgt.

Für $Re < 1$ hat sich die Gleichung nach Carman-Kozeny bewährt (siehe dazu Gleichung 3.6)

$$[8] \quad \frac{\Delta p}{\Delta L} = 180 \cdot \frac{(1 - \Psi)^2 \mu \cdot v}{\Psi^3 d_{SV}^2} \quad (3.6)$$

Reynoldszahl stellt das Verhältnis von Trägheitskraft zu Zähigkeitskraft dar und wird wie folgt bestimmt:

$$Re = \frac{v \cdot \rho_g \cdot d_{SV}}{\mu} \quad (3.7)$$

Das Turbulenzverhalten geometrisch ähnlicher Körper bei gleicher Reynoldszahl ist identisch.

Für $Re > 1$ muss nun auch der turbulente Term berücksichtigt werden. Als praxistauglich hat sich hier die Gleichung nach Ergun erwiesen:

$$[8] \quad \frac{\Delta p}{\Delta L} = 150 \cdot \frac{(1 - \Psi)^2 \mu \cdot v}{\Psi^3 d_{SV}^2} + 1.75 \cdot \frac{1 - \Psi}{\Psi^3} \frac{\rho_g \cdot v^2}{d_{SV}} \quad (3.8)$$

3.3.2. Druckabfall in der Wirbelschicht

Die in der Wirbelschicht befindlichen Partikel werden entgegen der Erdschwere über einen nur für Fluide durchlässigen Boden angeströmt. Der sich dadurch ergebende Druckabfall des Fluids Δp über eine Schicht mit der Länge ΔL setzt sich additiv aus dem Gewicht von Feststoff und Fluid zusammen.

$$\Delta p_{Schicht} \cdot f = G_s + G_f \quad (3.9)$$

In den folgenden Gleichungen werden Beschleunigungseffekte sowie der Einfluss der Wandreibung vernachlässigt.

$$G_s = \rho_s (1 - \Psi) g f \Delta L \quad (3.10)$$

$$G_f = \rho_f \Psi g f \Delta L \quad (3.11)$$

Für den Druckverlust über eine Wirbelschicht der Länge ΔL folgt beim Einsetzen von Gleichung 3.10 und 3.11 in Gleichung 3.3

$$\Delta p_{Schicht} = (\rho_s - \rho_f) (1 - \Psi) g \Delta L + \rho_f g \Delta L \quad (3.12)$$

Da bei Gas-Feststoff-Wirbelschichten generell $\rho_s \gg \rho_f$ gültig ist, wird bei Gleichung 3.12 der zweite Term auf der rechten Seite vernachlässigt.

Daher ergibt sich folgender Druckverlust für Gas-Feststoff-Wirbelschichten:

$$\Delta p_{Schicht} = (\rho_s - \rho_f) (1 - \Psi) g \Delta L \quad (3.13)$$

Für den Auftrieb der Feststoffpartikel in der Wirbelschicht ist gültig:

$$F_A = \rho_f(1 - \Psi)gf\Delta L \quad (3.14)$$

Dadurch erhält man mit Gleichung 3.10 für den Wirbelschichtdruckverlust 3.12

$$\Delta p = \frac{(G_s - F_A)}{f} \quad (3.15)$$

Gleichung 3.15 kann bedingt durch $\rho_s \gg \rho_f$ wie folgt vereinfacht werden

$$\Delta p = \frac{G_s}{f} \quad \text{für } \rho_s \gg \rho_f \quad (3.16)$$

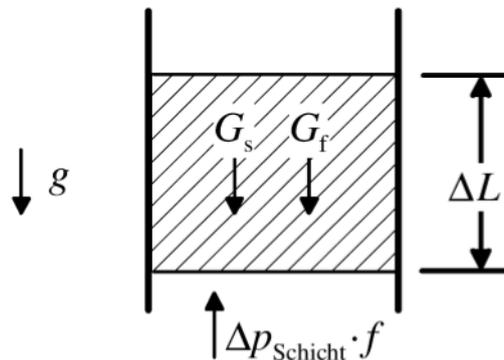


Abbildung 3.3.: Kräftegleichgewicht an einem Wirbelschichtelement der Länge L [19].

In Abbildung 3.4 wird der Verlauf von Δp in Abhängigkeit zu der Fluidisierungsgeschwindigkeit verdeutlicht. Dabei lässt sich beim Übergang von Festbett zu Wirbelschicht bei v_{mf} ein Überschwingen des Druckverlust gut erkennen, welcher sich anschließend in der homogenen Wirbelschicht annähernd konstant verhält. Erst wenn die Leerrohrgeschwindigkeit die Sinkgeschwindigkeit der Partikel übersteigt, setzt eine Partikelaustragung ein und der Druckverlust steigt wieder linear. Der Druckverlust im Festbett verhält sich dabei linear für feinkörnige Partikel, bei grobkörnigem Schüttgut ist ein progressiver Verlauf zu beobachten. Abbildung 3.5

Leerrohrgeschwindigkeit v ist die Geschwindigkeit bezogen auf die freie Querschnittsfläche der Wirbelschicht.

$$v = \frac{\dot{V}_f}{A} \quad (3.17)$$

3.4. Lockerungspunkt

Die Bestimmung des Lockerungspunktes und damit der Minimalfluidisierung basiert auf der Überlegung, dass sich dieser Punkt zwischen ruhender und wirbelnder Wirbelschicht be-

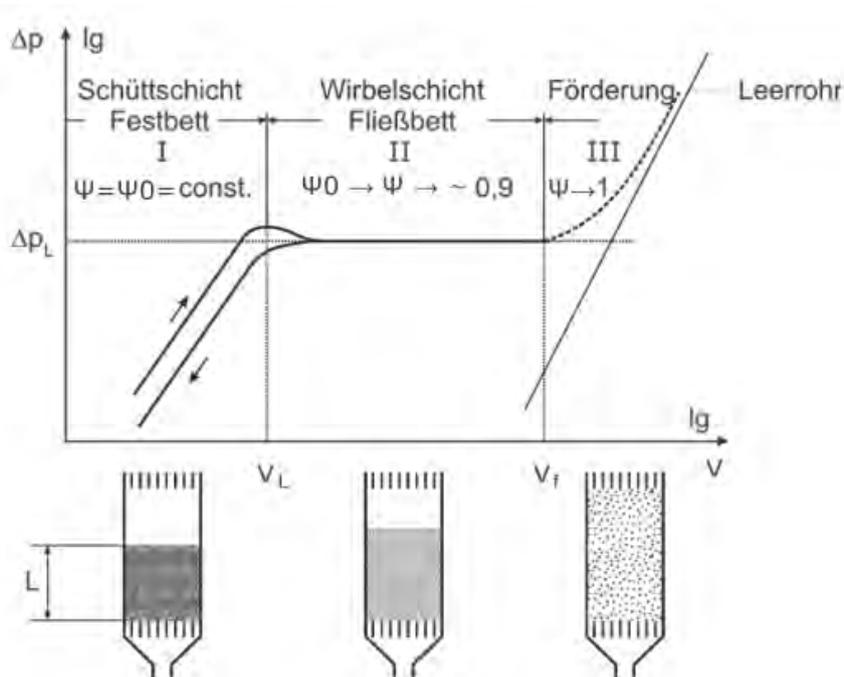


Abbildung 3.4.: Druckverlustverlauf einer homogenen fluidisierenden Schicht [18].

findet. In diesem Punkt muss also die auf die leere Wirbelschicht bezogene Fluidgeschwindigkeit - auch Leerrohrgeschwindigkeit - gerade so groß sein, dass eine Relativbewegung der Partikel in der Schicht möglich ist.

Experimentell kann die Minimalfluidisierungsgeschwindigkeit durch simultane Messung von Druckverlust und Leerrohrgeschwindigkeit über die Schüttgutschicht bestimmt werden, dabei entsteht die sogenannte Wirbelschichtkennlinie. Während der Druckverlust im Festbett proportional mit der Leerrohrgeschwindigkeit ansteigt, ist dieser innerhalb der Wirbelschicht bis zur Partikelaustragung konstant und somit unabhängig von der Fluidisierungsgeschwindigkeit.

Die Druckmessstellen müssen dabei unmittelbar oberhalb des Anströmbodens bzw. oberhalb der Bettoberfläche angebracht sein. Siehe dazu Abbildung 3.5. Bei der experimentellen Bestimmung sollte darauf geachtet werden, dass die Festbettschüttung in lockerer Form vorliegt, um Messfehler zu verhindern.

An der Ordinate wird der dimensionslose Druckverlust nach Gleichung 3.13 aufgetragen. Die Kennlinie wird durch schrittweise Minderung der Leerrohrgeschwindigkeit aufgenommen. Wird die Kennlinie durch allmähliche Steigerung aufgezeichnet, kommt es beim Übergang zu einem kurzen Überschwingen der Kennlinien. Dieses Verhalten ist in Abbildung 3.4 zu beobachten.

Verläuft der Übergang im Lockerungspunkt abrupt (siehe Abbildung 3.5 a)) lässt dies auf

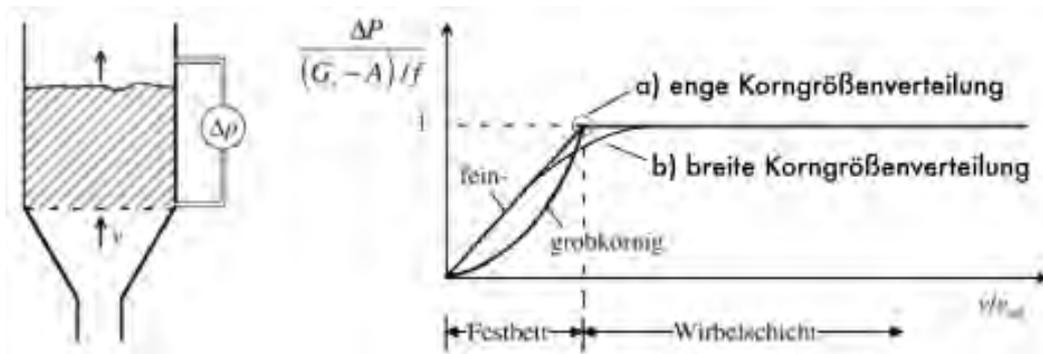


Abbildung 3.5.: Experimentelle Bestimmung des Lockerungspunktes und der Minimalfluidisierungsgeschwindigkeit [19].

eine enge Partikelgrößenverteilung schließen, während bei einem runden Verlauf der Wirbelschichtkennlinie eine breite Verteilung vorliegt. In diesem Fall werden die Geraden im Festbett- und Wirbelschichtbereich verlängert und die gesuchte Fluidgasgeschwindigkeit kann am Schnittpunkt abgelesen werden. Siehe dazu Abbildung 3.5 b).

Die rechnerische Bestimmung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit erhält man durch das Gleichsetzen der Druckabfallgleichungen für Festbett 3.8 und Wirbelschicht 3.13. Wird dieser Zusammenhang entsprechend umgeformt erhält man:

$$\frac{\rho_f \cdot d_{SV}^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} = \frac{150 \cdot (1 - \Psi_{mf}) \cdot \rho_f \cdot d_{SV} \cdot v_{mf}}{\Psi_{mf}^3 \cdot \mu} + \frac{1.75 \cdot \rho_f^2 \cdot d_{SV}^2 \cdot v_{mf}^2}{\Psi_{mf}^3 \cdot \mu^2} \quad (3.18)$$

[8]

In dieser Form kann die Gleichung durch Einsetzen von Archimedes-Zahl (Gleichung 3.19) und Re-Zahl (Gleichung 3.7) weiter vereinfacht werden.

Archimedes-Zahl gibt das Verhältnis des Auftriebs zur Reibkraft an.

$$Ar = \frac{\rho_f \cdot d_{SV}^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad (3.19)$$

[8]

$$Ar = C_1 \cdot Re_{mf} + C_2 \cdot Re_{mf}^2 \quad (3.20)$$

Für die Berechnung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit ist diese Gleichung jedoch unpraktisch, da diese einen quadratischen Term mit v_{mf} besitzt. Aus diesem Grund werden experimentell bestimmte Ψ_{mf} Werte verwendet und die quadratische Gleichung anschließend nach v_{mf} aufgelöst. Die folgende Gleichung ist für den Re-Zahlen Bereich von 0,001 - 4000 gültig und hat sich in der Praxis für verschiedenste Materialien und Kornmesser als präzise erwiesen.

$$v_{mf} = \frac{\mu}{\rho_f \cdot d_{SV}} \cdot \left[\sqrt{33.7^2 + 0.0408 \cdot Ar} - 33.7 \right] \quad (3.21)$$

Durch Gleichung 3.21 ist leicht zu erkennen, dass die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit mit der Partikelgrößenzunahme ansteigt. In Abbildung 3.6 wird die experimentelle Ermittlung von v_{mf} der rechnerischen gegenübergestellt. Wie bereits zuvor angemerkt, lässt sich mit Formel 3.21 eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen erreichen.

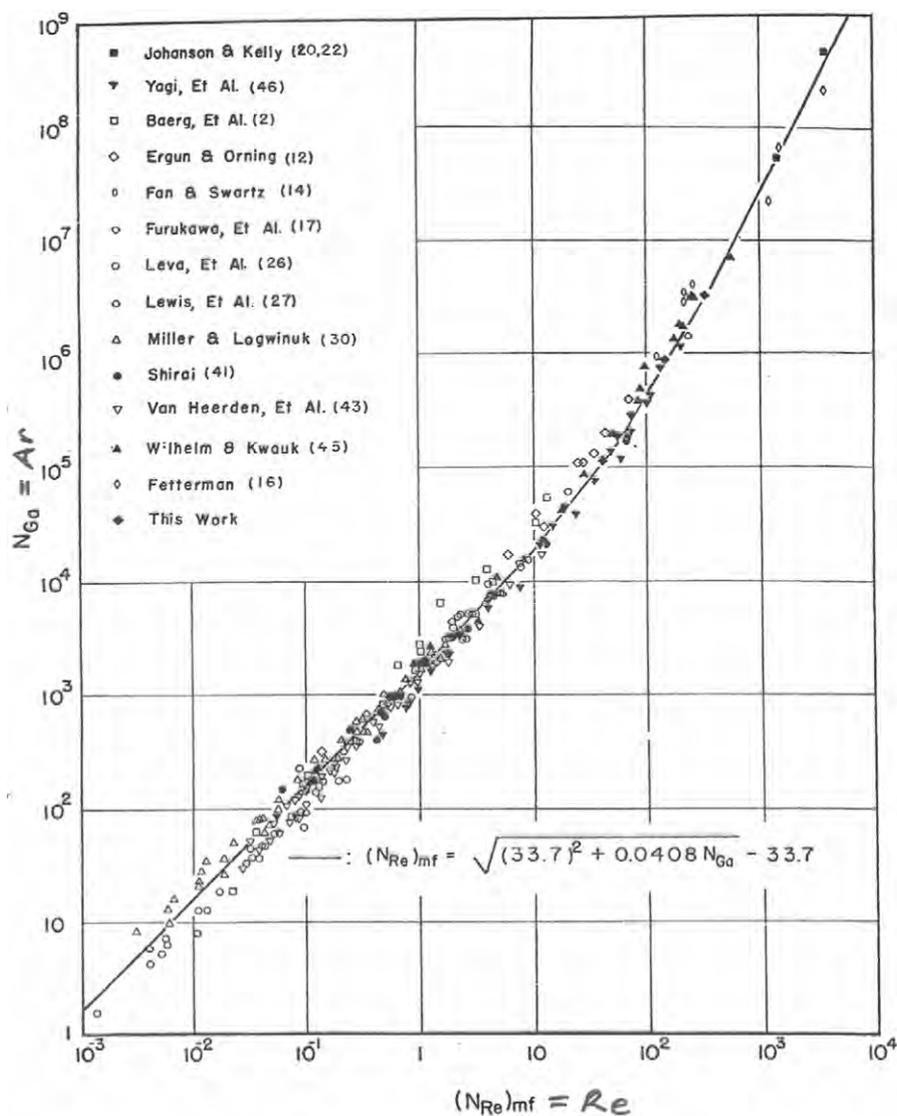


Abbildung 3.6.: Vergleich zwischen Experiment und Berechnung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit [8].

3.5. Zustandsdiagramm nach Reh

Für eine übersichtliche Darstellung der unterschiedlichen Wirbelschicht-Regionen bedient man sich der grafischen Einteilung in Zustandsdiagrammen. Die Klassifizierung in den Zustandsdiagrammen erfolgt über dimensionslose Kennzahlen. Zuvor wurden die Reynoldszahl Re (Gleichung 3.7) und die Archimedeszahl Ar (Gleichung 3.19) bereits angeführt. Mit der

Froude-Zahl Fr sowie der erweiterten Froude-Zahl Fr^* werden dabei weitere wichtige Kennzahlen genannt.

Froude-Zahl dient der Beschreibung der hydrodynamischen Strömungsbedingungen. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Trägheitskraft und Schwerkraft und kann aus der Navier-Stokes-Gleichung gewonnen werden.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d_p}} \quad (3.22)$$

als erweiterte Froude Zahl Fr^* gilt:

$$Fr^* = \frac{3}{4} \cdot Fr^2 \cdot \frac{\rho_f}{(\rho_s \cdot \rho_f)} \quad (3.23)$$

Mit Hilfe der dimensionslosen Kennzahlen und der daraus resultierenden Ähnlichkeiten für das vorliegende Strömungsverhalten, gelang es Lothar Reh eine Einteilung der Wirbelschicht-Regionen zu treffen. Dieses daraus folgende Diagramm ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

Unterhalb der $\Psi = 0.4$ Kurve liegt das Regien der Feststoffdurchströmung vor. Oberhalb der $\Psi = 1$ Kurve befindet sich der Bereich der Austragung durch pneumatische Förderung. Im dazwischenliegenden Bereich ist die Wirbelschicht in unterschiedlichen Ausprägungen zu finden.

Dieses Diagramm ist für Flüssigkeit-Feststoff-Systeme (gestrichelte Linien) ebenso von Gültigkeit wie für in dieser Arbeit behandelte Gas-Feststoff-Systeme. (durchgezogene Linien) Dabei lässt sich im Übergangsbereich Wirbelschicht-Feststoffaustragung $\Psi = 1$ der Gas-Feststoff-Systeme eine Verbreiterung in Richtung kleiner werdender Ar-Zahlen erkennen. Dies lässt sich aus dem Zusammenhang der Ar-Zahl mit dem Durchmesser und den damit resultierenden kleineren Partikelgrößen, welche durch Agglomeration zur Bildung von Partikelcluster neigen, erklären. Im Bereich oberhalb der gekrümmten gestrichelten Schwebelinie $\Psi = 1$ der Einzelpartikeln bis zur horizontalen Austragungsline $\Psi = 1$ befindet sich der Bereich der turbulenten Wirbelschicht (siehe auch Abbildung 3.1), welcher nur durch Rückführung der ausgetragenen Partikel aufrecht gehalten werden kann.[19]

In der Realität verlaufen die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Zuständen nicht strikt. Hier führen Instabilitäten wie Restfeuchte oder Reaktorgegebenheiten zu schwimmenden Übergängen.

Auf der Abszisse ist in Abbildung 3.7 die Reynolds-Zahl Re aufgetragen, an der vertikalen Achse ist die erweiterte Fr-Zahl Fr^* zu finden. Diese zwei Kennzahlen sind sowohl vom Partikeldurchmesser als auch von der Leerrohrgeschwindigkeit abhängig, wodurch für den praktischen Gebrauch des Diagrammes unter Umständen ein Nachteil entstehen kann. Um das Diagramm in solchen Fällen trotzdem gut handhaben zu können, sind in einem Hilfs-

netz die beiden Parameter Archimedes-Zahl Ar und Ω – Zahl eingetragen.

Die Archimedes-Zahl Ar (Gleichung 3.19) ist ihrerseits ausschließlich vom Partikeldurchmesser abhängig, für die Ω – Zahl gilt das Gegenteil.[19]

Die Ω – Zahl ergibt sich zu:

$$\Omega = \frac{\rho_f^2 \cdot v^3}{(\rho_s - \rho_f) \cdot \mu} \quad (3.24)$$

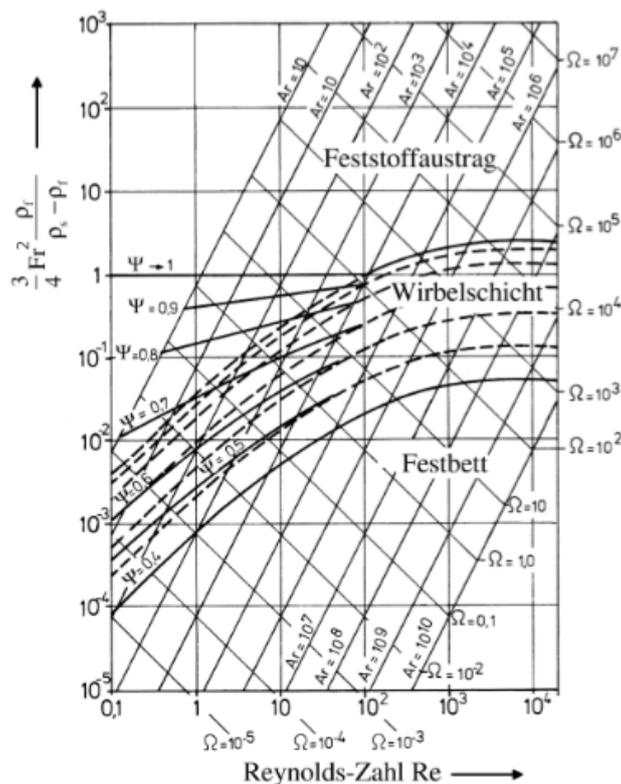


Abbildung 3.7.: Wirbelschicht-Zustandsdiagramm nach Reh [19].

3.6. Gasblasen in Wirbelschichten

Gas-Feststoff-Wirbelschichten wurden bereits zuvor durch das Auftreten von Gasblasen charakterisiert. Dabei strömt oberhalb des Lockerungspunktes nur ein Anteil des Fluidgases durch die dichte Suspensionsphase. Das restliche Gas überwindet die Wirbelschicht in praktisch feststofffreien Gasblasen, deren Aufstiegsgeschwindigkeit sich gegenüber der Feststoffdurchströmungsgeschwindigkeit des Restgases deutlich unterscheidet.

Durch das Auftreten der Blasenbildung ergeben sich für die Wirbelschichttechnik wertvolle Eigenschaften:

- Feststoffdurchmischung in der Wirbelschicht

- Temperaturkonstanz
- vergleichsweise hohe Wärmeübergangszahlen zwischen Bett und Wärmetauscherfläche

Nachteilig muss die Bypasswirkung der Blasen, welche zum Beispiel den Gesamtumsatz bei katalytischen Reaktionen negativ beeinflussen, angemerkt werden.

Folgende Erkenntnisse und Beschreibungen beziehen sich in erster Linie auf Partikel der Geldart-Gruppe B. Dabei handelt es sich um Feststoffe, die beim Erreichen des Lockerungspunktes eine unmittelbar eintretende Blasenbildung aufweisen und deren Gasblasen in der Folge keine Wachstumsgrenze erkennen lassen (siehe dazu auch Kapitel 3.2.1).

Durch die begrenzte Zugänglichkeit von Wirbelschichten, ist es äußerst schwierig einen Einblick in den lokalen Vorgang der Blasenbildung sowie damit verbundene Vorgänge zu bekommen. Wesentliche Eigenschaften und Wirkungen der Blasen auf die Wirbelschicht werden an Hand von Beobachtungen einzelner Blasen geringfügig oberhalb des Lockerungspunktes aufgezeigt. Die theoretischen und experimentellen Ansätze lassen sich durch Abbildung 3.8 zusammenfassen.

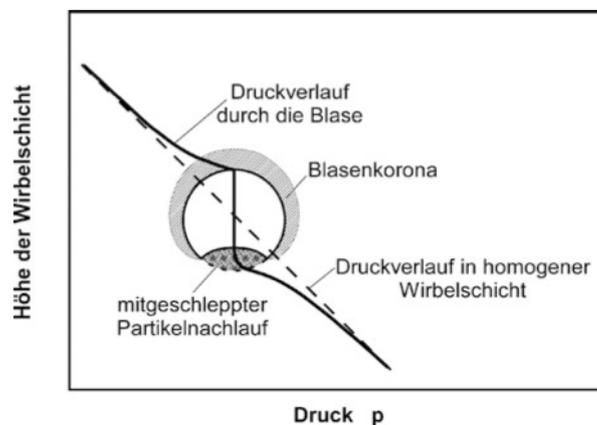


Abbildung 3.8.: Druckzustand einer einzelnen aufsteigenden Gasblase [11].

Dabei ist die kugelförmige Ausbildung der oberen Blasenhälfte sowie eine sich ab $Re > 20$ bildenden Wirbelschleppe am unteren Blasenende zu erkennen. Die Existenz dieser Wirbelschleppe fungiert als Aufstiegsmöglichkeit für umliegende Partikel. Dies lässt sich durch die Fotosequenz in Abbildung 3.9 gut erkennen.

Die in Abbildung 3.8 gezeigte gestrichelte Linie kennzeichnet den Druckverlauf der ungestörten Suspensionsphase der Wirbelschicht, welcher sich linear mit der Schichthöhe ändert. An Hand der durchgezogenen Linie ist zu sehen, dass der Druckverlauf der Gasblase entlang der vertikalen Symmetrieachse verläuft. Durch den sich bildenden Druckgradienten strömt daher Gas von unten in die Blase ein und bildet eine Abplattung mit senkrechter

Erhöhung der unteren Blasenoberfläche. Bei diesem Vorgang werden auch Partikel angesaugt, wodurch ein Nachlauf mit mitgeschleppten Partikel in Erscheinung tritt. Der Nachlauf kann dabei aber nicht unendlich mit Partikel angereichert werden, weshalb es nach gewisser Aufstiegslänge zur Partikelabtrennung kommt. An der oberen Blasenaußenfläche tritt der entgegengesetzte Fall ein, hier wird Gas aus der Blase an die umliegende Suspension abgegeben.[11]

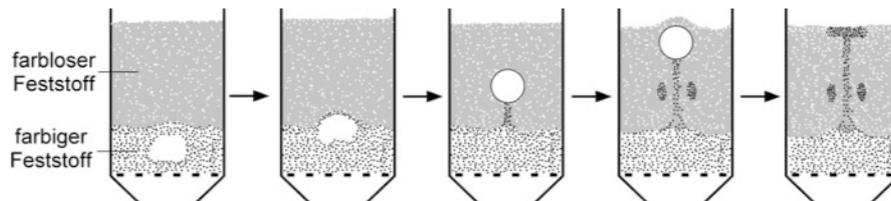


Abbildung 3.9.: Schematische Darstellung des Mitreißens von Feststoff durch eine aufsteigende Blase [11].

Die Blasenauftiegs geschwindigkeit, außer bei sehr kleinen Blasen, ist verglichen mit der Gasgeschwindigkeit durch die Suspensionphase erheblich größer. Dadurch wird das in die Suspensionphase austretende Gas von der Gasblase eingeholt und tritt am unteren Ende wieder in die Blase ein. Dieser Vorgang und das Verhalten bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsverhältnissen ist in Abbildung 3.10 ersichtlich.

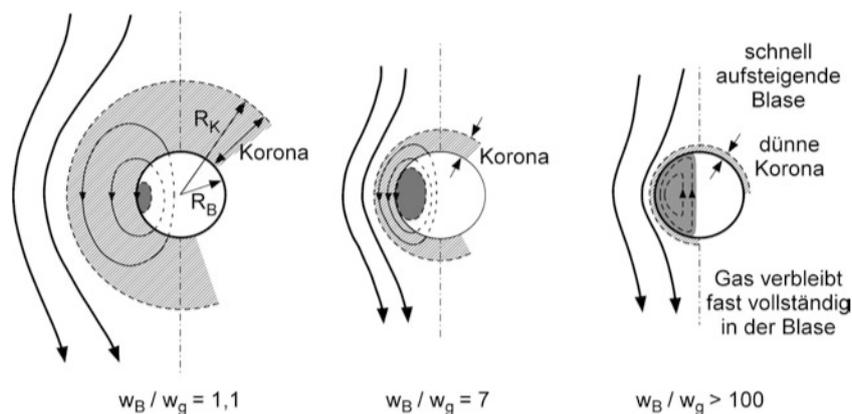


Abbildung 3.10.: Gasaustausch im Nahbereich einer aufsteigenden Gasblase [11].

Es ist ersichtlich, dass dadurch die Blasenoberfläche während des Aufstiegs stetig erneuert wird. Hierbei wird der Nahbereich der Gasblase, in welchen der Austausch mit dem zirkulierenden Gas stattfindet, als Blasenkorona bezeichnet. Damit zirkuliert das Blasengas ausschließlich innerhalb der Blase und der unmittelbar außerhalb liegenden Blasenkorona. Es wird kaum in das Bett abgegeben und bleibt daher segregiert vom Bettfluid. Je mehr die Blasenauftiegs geschwindigkeit zunimmt, desto geringer fällt die relative Eindringtiefe des Blasengases aus. Das Verhalten des Geschwindigkeitsfeldes in Blasennähe wird

dabei ausschließlich vom Verhältnis w_B/w_g bestimmt. Hierbei ist w_B die relative Aufstiegs-
geschwindigkeit der Gasblase, für w_g der Geschwindigkeit des zwischen dem Feststoff auf-
steigenden Gases gilt [11]:

$$w_g = \frac{v_g}{\Psi} \quad (3.25)$$

Aus diesem Einzelblasenverhalten lässt sich folgendes resümieren:

- Gasblasen sind für den Transport von Partikel in der Wirbelschicht durch die Mitnah-
me im Nachlauf verantwortlich.
- Durch den gegebenen Unterdruck infolge des Druckgradienten saugen an der Bla-
senunterseite die großen, schnelleren Blasen, die kleineren, langsameren nach dem
Überholvorgang von unten an. Durch die Koaleszenz ergibt sich daraus ein rasches
Blasenwachstum in Steigrichtung.
- Es kommt zu einer ausgeprägten Bypasswirkung und in der Folge zu einer Zirkulati-
onsströmung des Gases innerhalb der Blasen, da hier kaum Gasaustausch stattfin-
det.

In Abbildung 3.11 ist das Blasenwachstum in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhält-
nisses v_g/v_{mf} ersichtlich. Während des Aufstiegs der Gasblasen von weniger als 1 m kann
dabei das Blasenvolumen um zwei bis mehrere Zehnerpotenzen zunehmen.[11]

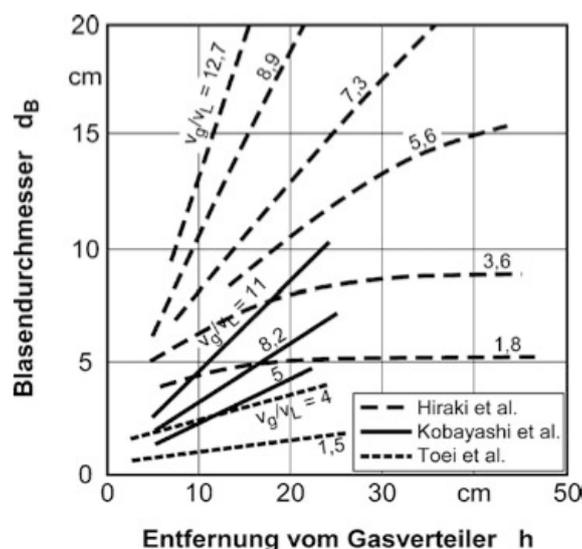


Abbildung 3.11.: Abhängigkeit der mittleren Blasengröße von der Höhe über dem Gasver-
teiler in Wirbelschichten aus Geldart A und B Partikeln [11].

Für das Blasenwachstum ist nach [20] folgende Gleichung gültig:

$$\frac{d_B}{m} = 0.0085 \cdot \left[1 + 27 \left(\frac{v_g - v_{mf}}{m/s} \right) \right]^{1/3} \cdot \left[1 + 6.8 \left(\frac{h}{m} \right) \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

dabei ist h die Entfernung zum Gasverteilerboden, welcher für diese Gleichung in Form einer porösen Platte vorhanden ist. Die Größe und Frequenz der sich vom Verteilerboden loslösenden Blasen hängt dabei in erster Linie vom vorhandenen Volumenstrom \dot{V} ab und nicht von der Lochgröße des Anströmbodens.

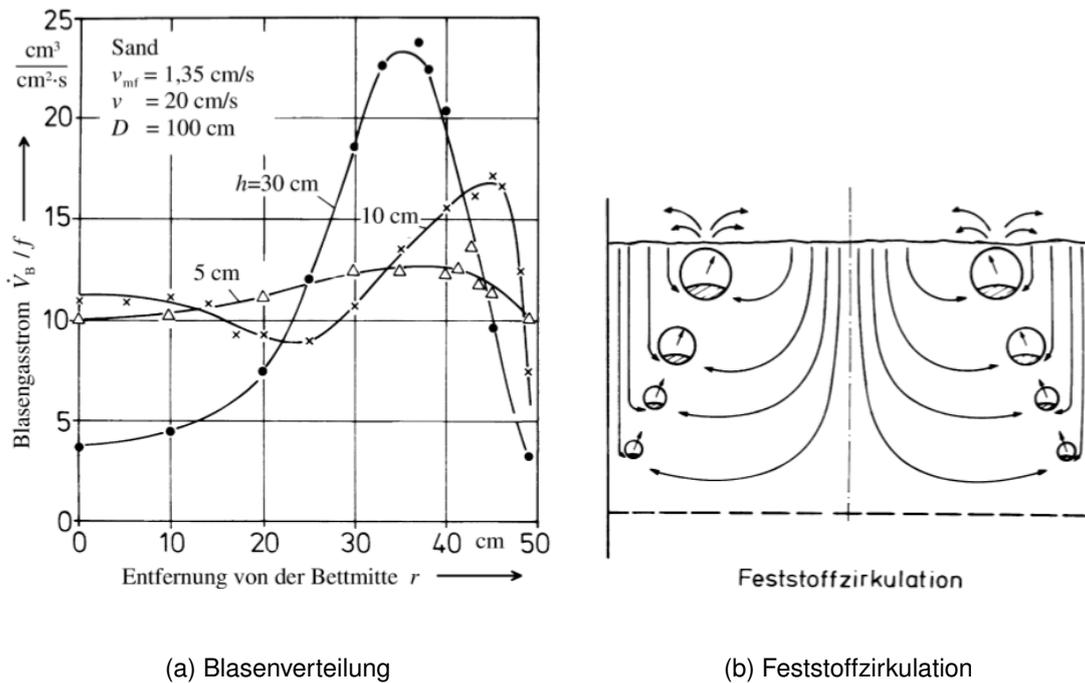
Das Geschehen in der Wirbelschicht erweist sich als sehr komplex, sodass es zurzeit nur durch empirisch gewonnene Korrelationen wie in Gleichung 3.26 möglich ist diese näherungsweise zu berechnen.

3.7. Feststoffdurchmischung in Wirbelschichten

Durch Wirbelschleppen wird Feststoffmaterial während des Blasenanstiegs in der Wirbelschicht nach oben transportiert. Dabei werden Teile der transportierten Partikel am Weg wieder zurückgelassen, wodurch es zu einer regen Durchmischung im Nachlaufgebiet kommt. Durch diese Eigenschaft der Wirbelschleppung lässt sich eine deutlich bessere Partikeldurchmischung in horizontaler Richtung als in vertikaler erreichen. Der Unterschied kann dabei innerhalb eines Bereiches von bis zu zwei Zehnerpotenzen liegen. Die Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen ist primär von deren Größe abhängig, wodurch diese mit zunehmendem Wachstum und Abstand zum Verteilerboden ansteigt.

Aus dem Aufwärtstransport resultiert aus Kontinuitätsgründen auch eine lokale Abwärtsbewegung im Feststoffbereich. Experimentelle Messungen legen offen, dass es zu einer charakteristischen Ungleichverteilung von Blasen gegenüber dem Wirbelschichtquerschnitt kommt. In Abbildung 3.12(a) ist dazu die grafische Auftragung lokaler Messungen in Folge des von Blasen durchsetzten Gasvolumenstroms pro Flächeneinheit \dot{V}_B/f in Abhängigkeit zur Entfernung r von der Reaktor-Symmetrieachse und unterschiedlichen Höhen h oberhalb des Anströmbodens zu sehen. Hier lässt sich in Bodennähe eine verstärkte Blasenentwicklung entlang der Reaktorwand beobachten, während mit zunehmender Steighöhe Gasblasen in Richtung Symmetrieachse des Reaktors verlagert werden. Die sich daraus ergebende Partikelzirkulation ist in Abbildung 3.12(b) ersichtlich.[19]

Auch der Reaktordurchmesser beeinflusst dabei den auftretenden Fluidisationszustand entscheidend, was in Abbildung 3.13 veranschaulicht wird. Dieser Versuch wurde mit Quarzsand $d_p = 85 \mu\text{m}$, $v_{mf} = 1,8 \text{ cm/s}$, $v = 8,94 \text{ cm/s}$ bei einem Abstand von 15 cm zum Anströmboden durchgeführt. Mit den Blasen nach oben transportierte Partikel bevorzugen



(a) Blasenverteilung

(b) Feststoffzirkulation

Abbildung 3.12.: (a) Räumliche Gasblasenverteilung in Abhängigkeit vom Abstand zur Bettmitte für unterschiedliche Höhen über dem Anströmboden, (b) der daraus resultierende Feststoffumlauf [19].

Bereiche mit geringem Blasenvorkommen für die Abwärtsströmung, wodurch die Ungleichverteilung der Blasen über den Bettquerschnitt weiter stabilisiert und verstärkt wird. Anhand der Abbildung 3.13 ist klar ersichtlich dass, bei Vergrößerungen des Reaktor-Durchmessers mit anderen Gasblaseneigenschaften in der Wirbelschicht zu rechnen ist.[11]

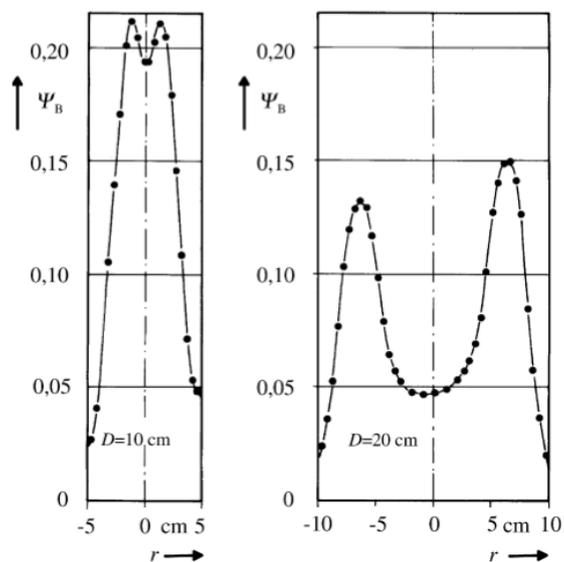


Abbildung 3.13.: Abhängigkeit des lokalen Blasenvolumenanteils Ψ_B vom Abstand r zur Bettmitte für unterschiedliche Reaktordurchmesser [19].

4. SandTES-Konzept

Kernkomponente der SandTES Pilotanlage stellt der U-förmige Wärmetauscher dar. Die Steuerung und Regelung der Apparatur bildet daher die zentrale Herausforderung dieser Prototypsforschung.

4.1. Schlüsseltechnologien

4.1.1. Energiespeichermedium

Der Erfolg oder Misserfolg dieser Anlage ist abhängig von dem, für die Verwendung, passend gewählten, Speichermedium. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert, eignen sich ausschließlich Schutgüter der Geldartgruppe A und B für einen stabilen Wirbelschichtbetrieb. Für einen guten Wärmeübergang während des Lade- bzw. Entladevorganges sollte dabei eine hohe Wärmekapazität c_p vorhanden sein. Sollen Verluste während des Speicherns möglichst niedrig gehalten werden, wird jedoch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit λ verlangt. Da die gespeicherte Wärmemenge Q in sensiblen Speichern neben der Wärmekapazität auch von der Temperaturdifferenz abhängig ist, sollte diese nach Möglichkeit ausgereizt werden. Diese Anforderung entspricht daher einem über das gesamte Temperaturspektrum beständigen Feststoff. Wie immer sind neben den technischen Eigenschaften eines Betriebsstoffes meist auch die finanziellen Kosten ausschlaggebend für eine Entscheidung.

Vereint man diese Anforderungen, rücken folgende Feststoffe in die engere Auswahl:

- Quarzsand und
- Korund

Nach Abwägung von Vor- und Nachteilen fiel die Entscheidung, für eine erste Versuchsphase, auf Quarzsand.

Durch die Eigenschaften der Wirbelschicht ist ein guter Wärmeübergang trotz mittelmäßiger, spezifischer Wärmekapazität von Quarzsand, zu erreichen. Dieser durch die Wirbelschicht kompensierte Nachteil wird bei der Speicherung als Vorteil genutzt. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Sandes im Zustand der Ruhe ermöglicht eine verlustarme Speicherung über längere Zeitabschnitte. Im Hochtemperaturbereich überzeugt die chemische Stabilität des Sandes auf ganzer Linie, hier sind der Speicherung bis zu 1000 °C keine Grenzen gesetzt. Im angestrebten Anwendungsbereich bis zu 390 °C können daher Änderungen der Partikelform oder Zusammensetzung ausgeschlossen werden. Dieser Anwendungsbereich ergibt sich durch die Einsatzobergrenze des verwendeten Thermalöls. Besonders die drucklose Handhabung im Umgang mit Sand lässt einen weiteren Vorteil gegenüber Flüssigkeiten erkennen. Die positiven Aspekte hinsichtlich Verfügbarkeit und Beschaffungskos-

ten von Quarzsand runden diese Entscheidung ab.

Nachteilig ist, dass sich durch den Gebrauch von Sand und den Voraussetzungen einer Wirbelschicht, feinste Partikel im System befinden. Mögliche Staubbelastung und Schwierigkeiten bei der Anlagenbedienung, trotz Verwendung staubdichter Komponenten, sollen dabei besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Durch eine geringe Partikelgröße ist dieses System auf Grund der kapillaren Wirkung besonderes sensibel gegenüber Feuchtigkeit. Der verwendete Kompressor verfügt daher über einen Feuchtigkeitsabscheider, ob Luftfeuchtigkeit oder Witterungszustände eine Rolle für den Betrieb dieser Pilotanlage spielen, soll aber genau beobachtet werden. Vor allem in der Verrohrung nach dem Wärmetaucher scheint die Gefahr durch Verstopfung in Folge von ausgetragenen Partikel und Feuchtigkeit hoch zu sein.



Abbildung 4.1.: Gefrorener Sand in Folge der tiefen Temperaturen April 2017.

Eine weitere offene Frage ist die mit der Sandförderung einhergehende mechanische Reibung, welche einerseits zur Abtragung von Gehäusematerial führt, andererseits aber auch zu einer Partikelerosion beiträgt. Verschmutzungen des Speichermediums oder Änderungen im Betriebsverhalten der Anlage sollen während der Versuchsdurchführung beobachtet werden.

Neben der richtigen Wahl eines Speichermediums, ist auch die Partikelgröße sowie die Größenverteilung erfolgsentscheidend. Da mit steigender Partikelgröße die notwendige Minimal-Fluidisierungsgeschwindigkeit steigt, sollten die verwendeten Sandpartikel möglichst klein gewählt werden. Damit kann die Gebläseleistung und dadurch der Energieeinsatz niedrig gehalten werden.

Die Entscheidung bei der Wahl einer passenden Partikelgrößenverteilung ist ein Balanceakt zwischen hohen Kosten durch aufwendige Verfahren und gleichartiger Prozesseigenschaften in Folge einer engen Größenverteilung. Ein weiterer Vorteil enger Größenverteilungen im Hinblick auf die Wirbelschichteigenschaften ist die Absicherung gegenüber mög-

licher Entmischung des Speichermediums. Für die SandTES Anlage liegen die gewählten Intervallgrenzen bei $60 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$. Wobei der durchschnittliche Partikeldurchmesser mit $87 \mu\text{m}$ angegeben ist und eine Partikeldichte von 2650 kg/m^3 aufweist. Für die durchschnittliche Porosität im Wärmetauscher konnte dadurch ein Wert von $\Psi = 0.54$ gemessen werden. [16]

4.1.2. Fluidisations-Konzept

Die fließende horizontale Bewegung des Sandes durch den Wärmetauscher erfolgt grundsätzlich durch den Betthöhenunterschied zwischen Eingang und Ausgang, welcher im Zusammenhang mit dem Druckverlust Δp steht. Wird über eine Schnecke stetig Sand in den Wärmetauscher gefördert, steigt damit an dieser Stelle die Wirbelschichthöhe und damit verbunden der Druckverlust Δp . Der geringste Druckverlust ist demnach am Ausgang zu finden. Aus der in Kapitel 3.3.2 hergeleiteten Gleichung 3.13 lässt sich dieses Verhalten leicht erkennen.

Zum Zwecke der Übersicht wird diese Gleichung nochmals angeführt:

$$\Delta p_{Bett} = (\rho_s - \rho_f)(1 - \Psi) \cdot g \cdot \Delta H_{Bett} \quad (4.1)$$

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Gleichung frei vom Einfluss durch Geschwindigkeiten ist und neben physikalischen Materialeigenschaften nur die Betthöhe entscheidend ist.

Da die Fluidisierungsluft den Weg des geringsten Widerstandes, in diesem Fall Druckverlust, geht, wird sich diese in Richtung Ausgang orientieren. Aus diesem Grund kann bei einer geringeren Betthöhe eine stärkere Fluidisierung der Wirbelschicht erwartet werden.

Entscheidend für diese Speichertechnologie ist es, den horizontalen Sandmassenstrom in einem stabilen Betriebsbereich zu halten sowie eine flexible Steuerungsmöglichkeit der Parameter zu gewährleisten. Um diese Anlageneigenschaften zu erhalten, wurden im Vorfeld des SandTES Prototypbaues folgende zwei neuen Technologien an der TU Wien entwickelt:

- Düsenbodenverteiler-Technik und
- Luftkissenttechnologie

Um den Effekt und den Nutzen dieser Technologien aufzeigen zu können wird zunächst nochmals auf den Druckverlust eingegangen.

Der vertikale Gesamtdruckverlust Δp_{HEX} innerhalb eines WT-Querschnittes ergibt sich aus der Summe des Druckverlustes der durchströmten Düse mit eingebauter Drosselblende

$\Delta p_{Düse}$, der Wirbelschicht Δp_{Bett} und des Luftkissenventils $\Delta p_{Luftkissenventil}$.

Damit kann angeschrieben werden:

$$\Delta p_{HEX} = \Delta p_{Düse} + \Delta p_{Bett} + \Delta p_{Luftkissenventil} = konst. \quad (4.2)$$

Durch Änderungen im Betrieb kompensieren sich auch die Terme dieser Gleichung. Daraus folgt, dass der Gesamtdruckverlust zu jeder Zeit über die gesamte horizontale Wärmetauscherachse konstant ist.

In Abbildung 4.2 wird der schematische Aufbau eines Wärmetauscher-Segmentes dargestellt.

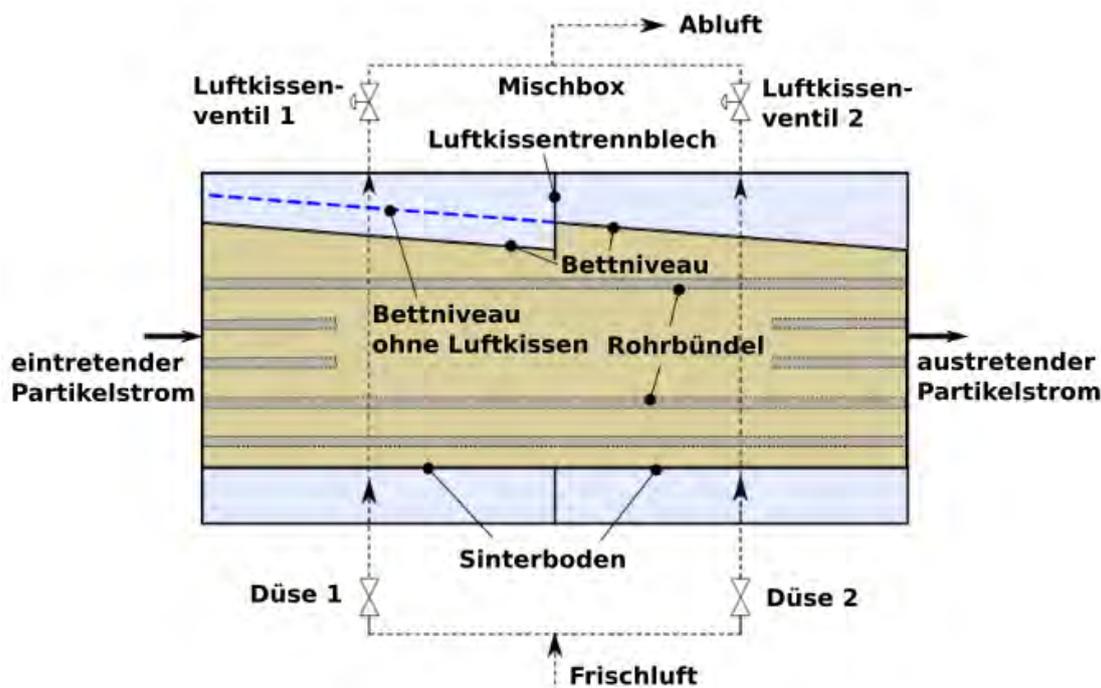


Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung eines Wärmetauscher-Segmentes.

Die vom Gebläse eingebrachte Luft strömt über die Drosselblende der Düsen zum Sinterboden um anschließend die Sandpartikel im Wärmetauscher zu fluidisieren. Oberhalb des Bettes wird die abströmende Luft durch die Mischbox gebündelt und verlässt die Anlage über den Rekuperator.

Durch die blau strichlierte Linie in Abbildung 4.2 ist der Betthöhenunterschied zwischen Wärmetauscherein- und -ausgang angedeutet. Wird nun wie eingezeichnet ein Partikelmassenstrom dem System zugeführt, stellt dieser Höhenunterschied und der daraus resultierende Unterschied des lokalen Druckverlustes die einzige Antriebskraft für den horizontalen Sandmassenstrom dar. Durch Gleichung 3.13 ergibt sich daher ein unterschiedlicher lokaler Druckverlust innerhalb der Wirbelschicht entsprechend des Partikelflusses entlang

der horizontalen Wärmetauscherachse. Daraus entwickelt sich ein Ungleichgewicht in der Luftverteilung der Düsen unterhalb des Wärmetauschers. Dieser Effekt wird durch die im Düsenrohr eingebauten Drosselblenden, welche einen zusätzlichen Druckverlust $\Delta p_{Düse}$ im System hervorrufen, ausgeglichen. Dieser zusätzlich verursachte Druckverlust sollte nur so hoch bemessen werden, wie für die den Ausgleich der Luftverteilung notwendig ist.

Der Düsen-Druckverlust im Bezug auf den Staudruck wird wie folgt ausgedrückt:

$$\Delta p_{Düse} = \zeta \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot u_{Düse}^2 \quad (4.3)$$

Dabei ist $u_{Düse}$ die mittlere Düsengeschwindigkeit, der Widerstandsbeiwert der Armatur ζ setzt sich aus einem Rohrreibungsanteil $\zeta_R = \psi \cdot \frac{L}{d}$ und einem Umlenkungsanteil ζ_U zusammen. (ψ ...Rohrreibungszahl)

Düsenbodenverteiler-Technik Um das Sandpartikel ausreichend fluidisieren zu können und der ungleichen Luftverteilung entgegen zu wirken, muss eine geeignete Düsenanzahl gefunden werden. Eine Möglichkeit um die Luftverteilung auszugleichen und die Anzahl der Düsen trotzdem in einem moderaten Bereich zu halten, ist die Verwendung eines Sinterbodens, welcher in diese Anlage eingebunden wurde. Dieser Sinterboden besteht aus mehreren porösen Sinterplatten und wird auch Düsenbodenverteiler-Technik genannt. Mit einer Porengröße von $10 \mu\text{m} - 30 \mu\text{m}$ sind diese für Sandpartikel undurchlässig. Die durchströmende Luft kann aber durch ihre poröse Struktur aufgeteilt werden. Die Luftverteilung über den Sinterboden fördert den Ausgleich des Druckverlustes über die Wärmetauscherachse.

Luftkissentechologie Durch die Neigung der Bettoberfläche entsteht bei langen Wärmetauschern ein Höhenunterschied zwischen Ein- und Austritt. Dadurch befindet sich ein nicht zu unterschätzender Anteil der Sandmasse in einem Bereich in dem keine Rohrbündel vorhanden sind und dadurch keine Möglichkeit der Wärmeübertragung besteht, während ein zusätzlicher Mehreinsatz zur Fluidisierung nötig ist. Dieser Gegebenheit wirkt die Luftkissentechologie, welche patentrechtlich durch die TU Wien geschützt ist, entgegen.

Durch ein gasdichtes Trennblech im Inneren der Wärmetauschers kann der in Abbildung 4.2 dargestellte Abschnitt in zwei Kammern unterteilt werden. Zusammen mit dem Ventil oberhalb wird diese Einheit Luftkissen genannt.

Ein nochmaliger Blick auf Gleichung 4.2 lässt erkennen, dass wenn der Druckverlust über ein Luftkissenventil erhöht wird, dies durch die Reduktion eines anderen Terms ausgeglichen werden muss. Da die Blende unverändert bleibt, erfolgt hier lediglich ein kleiner Ausgleich in Folge der Geschwindigkeitsänderung durch die Luftverteilung. Der Großteil des Ausgleichs des Gesamtdruckverlustes muss aber über das Bett Δp_{Bett} kompensiert

werden. Das Bett reagiert auf diesen Umstand mit einer Reduktion der Betthöhe und damit einer Verminderung des Δp_{Bett} Termes. In Abbildung 4.2 wurde diese Betthöhenreduktion bereits eingezeichnet. Durch diese Luftkissentechologie kann das Sandvolumen oberhalb der Rohrbündel minimiert werden und stellt weiters eine zusätzliche Steuermöglichkeit für den Betrieb des Wärmetauscher dar. An der Pilotanlage wurden vier Luftkissenventile verbaut.

Der Druckverlust des Ventils $\Delta p_{Luftkissenventil}$ ist dem von Gleichung 4.3 vergleichbar, jedoch mit variablem Widerstandsbeiwert ζ .

5. Beschreibung der Versuchsanlage

Zur experimentellen Untersuchung der Speicherung von thermischer Energie wurde am Versuchsgelände Arsenal der Technischen Universität Wien ein $280 \text{ kW}_{\text{th}}$ Wärmetauscher-Prototyp errichtet. In dieser vom Institut für Energietechnik und Thermodynamik konzipierten Anlage soll Wärmespeicherung mit Hilfe von Wirbelschichttechnologie weiter vorangetrieben werden. Die Anlage verwendet als Speichermedium Quarzsand womit sich der Name der Anlage SandTES ableiten lässt, in Abbildung 5.1 ist der Prototyp zu sehen. Die Abkürzung TES ergibt sich dabei aus dem englischen Wort für thermischen Energiespeicher übersetzt Thermal Energy Storage.



Abbildung 5.1.: Versuchsanlage SandTES.

Die Gesamtanlage umfasst mehrere Versuchsstände die in Container, unter einem Flugdach sowie dem Heizhaus untergebracht sind. Um einen besseren Überblick zu erhalten wird auf Abbildung 5.2 verwiesen, in der das CAD-Modell mit den Hauptkomponenten der Anlage ersichtlich ist. Des weitern wird ausschließlich auf den Versuchstand SandTES eingegangen.

5.1. Technische Komponenten der Anlage

Das grundlegende Konzept des Versuchstandes kann auf das in Abbildung 5.3 ersichtliche Modell zurückgeführt werden.

Das System ist aufgebaut aus zwei Speichersilos und einem Wärmetauscher (engl. heat-

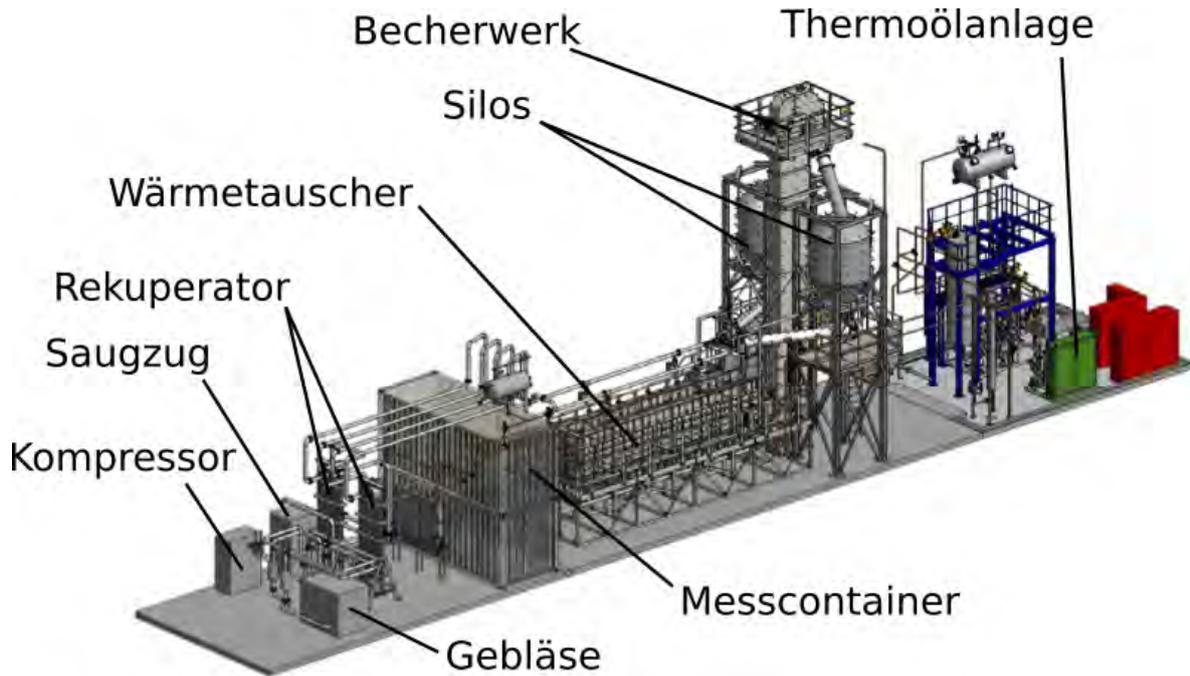


Abbildung 5.2.: CAD-Modell SandTES-Anlage.

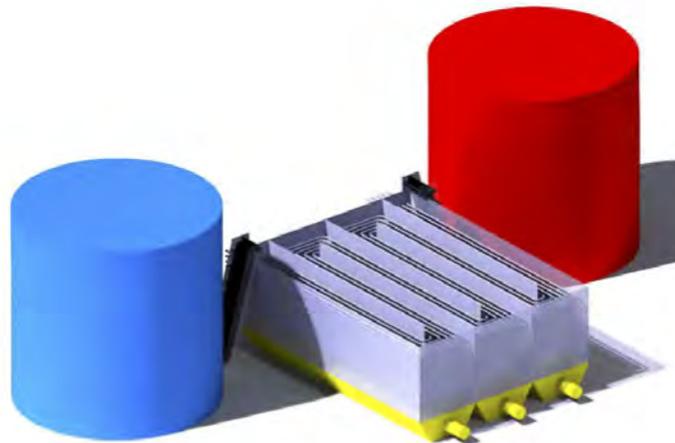


Abbildung 5.3.: Grundprinzip SandTES-Anlage.

exchanger daher auch HEX) in welchem horizontale Rohrbüdel mit Thermoöl geführt werden. Diese Rohre sind vom Speichermedium Sand umgeben, welcher im Betrieb als Wirbelschicht vorliegt. Als Folge der Wirbelschicht fließt dabei der Sand von einem Silo über den Wärmetauscher in den anderen Silo, wobei entweder thermische Überschussenergie vom Thermoöl in den Sand übertragen wird oder der Wärmeübergang vom Sand in das Thermoöl erfolgt. Dies stellt den Lade- bzw. Entladevorgang des sensiblen Wärmespeichers dar. Der Sand wird den Silos über ein Becherwerk zugeführt und an der Unterseite über eine Schneckenföderung entnommen.

5.1.1. Wärmetauscher HEX

Das Herzstück der Pilotanlage wird durch den modular aufgebauten U-förmigen Wärmetauscher (WT) gebildet. Hier wurde bewusst auf den modulartigen Aufbau gesetzt um eine größtmögliche Flexibilität für unterschiedliche Versuche zu erhalten. Wärmespeichermedium dabei ist Quarzsand mit einem mittleren Partikeldurchmesser von $87 \mu\text{m}$.

Im WT eingebettete Rohrbüdel führen Thermoöl, welches im Heizhaus erhitzt oder abgekühlt werden kann. Die Heizleistung der Pilotanlage beträgt $280 \text{ kW}_{\text{th}}$ welcher eine Kühlleistung von $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ gegenübersteht. Während des Einspeichervorganges wird kalter Sand über die Schneckenföderung dem Wärmetauscher zugeführt und durch die von einem Gebläse bereitgestellte Luft im Inneren des WT fluidisiert. Aufgrund des Wirbelschichtprinzipes fließt der Sand durch den Wärmetauscher und wird dabei über die mit heißem Thermoöl durchströmten Rohrbündel erwärmt. Am anderen Ende des Wärmetauschers angelangt verlässt der nun erwärmte Sand den Wärmetauscher und wird über ein Becherwerk dem zweiten Silo von oben zugeführt.

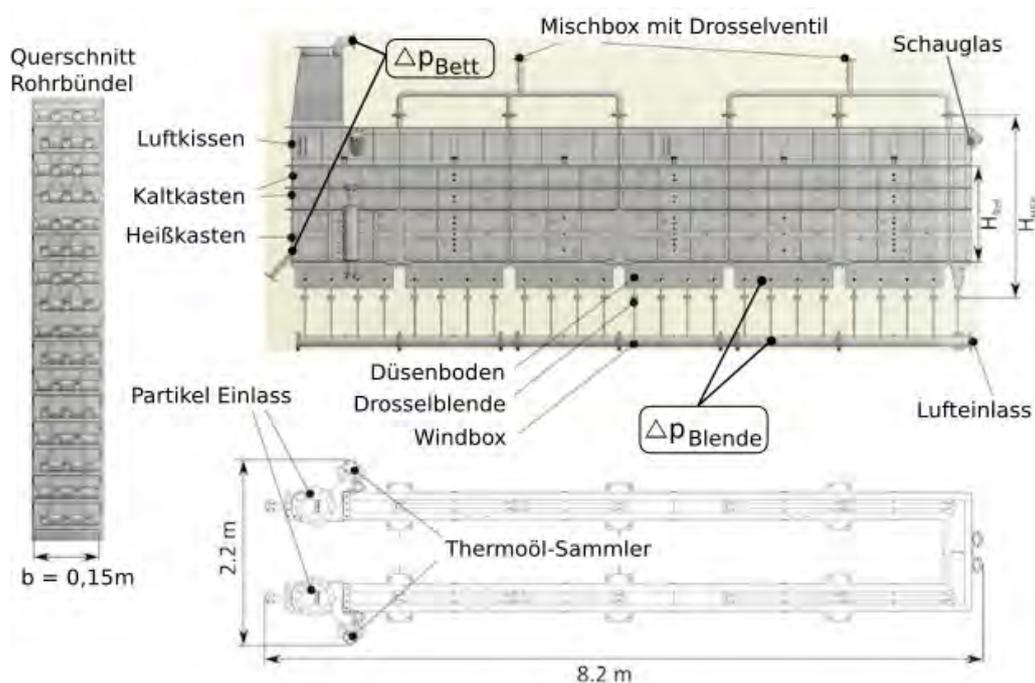


Abbildung 5.4.: 3D-Modell Wärmetauscher.

Der vom Gebläse erzeugte Volumenstrom \dot{V}_f wird über eine Rohrleitung, auch Windbox genannt, weiter über insgesamt 52 Drosselblenden dem Düsenboden zugeführt. Anschließend münden die Rohrleitungen von vier Drosselblenden in eines von 13 Düsenbodenmodulen um die Fluidisierungsluft schlussendlich an den Gasverteilerboden abzugeben. In diesem Prototyp wird ein poröserer Sinterboden verwendet um das Festbett möglichst homogen zu fluidisieren.

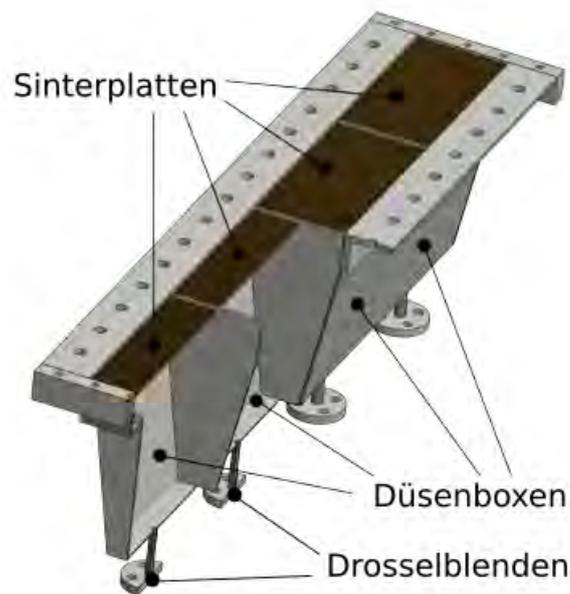


Abbildung 5.5.: 3D-Modell Düsenboden.

Der modulare Aufbau des HEX wird in Heißkasten, Kaltkasten sowie dem Deckel, welcher einen Luftposter oberhalb der Wirbelschicht bildet, unterteilt. Im Heißkasten befinden sich die mit der Thermoölanlage verbundenen Rohrbündel, während sich auf Höhe der Kaltkästen lediglich Dummie-Rohrbündel befinden, welche ausschließlich als Widerstände zu betrachten sind. Die Rohrbündel setzen sich aus Stahlrohren mit einem Außendurchmesser von 25 mm und einem horizontalen Zwischenabstand von 50 mm zusammen. Der vertikale Abstand beträgt 62,5 mm woraus sich eine versetzte Anordnung ergibt, wie in Abbildung 5.4 zu erkennen ist. Das Fluidisierungsgas einschließlich der Partikel in der Wirbelschicht umspühlen durch wiederholte Richtungsänderung intensiv die Rohrbündel, womit die Voraussetzungen für einen guten Wärmeaustausch gegeben sind.

Über das Rohrsystem der Mischboxen verlässt die Abluft den Wärmetauscher in Richtung Rekuperator um dort die in der Fluidisierungsluft gespeicherte Wärme an die einströmende Frischluft abzugeben und damit die Energieeffizienz der Anlage auf einem hohen Level zu halten. Vor den Mischboxen passiert die Abluft ein Drosselventil dessen Funktion bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert wurde.

Der Wärmetauscher ist mit einer Vielzahl an Messstellen ausgerüstet, um sich alle essentiellen Messdaten während der Versuche zu verschaffen. Alle am Wärmetauscher vorbereiteten Messstellen sind dabei in Abbildung 5.6 angeführt. Mit Hilfe der umfangreichen Messtechnik werden Temperaturen und Drücke erhoben um einen Überblick der Vorgänge innerhalb des Gehäuses zu bekommen. In der Schaltzentrale der Anlage, welche sich im Messcontainer mit Blick auf den Wärmetauscher befindet, können alle Messergebnisse im Leitsystem überwacht und aufgezeichnet werden. Drei am Luftpolsterkasten verteilte

Schaugläser gewähren Einblick in das Geschehen innerhalb des WT. Durch Blick auf die Sandoberfläche können nützliche Informationen bezüglich Bettlevel oder Blasenbildung gesammelt werden, welche jedoch ausschließlich Zusatzinformationen zu den gemessenen Daten darstellen.

Die Position der Messstellen wurde dabei entsprechend gewählt, um einen möglichst hohen Aussagewert der Daten zu erhalten. Die Anschlüsse der Drucksensoren und Thermoelemente werden über Kabeltassen in einen Schaltkasten geführt, wo die Weiterverarbeitung zur Messsignalaufbereitung und Einbettung in das Leitsystem stattfindet. Alle am Leitsystem angeschlossenen Einheiten werden in einer stets aktuell gehaltenen Excel-Vorlage verwaltet. Maximale Flexibilität garantiert die strikte Trennung von Messstellen- und Messgerätebezeichnungen. So kann auch gleichzeitig bei einer späteren Änderungen der Konfiguration stets der Überblick behalten werden. Abhängig von den spezifischen Versuchsanforderungen können Messgeräte im Rahmen des Leitsystems beliebig ergänzt und getauscht werden. In Abbildung 5.7 ist ein Auszug dieser Aufzeichnung ersichtlich.

Um in einem, mit feinen Sand befüllten, Wärmetauscher zuverlässige Druckzustände messen zu können, werden in den WT ragende Messlanzen mit einem Drahtsieb (Maschenweite 325 mesh) verwendet. Diese Siebe am Lanzenende sind notwendig da ansonsten Sandpartikel durch die angeschlossenen Luftschläuche den Weg zum Messumformer finden könnten.

Nachstehend werden zunächst alle dem Wärmetauscher vorgeschalteten Komponenten beschrieben.

5.1.2. Gebläse

Die Fluidisierungsluft wird durch ein Drehkolbengebläse bereitgestellt. Mit einer Druckdifferenz von 500 mbar wird die Ansaugluft dem Rohrsystem zugeführt.

5.1.3. Rekuperator

Um ein energieeffizientes Arbeiten der Anlage zu ermöglichen sind dem Rohrsystem zwei Gas/Gas-Wärmetauscher zwischengeschaltet. Durch dieses Plattenwärmetauscher-Konzept ist es möglich die thermische Restenergie der Abluft im Gegenstromprinzip an die Frischluft abzugeben. Die vorerwärmte Frischluft wird anschließend über das Rohrsystem zum Wärmetauscher weitergeleitet. Durch Umschließen in der Luftverrohrung könnten diese Rekuperatoren aber auch umgangen werden. Eine Ansicht des Modells ist in Abbildung 5.9 ersichtlich.

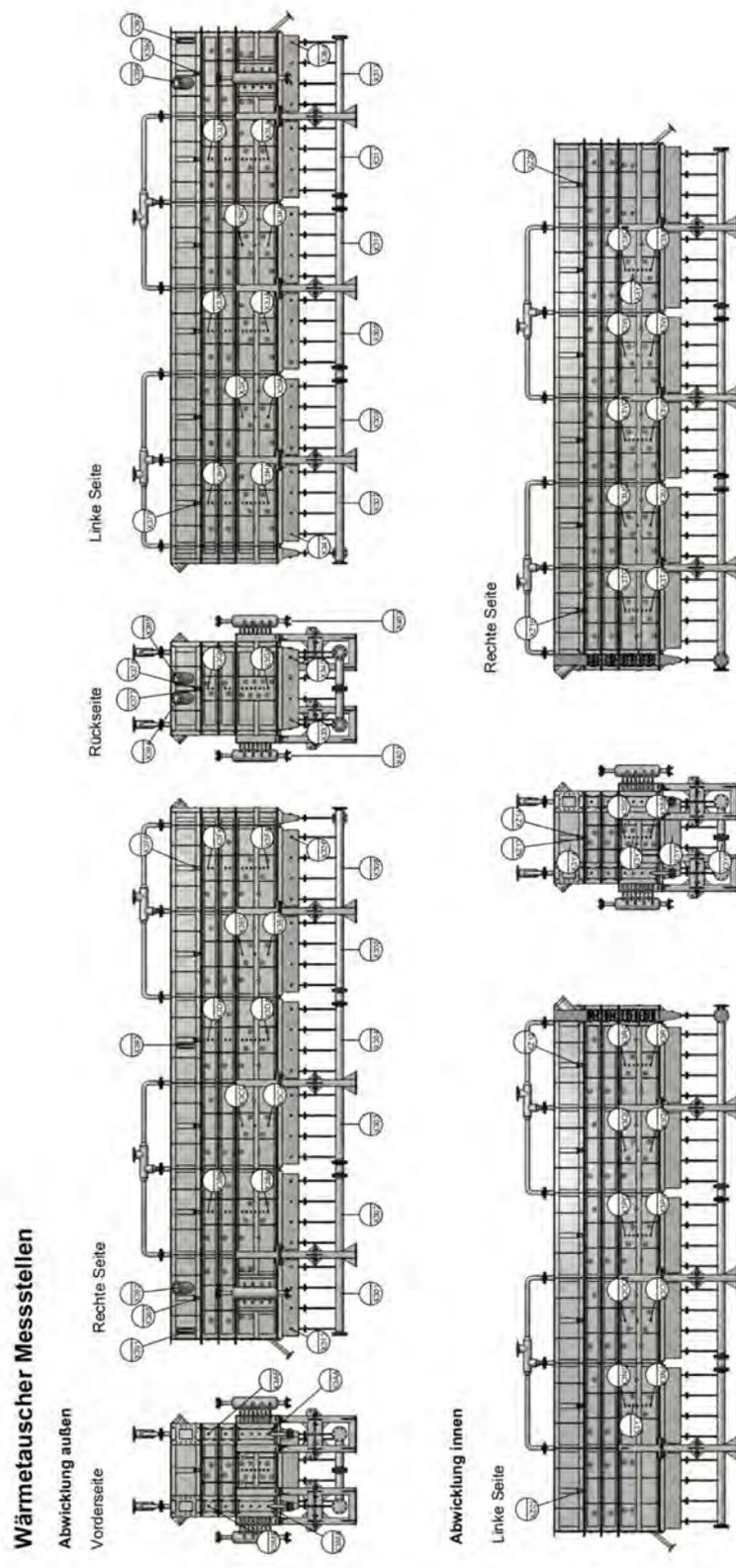


Abbildung 5.6.: Messstellenzuordnung am Wärmetauscher.

DI /DO Plan SeLaTES							Rev	1.5			
							MH	Plan	#####		
Karte	Funktion	Gruppe	Karte	Eingang	Beschreibung	Seite	Spalte			Variablenname	
Profibus DP zu HTT-SPS											
X20IF1061	Gruppe 3 Messschrank außen										
BC0083	X20 Buscontroller für Powerlink										
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST2										
AI		3	1	1	Drucksensor 1		ai	p	106	aip106	
AI		3	1	2	Drucksensor 2		ai	p	206	aip206	
AI		3	1	3	Drucksensor 3		ai	p	501	aip501	
AI		3	1	4	Drucksensor 4		ai	p	502	aip502	
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST3										
AI		3	2	1	Drucksensor 5		ai	p	303	aip303	
AI		3	2	2	Drucksensor 6		ai	p	304	aip304	
AI		3	2	3	Drucksensor 7		ai	p	305	aip305	
AI		3	2	4	Drucksensor 8		ai	p	306	aip306	
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST4										
AI		3	3	1	Drucksensor 9		ai	p	307	aip307	
AI		3	3	2	Drucksensor 10		ai	p	308	aip308	
AI		3	3	3	Drucksensor 11		ai	p	309	aip309	
AI		3	3	4	Drucksensor 12		ai	p	310	aip310	
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST5										
AI		3	4	1	Drucksensor 13		ai	p	311	aip311	
AI		3	4	2	Drucksensor 14		ai	p	312	aip312	
AI		3	4	3	Drucksensor 15		ai	p	313	aip313	
AI		3	4	4	Drucksensor 16		ai	p	314	aip314	
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST6										
AI		3	5	1	Drucksensor 17		ai	p	315	aip315	
AI		3	5	2	Drucksensor 18		ai	p	316	aip316	
AI		3	5	3	Drucksensor 19		ai	p	317	aip317	
AI		3	5	4	Drucksensor 20		ai	p	318	aip318	
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST7										
AI		3	6	1	Drucksensor 21		ai	p	319	aip319	
AI		3	6	2	Drucksensor 22		ai	p	320	aip320	
AI		3	6	3	Drucksensor 23		ai	p	321	aip321	
AI		3	6	4	Drucksensor 24		ai	p	322	aip322	
AI4632	IF3.ST2.IF1.ST8										

Abbildung 5.7.: Auszug der Variablen und Kartenliste.



Abbildung 5.8.: Messsonde mit Schutzsieb [7].

5.1.4. Saugzug

Seine Aufgabe ist es, die Fluidisierungsluft oberhalb der Wirbelschicht, durch das Rohrsystem zum Rekuperator abzusaugen und an die Umgebung abzugeben. Mitgeführte Sandpartikel sollen gefiltert und entsprechend ihrer Größe im Fein- oder Grobfilter abgeschieden werden.

5.1.5. Kompressor

Dient zur Versorgung diverser pneumatischer Ventile mit Prozessdruckluft sowie für die Falschlufteinblasung bei der Druckmessung im Wärmetauscher. Diese Falschluff kann an den Messstellen separat durch Rotameter justiert werden.

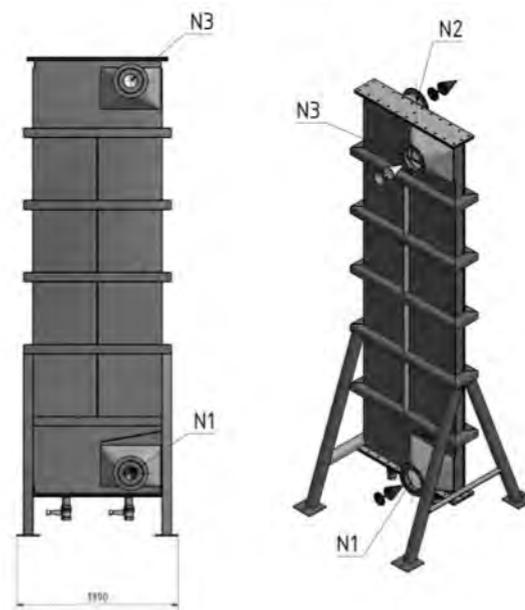


Abbildung 5.9.: 3D-Modell Rekuperator.

5.1.6. Luftverrohrung

Unter Luftverrohrung versteht man das vorhandene Rohrsystem, welches die einzelnen Komponenten miteinander verbindet. An der Luftverrohrung sind auch mehrere Messstellen integriert, welche neben Temperaturen und Drücken auch die Volumenstrommessung \dot{V}_f des Fluidisierungsgases durchführen. Über die Adjustierung von Ventilen kann die Durchströmung diverser Abschnitte bestimmt werden. In Abbildung 5.10 ist das R & I Fließschema der Pilotanlage dargestellt.

5.1.7. Förderanlage

Die Förderanlage, bestehend aus dem Becherwerk und den Schneckentrieben, ist für den Sandtransport in bzw. aus dem Wärmetauscher verantwortlich. Zur Veranschaulichung soll Abbildung 5.11 dienen.

Mit Hilfe einer Verteilerweiche wird der, durch das Becherwerk nach oben geförderte, Sand in den gewünschten Silo eingelagert und kann durch Aktivierung einer Schnecke aus den Silos entnommen werden. Um Verstopfungen beim Anfahren des Becherwerks in Folge von Fehlbedienung zu verhindern, ist die Rohrverbindung zwischen Wärmetauscher Ausgang und Becherwerk mit einem Schieber versehen. Eine Sicherheitseinrichtung im Leitsystem kontrolliert die geschlossene Stellung des pneumatisch angesteuerten Schiebers während des Anfahrvorganges.

Der unter dem Einfluss der Schwerkraft aus dem Silo tretende Sand wird über die Förderschnecke in den Wärmetauscher transportiert. Der Sandmassenstrom \dot{m}_S im Wärme-

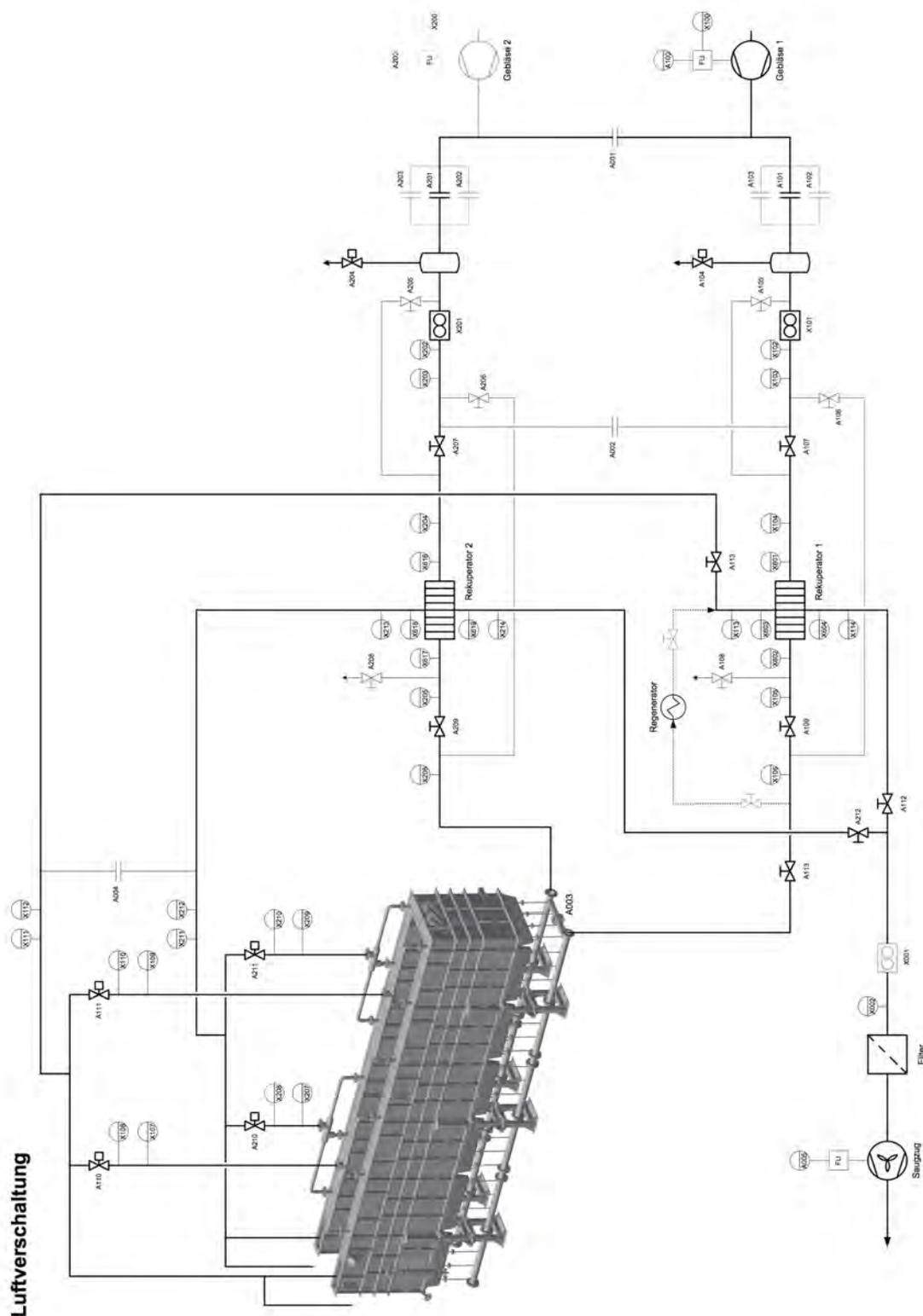


Abbildung 5.10.: R & I Fließschema der SandTES Luftverrohrung.

tauscher wird daher über die Schneckendrehzahl $n_{Schnecke}$ reguliert, welche durch einen induktiven Sensor abgetastet wird. Ein komplettes R & I Fließschema der Förderanlage ist in Abbildung 5.12 ersichtlic.

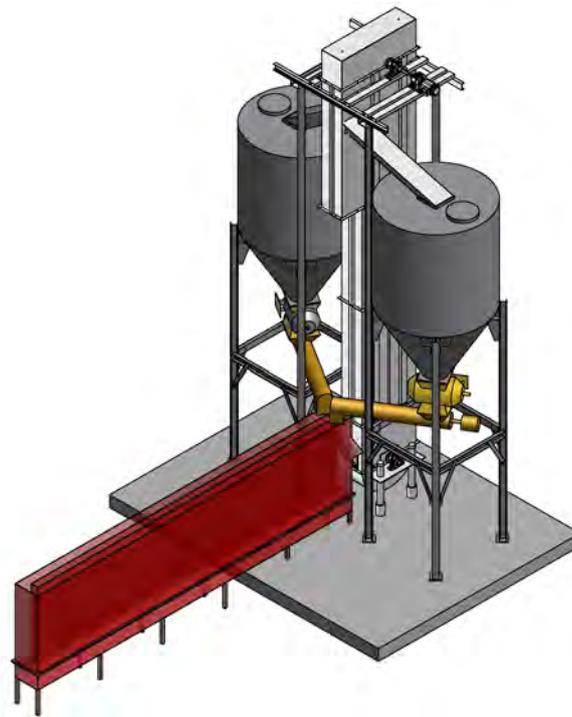


Abbildung 5.11.: 3D-Modell Becherwerk und Schneckentrieb.

5.1.8. Speichersilos

Die Aufgabe der Silos ist es den eingelagerten Sand zu speichern oder über die Schneckenförderung zu entnehmen. Beide Silos verfügen über eine Speicherkapazität für 8 t Sand. Um den Füllstand der Silos jederzeit feststellen zu können sind diese mit Hilfe von Wägezellen im Stahlgerüst aufgehängt. Diese Wägezellen mit implementierten Dehnmessstreifen werden als Folge des Silogewichtes elastisch verformt, wodurch sich ihr elektrischer Widerstand ändert. Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Gewicht wird genutzt um mit Hilfe eines Signalwandlers das Silogewicht zu bestimmen.

5.1.9. Messcontainer und Leitsystem

Wie bereits zuvor erwähnt, verfügt die Anlage über eine Steuerzentrale in den Räumlichkeiten eines Containers. Mit Blick auf den Wärmetauscher können hier alle relevanten Bedienungen der Anlage durchgeführt werden. Das Prozessleitsystem der Firma B & R übernimmt die Steuerung aller Antriebselemente, Visualisierung der Messwerte sowie deren Aufzeichnung. Eine weitere wesentliche Aufgabe des Leitsystems ist die Warnung vor Grenzwerten bzw. gegebenenfalls auch die Abschaltung der Anlage bei Gefahr. In Abbildung 5.13 wird die Wärmetauscher-Bedienungsoberfläche dargestellt.

Für eine umfassende Beschreibung der einzelnen Anlagekomponenten wird auf [4] verwiesen.

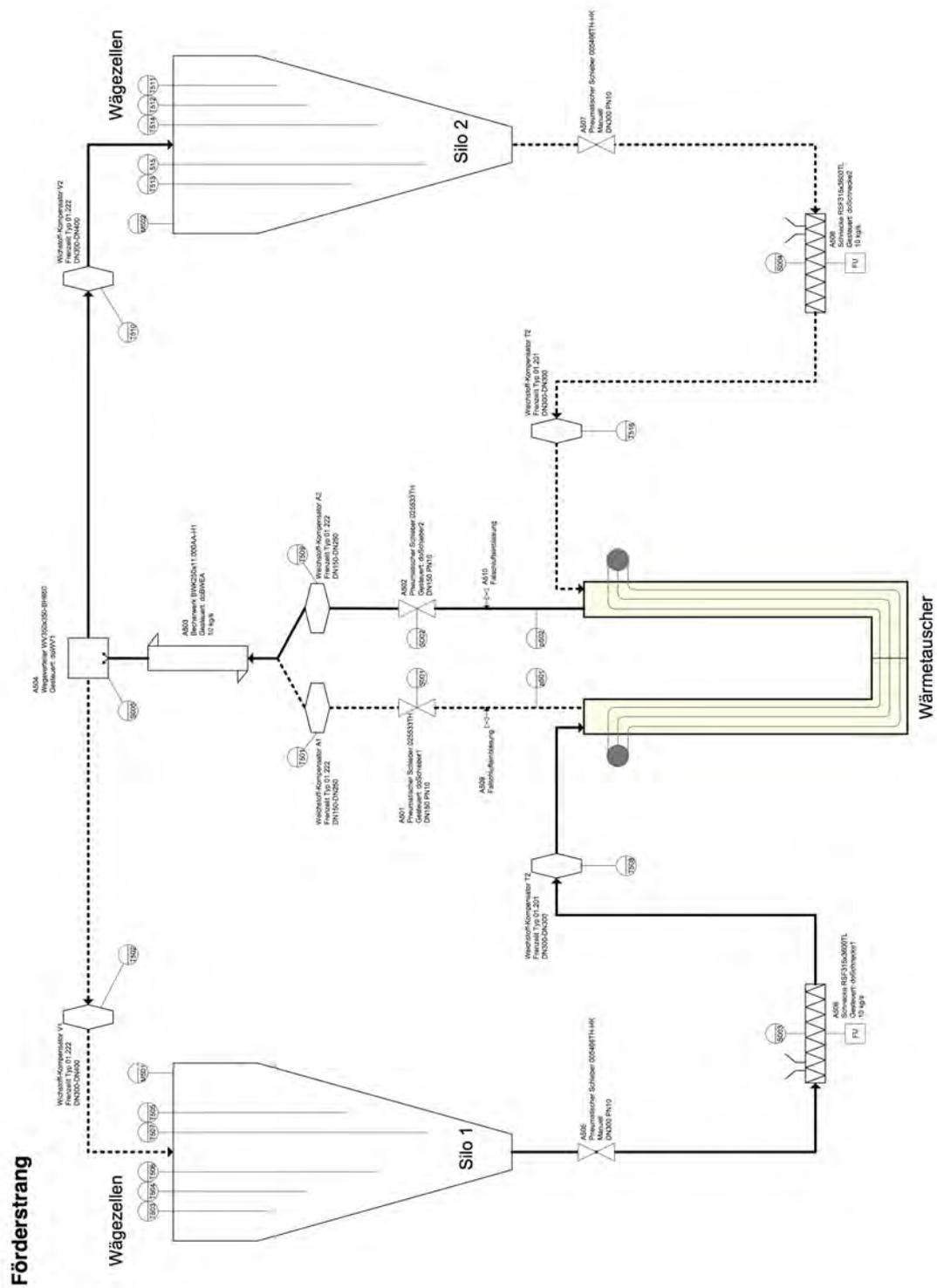


Abbildung 5.12.: R & I Fließschema der SandTES Förderanlage.

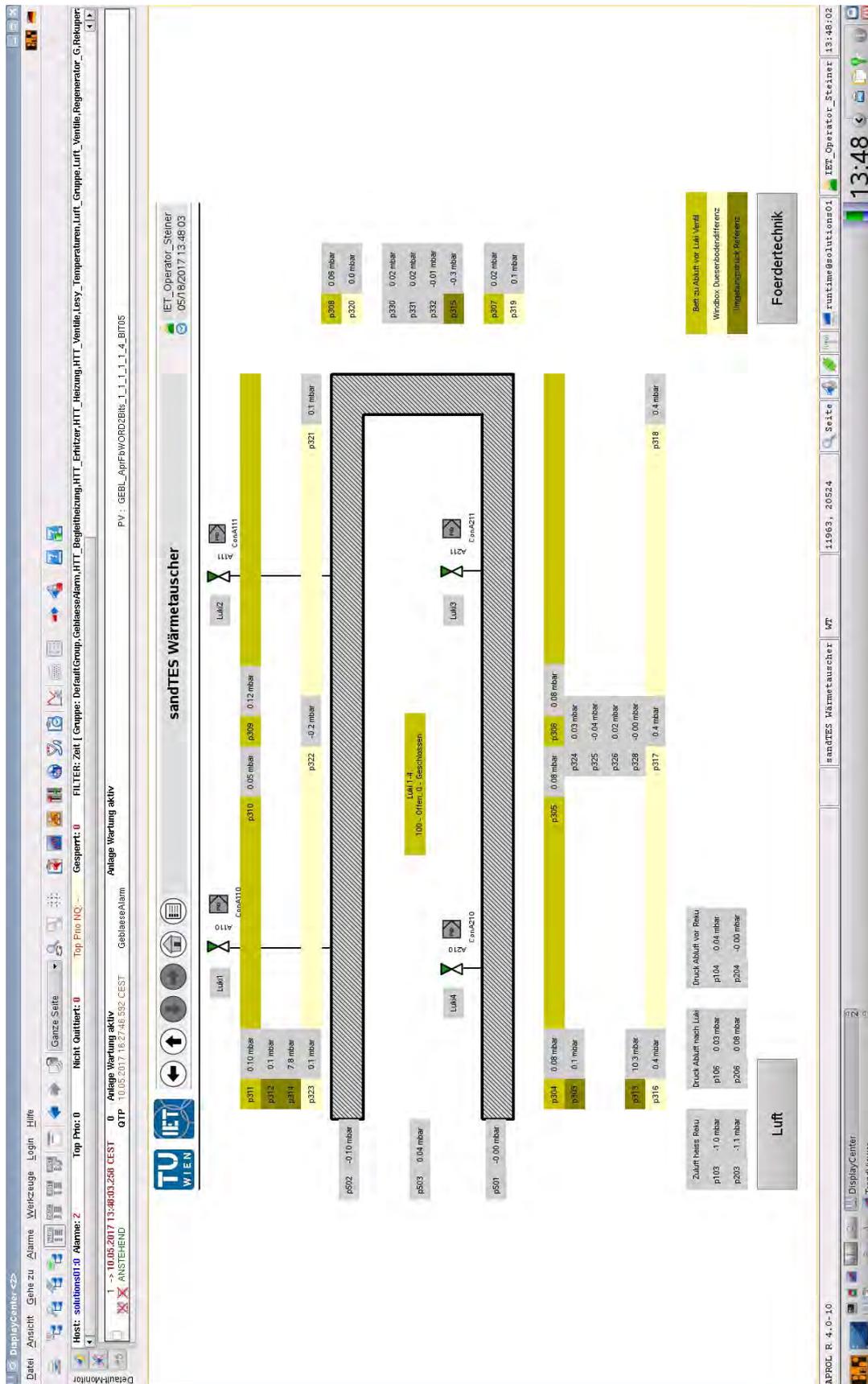


Abbildung 5.13.: Bedienungs Oberfläche für den SandTES Wärmetauscher Apröl.

6. Durchgeführte Versuche

Das Konzept dieser Pilotanlage beruht auf mehreren zuvor durchgeführten Versuchen und den Erkenntnissen vorangegangener wissenschaftlicher Arbeiten. So konnte die Funktion des Düsenverteilerbodens und die Luftkissentechologie bereits zuvor an kleineren Prüfständen bestätigt werden. In dieser Arbeit soll das Betriebsverhalten und die Performance der Anlage durch verschiedenste Kaltversuche analysiert werden. Nach erfolgreich absolvierter Kalttestphase soll die Anlage isoliert und weiterführende Heißtests vorgenommen werden.

6.1. Rückstau-Versuch

Wie bereits zuvor erläutert wurde, stützt sich das SandTES-Konzept auf die durch den Höhenunterschied zwischen Ein- und Ausgang ergebende Triebkraft für die horizontale Förderung des Sandes. Eine genaue Untersuchung der auf diesen Effekt einwirkenden Einflüsse scheint daher von besonderer Bedeutung zu sein.

Die Viskosität der Wirbelschicht, bestehend aus Feststoffen und Luft, verursacht einen Rückstau innerhalb des Wärmetauschers. Dieser verursachte Rückstau wurde für unterschiedliche zugeführte Sandmassenströme und diverse Fluidisierungsgrade bereits in Versuchen an der Anlage untersucht. Hierbei wird auf die Arbeiten von Steiner [15] und Krassini [9] verwiesen.

Dieser auftretende Rückstau hat einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkonstruktion, da sich die notwendige Wärmetauscherhöhe aus dem sich einstellenden Höhenunterschied ergibt. Weiters stehen mit diesem Effekt die Auslegung des Düsenverteilerbodens sowie die benötigte Leistung der Nebenaggregate in enger Verbindung.

Grundlegend könnten aus den Rückstau-Versuchen von Steiner [15] folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- mit steigendem Fluidisierungsgrad nimmt der Rückstau über die horizontale WT-Achse ab, wobei
- sich durch Erhöhung des Sandmassenstromes das Rückstauverhalten erhöht.

Am Ende der Kaltversuchsphase wurden die Kaltkästen des Wärmetauschers entfernt. Um deren Einfluss auf das WT-Verhalten zu untersuchen wurde der Rückstau-Versuch anschließend nochmals wiederholt. Die Ergebnisse aus diesem Versuch werden in Kapitel 6.2.6 vorgestellt.

6.2. Dynamikversuche

Ein Großteil der im Zuge dieser Arbeiten durchgeführten Versuche beschäftigt sich mit dem dynamischen Verhalten der WT-Konfiguration. Hier soll unter anderem das grundlegende Ansprechverhalten genauer untersucht werden. Auch die Auswirkungen unterschiedlicher Parameteränderungen auf die WT-Performance soll hier aufbereitet werden.

6.2.1. Start-Stop Versuch

Das Ansprechverhalten einer Anlage ist ein wesentliches Merkmal dieser und daher von großer Bedeutung. Da in diesem Fall eine Pilotanlage untersucht wird kann hier auf Erfahrungswerte nicht zurückgegriffen werden. Im ersten Versuch wird das An- und Herunterfahren der Anlage bei unterschiedlichen Fluidisierungszuständen untersucht. Kombiniert mit variablen Schneckendrehzahlen, welche gleichbedeutend mit einem unterschiedlich zugeführten Sandmassenstrom sind, wird das Anlagenverhalten über eine bestimmte Intervalllänge untersucht. Da es sich bei der SandTES Anlage um einen Wärmetauscher handelt mit dessen Hilfe später Lade- und Entlade Vorgänge umgesetzt werden sollen, ist das Ansprechen nach dem Einschalten der Sandförderung bzw. die nötige Zeit für das Erreichen eines stationären Zustandes bei abgeschalteter Förderung wichtig.

In den folgenden Versuchen wurde das Hauptaugenmerk auf die sich während des Betriebes ergebenden Auffälligkeit und die Anlagencharakteristik gelegt. Auf benötigte Zeiten für das An- und Herunterfahren der Anlage wurde bewusst nicht näher eingegangen da es sehr schwierig ist hier für alle bei den Versuchsreihen verwendeten Parametern konsistente Beurteilungskriterien bezogen auf den stationären Betrieb zu formulieren. In Arbeit [16] wird dagegen auch auf die benötigten Zeiten eingegangen welche das Bett nach Sandförderung benötigt um wieder einen stationären Zustand zu erreichen.

Für eine qualitative Beurteilung der Messergebnisse wurde versucht die Versuchsdurchführung möglichst ident zu gestalten.

Versuchserklärung Start-Stop Versuch

Ausgehend von einer stationären Wirbelschicht wird nach einer Dauer von einer Minute über die Förderschnecke dem Wärmetauscher Sand zugeführt. Dieser variierte Sandmassenstrom wird über eine Zeitdauer von fünf Minuten aufrecht erhalten. Danach wird die Schnecke gestoppt. In den folgenden fünf Minuten kann sich die Sandmasse über die Wirbelschicht im Wärmetauscher ausgleichen um wieder einen stationären Zustand anzunehmen. Die für die Wirbelschicht und den horizontalen Sandtransport nötige Fluidisierungsluft wird über einen Luftstrang den Windboxen zugeführt. Während dem Versuch sollen mögliche Bedienungsgrenzen aufgezeigt werden. Dieser Versuch wird unter den gleichen

Bedingungen und Parametern in beiden Förderrichtungen durchgeführt. Dabei sollen Anlageneigenheiten und Unterschiede sichtbar gemacht werden.

Begonnen wurde mit der Sandförderung von Silo1 nach Silo2 was der Versuchsnummer GID 018 entspricht. Ziel ist es das Ansprechen der Anlage beim An- sowie Herunterfahren der Sandförderung bei einer Fluidisierung mit einem Luftmassenstrom von $80 \text{ g/s} - 150 \text{ g/s}$ zu untersuchen. Als geeignete Schneckendrehzahl wurde hier ein Wert von 850 rpm für die Sandförderung gewählt.

In Abbildung 6.1 ist das Messprotokoll der Start-Stop Versuche angeführt. Es ist erkennbar das mit dem Parameter 1 der Luftmassenstrom in einem Bereich zwischen $80 \text{ g/s} - 150 \text{ g/s}$ geregelt wurde. Der Sandmassenstrom als Parameter 2 wurde in einem Drehzahlintervall von $450 \text{ rpm} - 850 \text{ rpm}$ dem Wärmetauscher zugeführt.

Um in weiterer Folge die Versuche besser nachvollziehen zu können, wird hier kurz auf die Versuchseinteilung und deren Klassifizierung eingegangen. Jeder Versuch (z.B. Start-Stop Versuch) hat eine GID-Nummer (Gruppen Identity Document), mit welcher die Versuchsgruppe zusammengefasst werden kann. Innerhalb dieser Gruppe erfolgt die Unterscheidung der einzelnen Versuche durch eine VID-Nummer. Diese Einteilung kann in Abbildung 6.1 dem Messprotokoll für den Start-Stop Versuch mit der Förderrichtung 1-2 wiedergefunden werden.

6.2.1.1. Durchführung Start-Stop Versuch

Als erster Schritt ist es notwendig die Betriebsgrenzen auszuloten. Dafür wurde bei einer Schneckendrehzahl von 850 rpm mit einem Luftmassenstrom von 100 g/s begonnen. Nach erfolgreicher Versuchsdurchführung wurde der Luftmassenstrom auf 80 g/s gesenkt. Bei dieser Fluidisierung ist das Wirbelbett unterhalb der Förderschnecke zusammengebrochen. Um diese mögliche Anwendungsgrenze und deren Ergebnisse zu überprüfen, wurde dieser Versuch auch in die umgekehrte Förderrichtung (mit der Versuchsnummer GID 019) wiederholt. Auch hierbei konnte eine Wirbelschicht unterhalb der Förderschnecke mit einer Drehzahl von 850 rpm nicht aufrecht gehalten werden. Um das Kollabieren der Wirbelschicht in weiterer Folge zu verhindern wurde der Luftmassenstrom erhöht. In Abbildung 6.2 ist zu erkennen, dass bei einer Steigerung von 80 g/s auf 90 g/s und einer gleichbleibenden Schneckendrehzahl von 850 rpm auch unter dem Sandeinlass die Wirbelschicht aufrecht gehalten werden konnte.

Da es keinen eindeutigen Wert gibt ab dem noch von einer intakten Wirbelschicht ausgegangen werden kann, wird hier nun ein Minimalwert von 5 mbar für den Druckabfall $\Delta p_{Düse}$ definiert. Somit ist aus Abbildung 6.2 ersichtlich, dass bei einer Erhöhung des Luftmassenstromes um 10 g/s der Wert für $\Delta p_{Düse}$ einen konstanten Wert von 9 mbar annimmt, wäh-

SandTES-Pilotanlage Messprotokoll

GID	Versuchsgruppe	VIDs	Vorgänger VID	Nachfolger VID
018		217 - 316		
Bearbeiter	Beginndatum	Beginnzeit	Enddatum	Endzeit
JG	04/05/2017	15:21	23/05/2017	21:57

	Bezeichnung	Wert	Einheit	PLS-Variable
Zielgröße	Dp_v			Druckp313, Druckp314
Parameter 1	Luftmassenstrom	80..150	g/s	LuftMassenstrom1/2
Parameter 2	Sandmassenstrom	450..850	rpm	Schnecken Drehzahl
Parameter 3				
Weitere relevante PLS-Variablen	Druckverlust über Wirbelschicht bzw. Betthöhe: p313, p314, p315 Druckverlust über Düsenboden: p316-p323 pos. Sandgefälle in folge von Luftkissenregelung: p304-p311			

Versuche

VID	Zeitstempel Beginn	Zeitstempel Ende	p ¹	Bemerkung
217	04/05/2017 15:21	04/05/2017 15:44	100	1. Versuch
218	04/05/2017 15:56	04/05/2017 16:13	80	Bett zusammengebrochen
219	04/05/2017 16:18	04/05/2017 16:29	80	Bett zusammengebrochen
220	04/05/2017 16:44	04/05/2017 17:02	130	
221	04/05/2017 17:18	04/05/2017 17:42	100	Wiederholung
225	10/05/2017 12:23	10/05/2017 12:36	100	ohne Luki Regelung
226	10/05/2017 12:49	10/05/2017 13:01	130	ohne Luki Regelung
227	10/05/2017 13:14	10/05/2017 13:27	150	ohne Luki Regelung
			P2	
234	10/05/2017 17:33	10/05/2017 17:44	650	ohne Luki Regel P1 130
235	10/05/2017 17:47	10/05/2017 17:58	450	ohne Luki Regel P1 130
			P1	
311	23/05/2017 19:49	23/05/2017 20:00	90	850 rpm
312	23/05/2017 20:09	23/05/2017 20:20	110	850 rpm
313	23/05/2017 20:29	23/05/2017 20:40	130	850 rpm
314	23/05/2017 20:53	23/05/2017 21:04	150	850 rpm
			P2	
315	23/05/2017 21:14	23/05/2017 21:25	650	130 g/s
316	23/05/2017 21:46	23/05/2017 21:57	450	130 g/s

Bemerkungen

In den Versuchen VID217-227 wurde bei einer konst. Schneckendrehzahl von rpm 850 der Parameter P1 variiert. In den Versuchen VID234-235 wurde bei einem konst. Luftmassenstrom von 130g/s der Parameter P2 variiert. Förderrichtung ist von Silo 1 nach Silo 2. Luftmassenstrom wird über einen Strang den WB zugeführt. Die Ergebnisse von VID 217-221 sind durch Lukiregelung während des Messversuchs verfälscht worden und sind dadurch nochmals durchgeführt worden.
Eine Schneckendrehzahl von 850rpm ist für den Massenstrom von 80 g/s vermutlich zu gering, diese Vermutung wird bei VID019 nochmals in die entgegengesetzte Richtung untersucht.

Ansprechperson: Peter Steiner, peter.p.steiner@tuwien.ac.at, 01 58801 302 333

Abbildung 6.1.: Messprotokoll der Start-Stop Versuche GID 018.

rend bei der Fluidisierung mit 80 g/s der Druckverlust durch den Düsenboden $\Delta p_{Düse}$ deutlich unter 5 mbar liegt. Somit kann auch beim geringsten Fluidisierungsgrad $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ und dem höchsten zugeführten Sandmassenstrom $n = 850 \text{ rpm}$ während dieses Versuches eine intakte Wirbelschicht gewährleistet werden.

Wie dem Messprotokoll in Abbildung 6.1 zu entnehmen ist (VID 311-VID 314), wurde eine Versuchsreihe mit variablem Fluidisierungsgrad, beginnend mit 90 g/s und einer konstanten Schneckendrehzahl von 850 rpm, erstellt. Der Luftmassenstrom \dot{m}_L und somit der Fluidi-

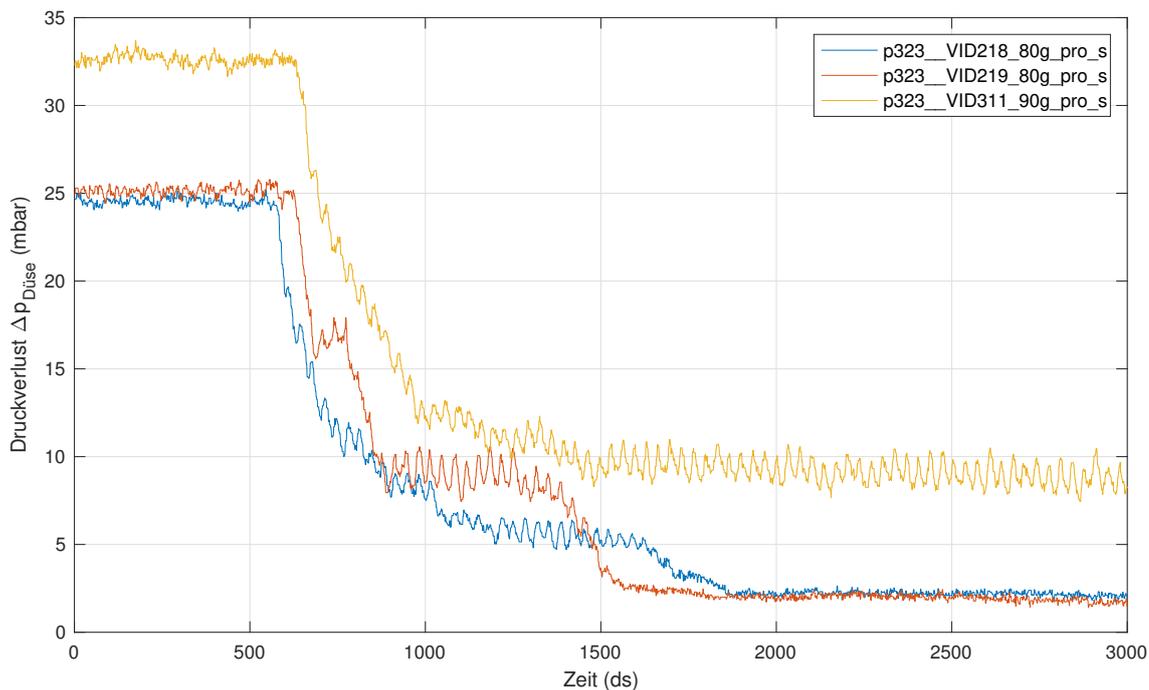


Abbildung 6.2.: Gegenüberstellung von $\Delta p_{Düse}$ bei einer Fluidisierung mit 80 g/s bzw. 90 g/s GID 018.

sierungsgrad wurde dabei schrittweise um 20 g/s erhöht. Für eine anschauliche Darstellung der Messergebnisse wird in Abbildung 6.3 der Absolutdruck der Sensoren p313, p314, p315 dargestellt.

Dieser Absolutdruck steht im Zusammenhang mit der Betthöhe [15]. Rückblickend auf Gleichung 4.1 wird der Druckverlust unter anderem durch das Wirbelschichtbett von der Betthöhe ΔH_{Bett} und der Porosität Ψ beeinflusst. Mit einem gemessenen Durchschnittswert von $\Psi = 0.54$ ergibt sich daher ein Umrechnungsfaktor zwischen Betthöhe und Absolutdruck von $u = 0.84\text{ cm/mbar}$ [15]. Somit entsteht eine gefällige Möglichkeit zur Umrechnung zwischen gemessenem Absolutdruck und der Betthöhe im Inneren des Wärmetauschers.

Die Sensoren p313 und p314 befinden sich an Ein- und Auslass des Wärmetauschers, p315 sitzt stirnseitig auf der Symmetrielinie des WT. Damit kann der Bettlevelanstieg entlang der horizontalen Wärmetauscherachse bei unterschiedlichen Fluidisierungsgraden verdeutlicht werden.

Um alle folgenden Diagramme verständlicher zu gestalten wird stets eine Legende angeführt. Die Kurvenbezeichnungen in der Legende setzen sich dabei aus dem betreffenden Sensor, der Schneckendrehzahl in $n = \text{rpm}$, dem Fluidisierungsgrad $\dot{m}_L = \text{g/s}$ und der VID Nummer zusammen.

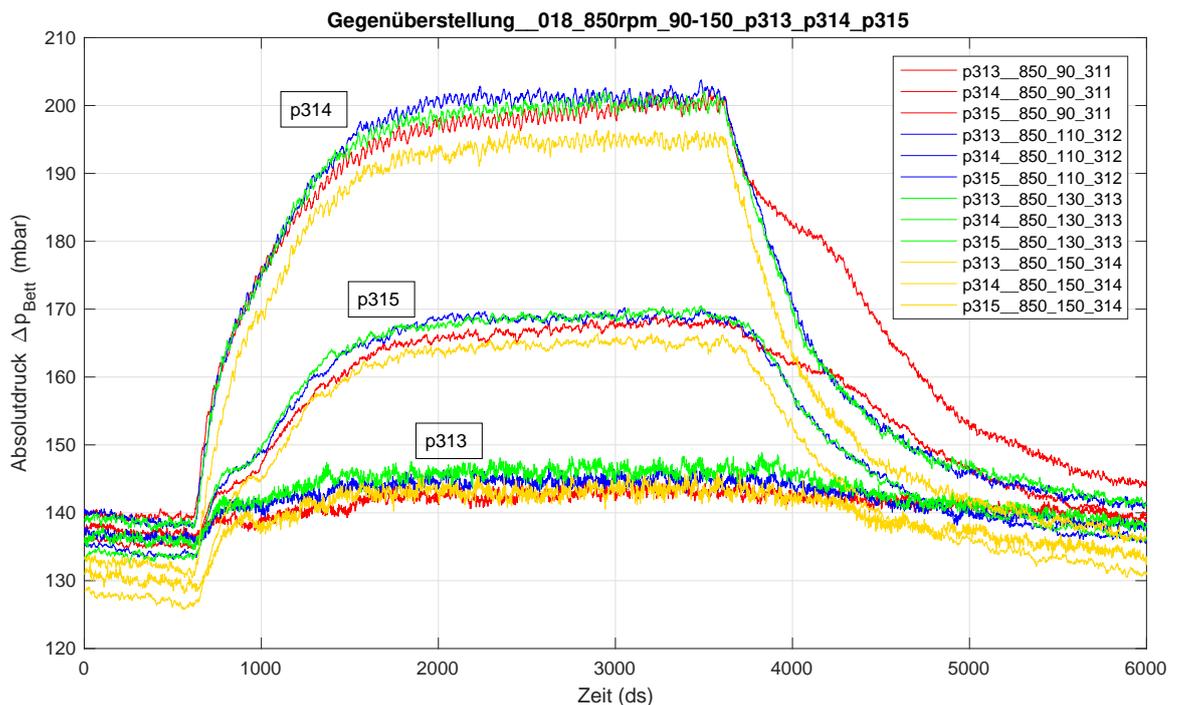


Abbildung 6.3.: Gegenüberstellung von p313, p314, p315 GID 018.

In Abbildung 6.3 wurden die unterschiedlichen Fluidisierungsgrade farblich getrennt. Die oberen vier Kurven geben den von p314 gemessenen Anstieg des Absolutdruckes unterhalb der Förderschnecke deutlich wieder, demgegenüber fällt der Druckanstieg der Sensoren p315 und p313 während der Sandförderung deutlich geringer aus.

Erweitert man die Gegenüberstellung der Sensoren p313-p315 mit dem Druckverlust über den Düsenboden am Ein- und Austritt (p316 und p323) erhält man Abbildung 6.4. Durch diese Abbildung lässt sich gut erkennen, dass je höher der Luftmassenstrom ist desto höher ist die Geschwindigkeit über die Drosselblende in den Düsen, wodurch sich bei einem hohen Fluidisierungsgrad ein hoher Druckabfall im Verteilerboden ergibt. Es ist nun klar, dass bei einem hohem Luftmassenstrom die zugeführte Hilfsenergie zusätzlich durch den höheren Druckverlust ansteigt.

Folgende Auffälligkeiten ergeben sich aus Abbildung 6.3 und 6.4:

Interpretation Messergebnisse GID 018, variabler Fluidisierungsgrad \dot{m}_L , Abbildung 6.3 und 6.4

- Je höher der Fluidisierungsgrad gewählt wurde desto schneller stellt sich ein horizontaler Kurvenverlauf der Sensoren p313 bis p315 während der Sandförderung ein.
- Während sich bei den Kurvenverläufen der Absolutdrucksensoren von $\dot{m}_L = 110 \text{ g/s}$

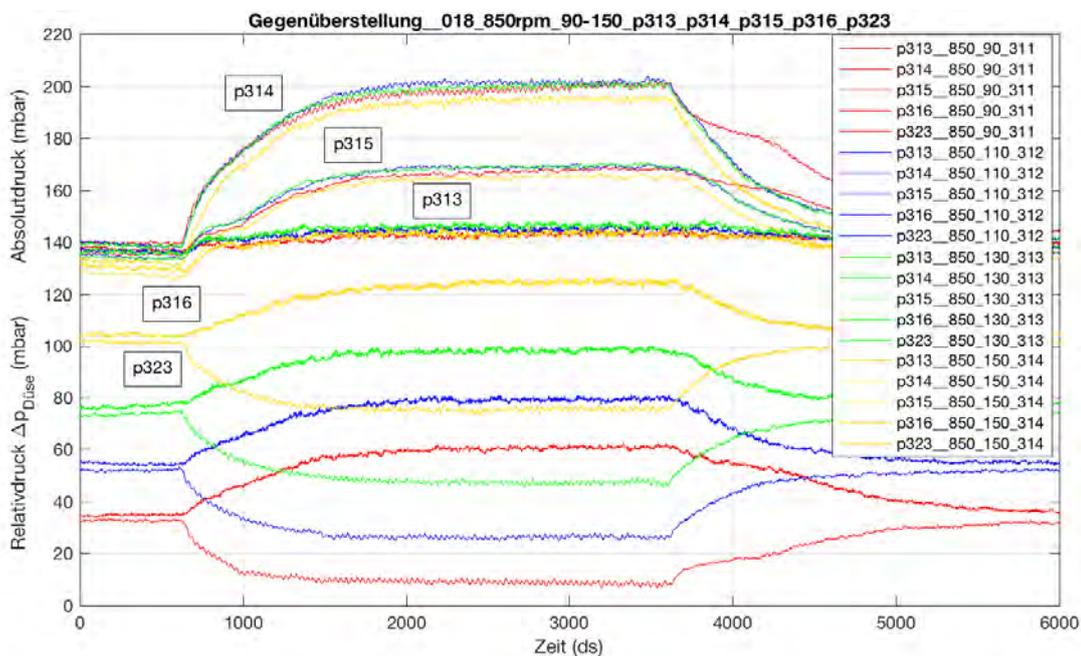


Abbildung 6.4.: Gegenüberstellung von p313, p314, p315, p316, p323 GID 018.

150 g/s ein horizontaler Verlauf bei Sandförderung einstellt, ist bei Minimalfluidisierung $\dot{m}_L = 90$ g/s ein leichter Aufwärtstrend zu erkennen.

- Nach dem Abschalten der Förderschnecke, in jenem Zeitbereich in dem sich die Betthöhe wieder abbaut, ist ein Buckel im Kurvenverlauf der roten Kurve bei p314 ($\dot{m}_L = 90$ g/s) zu erkennen.
- Im ausgeglichenen Zustand zu Beginn des Versuches ergibt sich ein relativ großer Unterschied des Absolutdruckes zwischen höchster Fluidisation (gelbe Kurve) zum Rest der anderen Versuche. Da der Absolutdruck direkt mit der Betthöhe in Verbindung steht, ist zu erkennen, dass bei stärkerem Fluidisierungsgrad die Betthöhe geringer ist als bei schwacher Fluidisierung.
- Die Reihenfolge der Kurven p314, p315 und p313 entspricht nicht der logischen Anordnung entsprechend des Fluidisierungsgrades. Damit ist gemeint, dass nach logischen Ansätzen die Kurve der niedrigsten Fluidisierung (in diesem Fall $\dot{m}_L = 90$ g/s, entspricht der roten Linie) den geringsten Sanddurchsatz durch den Wärmetauscher und somit den höchsten Sandlevel hervorrufen müsste. Die weitere absteigende Reihenfolge der restlichen Kurven sollte dann mit dem steigenden Luftmassenstrom einher gehen. Somit müsste der höchste Luftmassenstrom (für diese Versuchsreihe $\dot{m}_L = 150$ g/s, entspricht gelber Linie) den niedrigsten Absolutdruck hervorrufen. Zusätzlich kommt es zwischen p314 und p313 zu einer Änderung der Reihenfolge (rot - gelb). Dieser Effekt soll zu einem späteren Zeitpunkt genauer erörtert werden.

- Die Anordnung der Kurven p316 und p323 entspricht dem Anstieg des Fluidisierungsgrades. (siehe dazu Abbildung 6.4)
- je höher der Luftmassenstrom ist, desto schneller gleichen sich p316 und p323 nach dem Abschalten der Förderschnecke wieder aus. Dabei sticht der degressive Anstieg des Drucksensors p323 nach dem Abschalten der Förderschnecke bei höheren Fluidisierungsgraden ins Auge.

Diese Erkenntnisse sollen nun mit den Ergebnissen des selben Versuches in die entgegengesetzte Förderrichtung (GID 019) abgeglichen werden. Das zugehörige Messprotokoll ist in Abbildung 6.5 ersichtlich.

In Abbildung 6.6 werden wieder die Drucksensoren p313, p314, p315 sowie p323 und p316 dargestellt. Beim Versuch VID 306 wurde die Schneckenförderung zu früh gestartet (siehe hellgrüne Linie 6.6). Um diesen Versuchsfehler auszugleichen wurden die Startwerte der Messung VID 229 verwendet, welche unter den selben Versuchsparametern (850 rpm und 130 g/s) durchgeführt wurden. Diese Korrektur wurde jedoch nur für p313 angefertigt, für p323 und p316 wurden die Messwerte von VID 229 herangezogen.

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus Abbildung 6.6 zusammenfassen:

Interpretation Messergebnisse GID 019, variabler Fluidisierungsgrad \dot{m}_L , Abbildung 6.6

- Im Gegensatz zum Versuch GID 018 weist hier der Versuch mit dem höchsten Luftmassenstrom nicht den geringsten Absolutdruck unterhalb der Förderschnecke auf. Daher ist auch hier die angenommene logische Reihenfolge nicht gegeben. Die restliche Kurvenanordnung des Drucksensors p313 (von oben: blau, grün, rot) ist ident mit jenen Ergebnissen aus dem Start-Stop Versuch GID 018.
- Auch die Messergebnisse für p323 und p316 lassen sich qualitativ gut mit jenen von GID 018 vergleichen.
- Im ausgeglichenen Wirbelschichtbett am Beginn des Versuches lässt sich erkennen, dass die Silo 1-Seite niedrigere Werte für p323 als p316 aufweist. Dies könnte einerseits einen messtechnischen Hintergrund in Form eines Messfehlers haben, aber auch darauf hinweisen, dass zwischen linker und rechter Wärmetauscherseite ein geringer Niveauunterschied besteht.
- Bei einem Luftmassenstrom von 90 g/s tritt, wie zuvor in Versuch GID 018, beim Abschalten der Förderschnecke ein Buckel auf.
- Um die unterschiedliche benötigte Zeitdauer besser erkennen zu können, welche bei

SandTES-Pilotanlage Messprotokoll

GID	Versuchsgruppe	VIDs	Vorgänger VID	Nachfolger VID
019		222 - 310		
Bearbeiter	Beginndatum	Beginnzeit	Enddatum	Endzeit
JG	04/05/2017	18:08	23/05/2017	19:33

	Bezeichnung	Wert	Einheit	PLS-Variable
Zielgröße	Dp_v			Druckp313, Druckp314
Parameter 1	Luftmassenstrom	80..150	g/s	LuftMassenstrom1/2
Parameter 2	Sandmassenstrom	450..850	rpm	Schnecken Drehzahl
Parameter 3				
Weitere relevante PLS-Variablen	Druckverlust über Wirbelschicht bzw. Betthöhe: p313, p314, p315 Druckverlust über Düsenboden: p316-p323 pos. Sandgefälle in folge von Luftkissenregelung: p304-p311			

Versuche

VID	Zeitstempel Beginn	Zeitstempel Ende	P 1	Bemerkung
222	04/05/2017 18:08	04/05/2017 18:26	100	
223	04/05/2017 18:29	04/05/2017 18:49	130	
224	04/05/2017 18:52	04/05/2017 19:00	80	Bett zusammengebrochen
228	10/05/2017 14:02	10/05/2017 14:13	100	ohne Luki Regelung
229	10/05/2017 14:22	10/05/2017 14:33	130	ohne Luki Regelung
230	10/05/2017 15:58	10/05/2017 16:09	150	ohne Luki Regelung
			P2	
231	10/05/2017 16:19	10/05/2017 16:30	650	ohne Luki Regel P1 130
232	10/05/2017 16:41	10/05/2017 16:52	450	ohne Luki Regel P1 130
233	10/05/2017 17:14	10/05/2017 17:25	650	ohne Luki Regel P1 130
			P1	
305	23/05/2017 17:26	23/05/2017 17:37	110	850 rpm
306	23/05/2017 17:59	23/05/2017 18:10	130	850 rpm
307	23/05/2017 18:21	23/05/2017 18:32	150	850 rpm
310	23/05/2017 19:22	23/05/2017 19:33	90	850 rpm
			P2	
308	23/05/2017 18:42	23/05/2017 18:53	650	130 g/s
309	23/05/2017 19:00	23/05/2017 19:11	450	130 g/s

Bemerkungen

In den Versuchen VID222-230 wurde bei einer konst. Schneckendrehzahl von rpm 850 der Parameter P1 variiert. In den Versuchen VID231-233 wurde bei einem konst. Luftmassenstrom von 130g/s der Parameter P2 variiert. Förderrichtung ist von Silo 2 nach Silo 1. Luftmassenstrom wird über einen Strang den WB zugeführt. Die Ergebnisse von VID 222-224 sind durch Lukiregelung während des Messversuchs verfälscht worden und sind dadurch nochmals durchgeführt worden. eine Schneckendrehzahl von 850rpm ist für den Massenstrom von 80 g/s vermutlich zu wenig.

Ansprechperson: Peter Steiner, peter.p.steiner@tuwien.ac.at, 01 58801 302 333

Abbildung 6.5.: Messprotokoll der Start-Stop Versuche GID 019.

den verschiedenen eingesetzten Luftmassenströmen benötigt wird damit sich p316 und p323 wieder einem stationären Wert näher, wurde die Legende aus dem Diagramm geschoben (siehe Abbildung 6.6). Dabei treten durchaus größere zeitliche Unterschiede zwischen den höchsten und niedrigsten Fluidisierungswerten auf.

Wie im Messprotokoll Abbildung 6.1 ersichtlich ist, wurde im Anschluss an diese Versuche der konstante Parameter gewechselt, um den Einfluss eines variablen Sandmassenstromes \dot{m}_S (450 rpm – 850 rpm) gegenüber einer konstant gehaltenen Fluidisierung mit 130 g/s zu analysieren. In Abbildung 6.7 ist die Auswertung dieser Messergebnisse abgebildet.

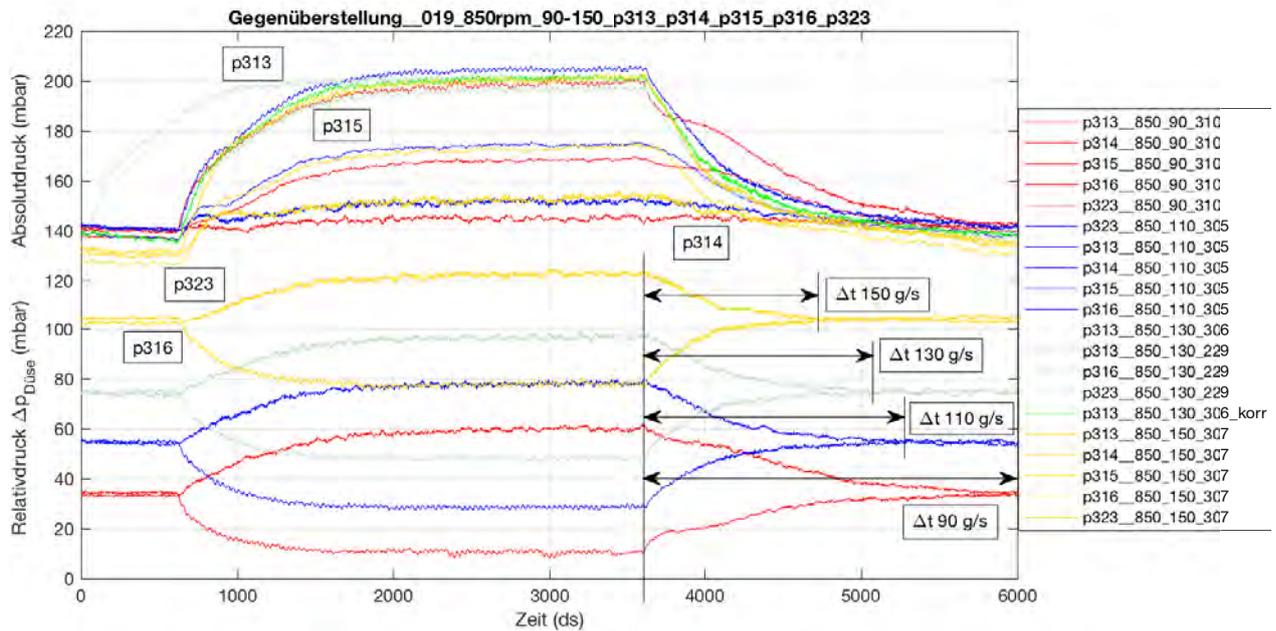


Abbildung 6.6.: Gegenüberstellung von p313, p314, p315, p316, p323 GID 019.

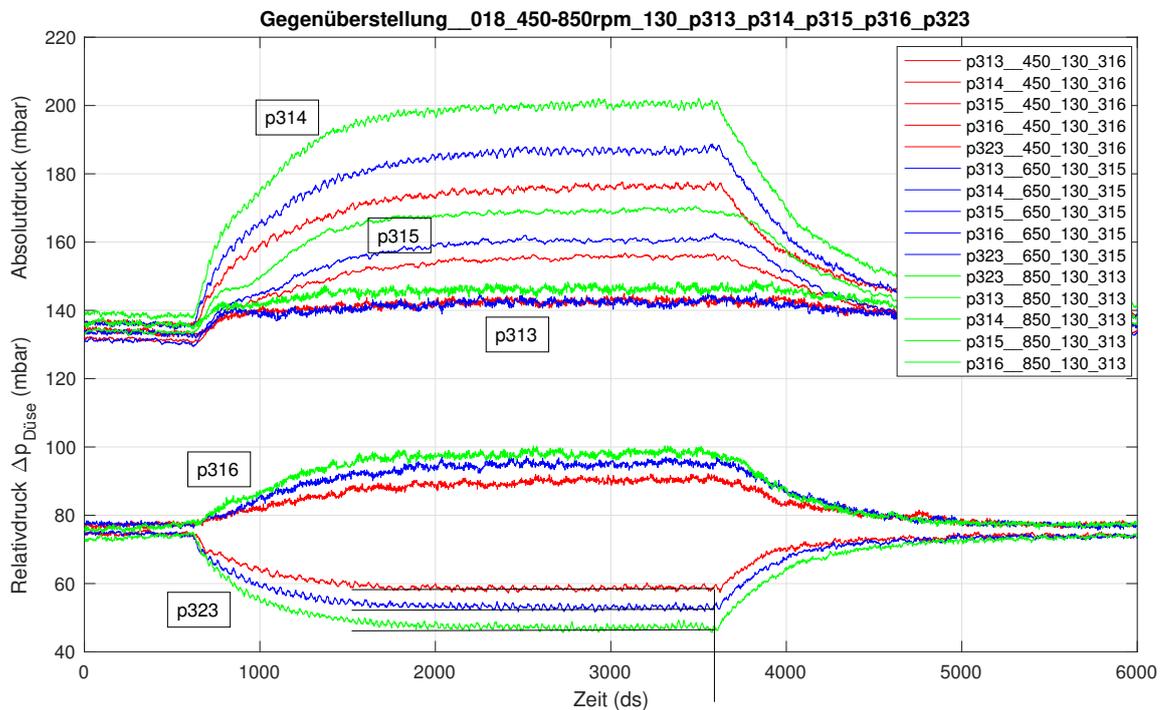


Abbildung 6.7.: Gegenüberstellung von p313, p314, p315, p316, p323 GID 018.

Interpretation Messergebnisse GID 018, variabler Sandmassenstrom \dot{m}_S , Abbildung 6.7

- Die Variation der Schneckendrehzahl und der damit verbundene Sandmassenstrom

\dot{m}_S zeigt eine klare Abstufung der unterschiedlichen Messpunkte.

- Die Reihenfolge der unterschiedlichen Sandmassenstrom-Kurven zeigt dabei die gleiche logische Anordnung der verwendeten Sandmassenströme $\dot{m}_S = 450 \text{ rpm} - 650 \text{ rpm}$.
- Die Abstände zwischen den Kurven werden von p314 bis p313 immer geringer. Vor allem der beinahe idente Verlauf der Kurven $450 \text{ rpm} - 650 \text{ rpm}$ bei p313 ist dabei auffällig. Das bedeutet, dass sich die Drücke und somit die Betthöhen am WT-Einlass deutlicher unterscheiden als die Betthöhen am WT-Auslass.
- Die Relativdruck-Differenz der Kurvenverläufe p316 und p323 wächst mit steigender Schneckendrehzahl an. Damit kann das Ausweichen der Fluidisierungsluft auf Düsen mit geringerem Druckverlust über das Wirbelschichtbett veranschaulicht werden (Weg des geringsten Widerstandes). Durch dieses Ausweichverhalten entstehen an der anderen WT-Seite (Auslass, p316) hohe Geschwindigkeiten und dadurch hohe Druckabfälle über die Drosselblende. Der Druckabfall über den unterhalb des Einlasses verbauten Sensors p323 ist somit gering, da hier wenig Luft strömt und der Druckabfall nach Gleichung 4.3 geringer ausfällt. Es ist daher verständlich, dass bei einem geringeren Sandmassenstrom dieses Ungleichgewicht nicht so stark ausgeprägt ist und sich daher geringere Relativdruck-Differenzen ergeben.
- Je höher die Schneckendrehzahl ist, desto länger dauert es einen stationären Betrieb des Sensors p323 während der Sandförderung zu erreichen. Diese auftretenden Unterschiede sind jedoch relativ gering.

Um die gefundenen Zusammenhänge [16] für das Rückstauverhalten der Pilotanlage mit jenen Messergebnissen von GID 018 und 019 abgleichen zu können, soll nun etwas tiefer in die Ergebnisauswertung eingegangen werden. Dafür wurden die Absolutdruckdifferenzen zwischen p313 und p314 aufbereitet welche in Zusammenhang mit dem Betthöhenunterschied zwischen Ein- und Auslass stehen.

Für die Berechnung von p313 und p314 wurde dabei der Mittelwert über die gesamte Versuchsdauer herangezogen. Der Rückstau wurde bei GID 018 mit p314-p313 und bei GID 019 mit Hilfe von p313-p314 errechnet. Die Messwerte des Versuches VID 306* wurden wieder aus den Messergebnissen von VID 306 und 229 adaptiert.

Interpretation Messergebnisse Rückstau Berechnung GID 018 019, variabler Luftmassenstrom, Abbildung 6.8

- Mit steigendem Fluidisierungsgrad sinkt der Rückstau ab. Diese Aussage stimmt damit mit Steiner [15] überein.

Rückstau GID 018-019, variabler Luftmassenstrom

018	VID	g/s	rpm	Differenz p314-p313 (mbar)
	018_850_090_311	90	850	30,81544973
	018_850_110_312	110	850	27,81295664
	018_850_130_313	130	850	26,40717426
	018_850_150_314	150	850	24,84839985

019	VID	g/s	rpm	Differenz p313-p314 (mbar)
	019_850_090_310	90	850	27,42506145
	019_850_110_305	110	850	24,57756805
	019_850_130_306*	130	850	22,69499632
	019_850_150_307	150	850	21,19507765

in mbar

	90 g/s	110 g/s	130 g/s	150 g/s
018	30,81545	27,813	26,4072	24,84839985
019	27,42506	24,5776	22,695	21,19507765

*...aus VID 306 und VID 229 zusammengebaut

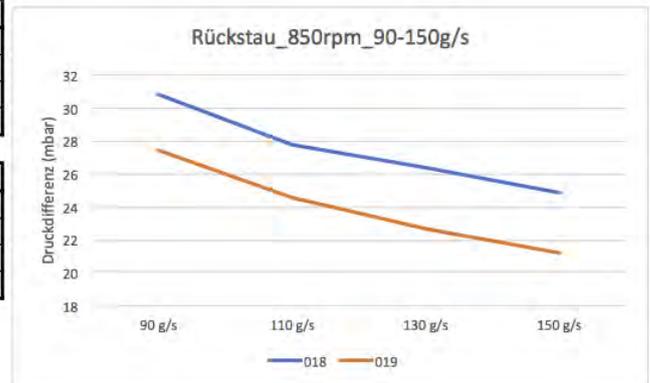


Abbildung 6.8.: Rückstau Berechnung GID 018 019, variabler Luftmassenstrom.

- Wie schon in den zuvor gezeigten Abbildungen sind auch hier Unterschiede zwischen den Förderrichtungen zu erkennen, welche jedoch qualitativ durch den Kurvenverlauf sehr ähnlich sind. Auf diesen Sachverhalt soll auch in den kommenden Versuchen eingegangen werden.
- Die Werte für die Luftmassenströme 110 g/s – 150 g/s zeigen einen linearen Kurvenverlauf. Einzig durch den Versuch bei 90 g/s ergibt sich im Kurvenverlauf ein geringfügiger Knick. Rückblickend auf Abbildung 6.3 und 6.4 kann dieser Knick mit dem Buckel nach dem Abschalten der Sandförderung in Verbindung gebracht werden.

Um eine stichhaltige Überprüfung der Rückstauereffekte zu gewährleisten wurde auch die Versuchsreihe mit variablem Sandmassenstrom untersucht.

Rückstau GID 018-019, variabler Sandmassenstrom

018	VID	g/s	rpm	Differenz p314-p313 (mbar)
	018_850_130_313	130	850	26,40717426
	018_650_130_315	130	650	21,77420023
	018_450_130_316	130	450	16,4731152

019	VID	g/s	rpm	Differenz p313-p314 (mbar)
	019_850_130_306*	130	850	22,69499632
	019_650_130_308	130	650	18,1819423
	019_450_130_309	130	450	12,95250139

in mbar

	850 rpm	650 rpm	450 rpm
018	26,4072	21,7742	16,4731152
019	22,695	18,1819	12,95250139

*...aus VID 306 und VID 229 zusammengebaut

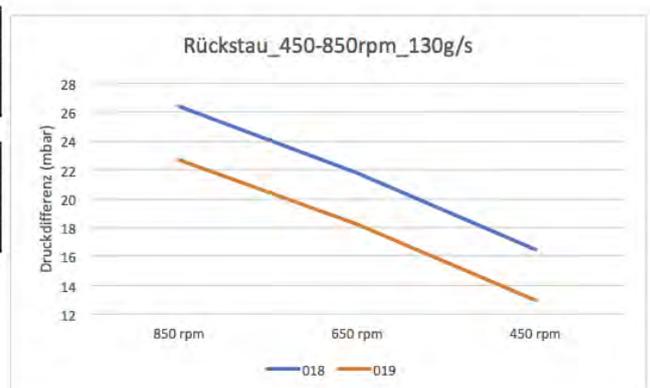


Abbildung 6.9.: Rückstau Berechnung GID 018 019, variabler Sandmassenstrom.

Interpretation Messergebnisse Rückstau Berechnung GID 018 019, variabler Sandmassenstrom, Abbildung 6.9

- Mit sinkendem Sandmassenstrom sinkt auch der Rückstau effekt im Wärmetauscher, auch hier stimmt das Ergebnis mit jenem von [15] überein.
- Wie bereits in Abbildung 6.8 fallen Messergebnisse unter GID 018 (Förderrichtung Silo1-Silo2) etwas höher als unter GID 019 aus.
- Davon abgesehen zeigen die Kurvenverläufe ein sehr einheitliches Bild.

6.2.1.2. Ergebnisse Start-Stop Versuch

Im Zuge des Start-Stop Versuches wurde eine Messreihe mit variablem Luftmassenstrom bei konstantem Sandmassenstrom, sowie eine weitere Messreihe bei der dem variablen Sandmassenstrom ein konstanter Luftmassenstrom gegenübergestellt wurde, durchgeführt. Um eine gute Aussagekraft der Messergebnisse zu erreichen, wurden diese Messreihen unter gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Da alle Versuche für beide Förderrichtungen angefertigt wurden, konnten hier erste Anlagen-Charakteristiken gefunden werden.

Folgende Ergebnisse konnten durch den Start-Stop Versuch gefunden werden:

Endinterpretation Messergebnisse Start-Stop Versuch

- Um eine intakte Wirbelschicht über eine Sandmassenförderzeit von 5 min bei der Schneckendrehzahl von $n = 850 \text{ rpm}$ gewährleisten zu können, ist ein minimaler Luftmassenstrom \dot{m}_L von 90 g/s erforderlich. (Abbildung 6.2)
- Je höher der Fluidisierungsgrad, desto schneller stellt sich ein horizontaler Kurvenverlauf während der Sandförderung am Absolutdruck messenden Sensor unterhalb der Förderschnecke ein. Beim geringsten gefahrenen Messpunkt, bei dem der Luftmassenstrom 90 g/s verwendet wurde, stellte sich dabei kein konstanter Absolutdruck ein. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass bei geringem Luftmassenstrom der Absolutdruck länger als 5 min ansteigt und sich die Anordnung der Messkurven bei einer längeren Versuchsdauer vermutlich noch geändert hätte. (Abbildung 6.3 und 6.4)
- Der bei einer Fluidisierung mit 90 g/s ersichtliche Buckel im Kurvenverlauf nach dem Abschalten der Sandförderung führt auch bei der anschließend durchgeführten Rückstaumessung zu einem Knick im konstanten Kurvenverlauf. Da dieser Buckel lediglich bei einer Fluidisierung von 90 g/s auftritt kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt durch eine nicht voll intakte Wirbelschicht ausgelöst wurde. (siehe Abbildung 6.8)

- Mit steigendem Luftmassenstrom steigt auch die Geschwindigkeit in den Düsen und somit auch der Druckabfall über die Drosselblenden. Ein hoher Fluidisierungsgrad erfordert somit auch einen dementsprechenden höheren Anteil an Hilfsenergie.
- Ein hoher Fluidisierungsgrad bewirkt ein schnelleres Ausgleichen der Sensoren p316 und p323 nach dem Abstellen der Sandförderung. Es bildet sich dabei immer mehr ein degressiver Kurvenverlauf aus. (siehe Abbildung 6.6)
- Bei variablen Sandmassenstrom \dot{m}_S zeigt sich eine deutliche und logische Abstufung zwischen den Kurvenverläufen ausgelöst durch die unterschiedliche eingebrachte Sandmasse. Die Abstände der Absolutdrücke zwischen den unterschiedlichen Schneckendrehzahlen werden über die Länge der Wärmetauscherachse in Richtung Auslass immer geringer. (siehe Abbildung 6.7)
- Die Relativdruck-Differenz der Kurvenverläufe p316 und p323 wächst mit steigender Schneckendrehzahl an, wodurch das Ausweichen der Fluidisierungsluft auf Düsen mit geringerem Druckverlust durch das Wirbelschichtbett veranschaulicht werden kann. Die Luft geht daher immer den Weg des geringsten Widerstandes. (siehe Abbildung 6.7)
- Durch die Rückstau-Berechnung konnte der Zusammenhang zu den Ergebnissen mit [15] hergestellt werden. Die Aussagen, der Rückstauereffekt steigt mit der Schneckendrehzahl und sinkt mit steigendem Fluidisierungsgrad, wurden durch diese Messungen bestätigt.
- Im Zuge dieser Rückstau-Aufbereitung wurden Unterschiede, welche bedingt durch die Förderrichtung auftreten, erkennbar. Es liegt die Vermutung vor, dass diese durch diverse Imperfektionen der Anlage (Rohrbündelanordnung, Lagekriterien, usw.) ausgelöst werden.

6.2.2. Richtungswechsel-Versuch

In diesem Versuch soll noch näher auf die dynamische Charakteristik der Anlage eingegangen werden. Dabei wird die Förderrichtung während der Versuchsdauer mehrfach gewechselt. Heraus stechende Besonderheiten sollen dabei herausgearbeitet werden und einen weiteren Einblick auf Anlagencharakteristiken ermöglichen.

Versuchserklärung Richtungswechsel-Versuch

Ausgehend von einer stationären Sandförderung mit der Förderrichtung von Silo2 nach Silo1 wurde die Förderrichtung nach 2 min umgekehrt um anschließend in die Gegenrichtung wieder einen stationären Betrieb zu erreichen und den Sand von Silo1 nach Silo2 durch

den Wärmetauscher zu führen. Dieser Richtungswechsel wurde dann nach weiteren 5 und 10 min wiederholt, wodurch insgesamt drei Richtungswechsel durchgeführt wurden. Die Gesamtversuchsdauer beträgt damit 17 min. Um die diversen Zusammenhänge möglichst gut aufzubereiten wurden drei Versuchsreihen bei einer konstanten Förderschneckendrehzahlen und variablen Luftmassenströmen aufgenommen. Die Versuchsdurchführung wurde dabei für alle Einzellversuche möglichst ident wiederholt. In Abbildung 6.10 ist das zugehörige Messprotokoll angeführt.



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK
Institute for Energy Systems and Thermodynamics

SandTES-Pilotanlage Messprotokoll

GID	Versuchsgruppe	VIDs	Vorgänger VID	Nachfolger VID
020		236 .. 246		
Bearbeiter	Beginndatum	Beginnzeit	Enddatum	Endzeit
JG	11/05/2017	15:11	12/05/2017	15:12

	Bezeichnung	Wert	Einheit	PLS-Variable
Zielgröße	Dp_v			Druckp313, Duckp314
Parameter 1	Luftmassenstrom	90..130	g/s	LuftMassenstrom1/2
Parameter 2	Sandmassenstrom	450.. 850	rpm	Schnecken Drehzahl
Parameter 3				
Weitere relevante PLS-Variablen				

Versuche

VID	Zeitstempel Beginn	Zeitstempel Ende	P	Bemerkung
			P1	
236	11/05/2017 15:11	11/05/2017 15:27	110	rpm 650
237	11/05/2017 15:38	11/05/2017 15:55	90	rpm 650
238	11/05/2017 16:03	11/05/2017 16:20	130	rpm 650
			P1	
239	11/05/2017 16:28	11/05/2017 16:45	90	rpm 450
240	11/05/2017 17:00	11/05/2017 17:17	110	rpm 450
241	11/05/2017 17:23	11/05/2017 17:40	130	rpm 450
			P1	
242	11/05/2017 17:48	11/05/2017 18:05	90	rpm 850
243	12/05/2017 13:10	12/05/2017 13:27	110	rpm 850
244	12/05/2017 13:40	12/05/2017 13:57	130	rpm 850
			P1	
245	12/05/2017 14:42	12/05/2017 14:53	110	rpm 650, Wiederh.VID236
246	12/05/2017 14:55	12/05/2017 15:12	110	rpm 650, Wiederh.VID236

Bemerkungen

zu Beginn wurde von 2-1 stationär gefördert, nach 2min wurde die Förderrichtung getauscht (Auslasschieber1/2, Verteilerweiche, Schnecke 1/2) das Bett wieder ausgleichen lassen und somit wieder einen statischen Zustand zu erreichen. Dieser Richtungswechsel wurde dann nach weiteren 5 min und 10 min wiederholt. Somit wurden pro Versuch drei Richtungswechsel durchgeführt. nach diesen drei Wechsel wurde das Bett in 5 min wieder statisch ausgeglichen. Somit ergibt sich eine Versuchsdauer von 17min. VID 236 wurde wiederholt da hier schon nach einer min der erste Richtungswechsel durchgeführt wurde und somit nicht konsistent mit den restlichen Versuchen war.

Anspchperson: Peter Steiner, peter.p.steiner@tuwien.ac.at, 01 58801 302 333

Abbildung 6.10.: Messprotokoll der Richtungswechsel Versuche GID 020.

6.2.2.1. Durchführung Richtungswechsel-Versuch

Um die Erkenntnisse bezüglich Betriebsgrenzen aus den zuvor gewonnenen Messungen zu berücksichtigen, wurden die angewendeten Luftmassenströme mit 90 g/s, 110 g/s und 130 g/s, angelehnt an die Versuchsgruppe GID 018 und 019, durchgeführt (siehe dazu Abbildung 6.10). Die verwendeten Schneckendrehzahlen für die Versuchsdurchführung sind $n = 450$ rpm, 650 rpm und 850 rpm.

Zu Beginn soll die Aufmerksamkeit wieder auf die Drucksensoren am Ein- bzw Austritt (p313 und p314) sowie den Sensor in der Symmetrielinie des Wärmetauschers gerichtet werden. In Abbildung 6.11 ist dazu die Gegenüberstellung dieser Sensoren bei einer konstanten Schneckendrehzahl von $n = 450$ rpm angeführt.

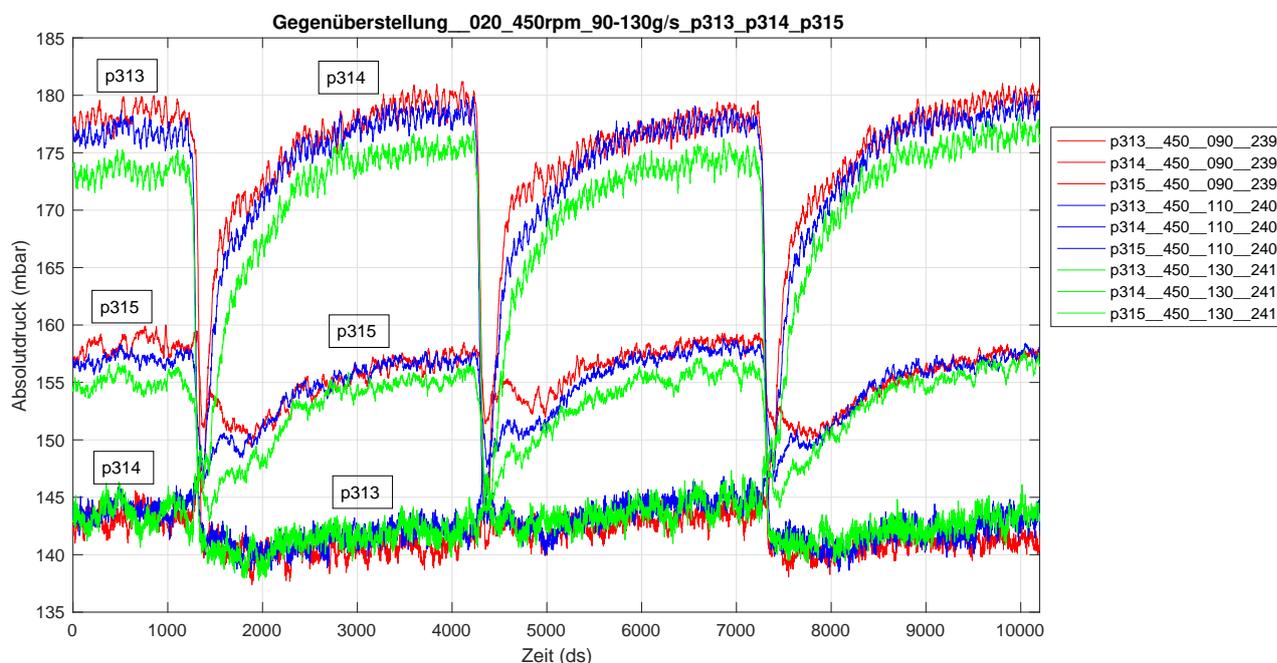


Abbildung 6.11.: Gegenüberstellung 450 rpm von p313, p314, p315 GID 020.

Auch für die Schneckendrehzahlen 650 rpm und 850 rpm wird dieses Diagramm angegeben.

Interpretation Messergebnisse GID 020 bei verschiedenen Drehzahlen, Abbildungen 6.11, 6.12 und 6.13

- In Abbildung 6.11 der Versuchsreihe mit dem geringsten Sandmassenstrom $\dot{m}_S = 450$ rpm ist zu erkennen, dass der maximale Absolutdruckanstieg des Sensors p314 stets jenen von p313 übersteigt. Auch lassen sich weitere Unterschiede zwischen den Förderrichtungen erkennen. Dieser Sachverhalt deutet wieder auf einen durch die Förderrichtung bedingten Betriebsunterschied hin.

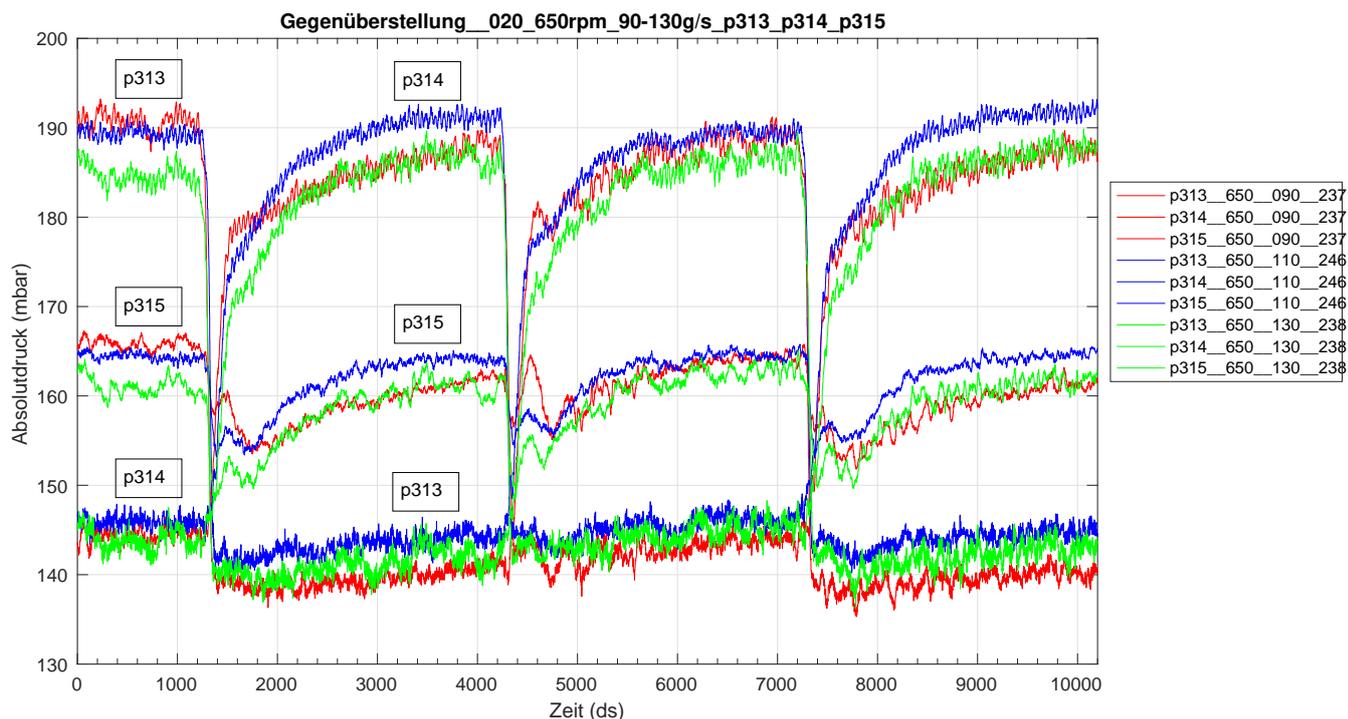


Abbildung 6.12.: Gegenüberstellung 650 rpm von p313, p314, p315 GID 020.

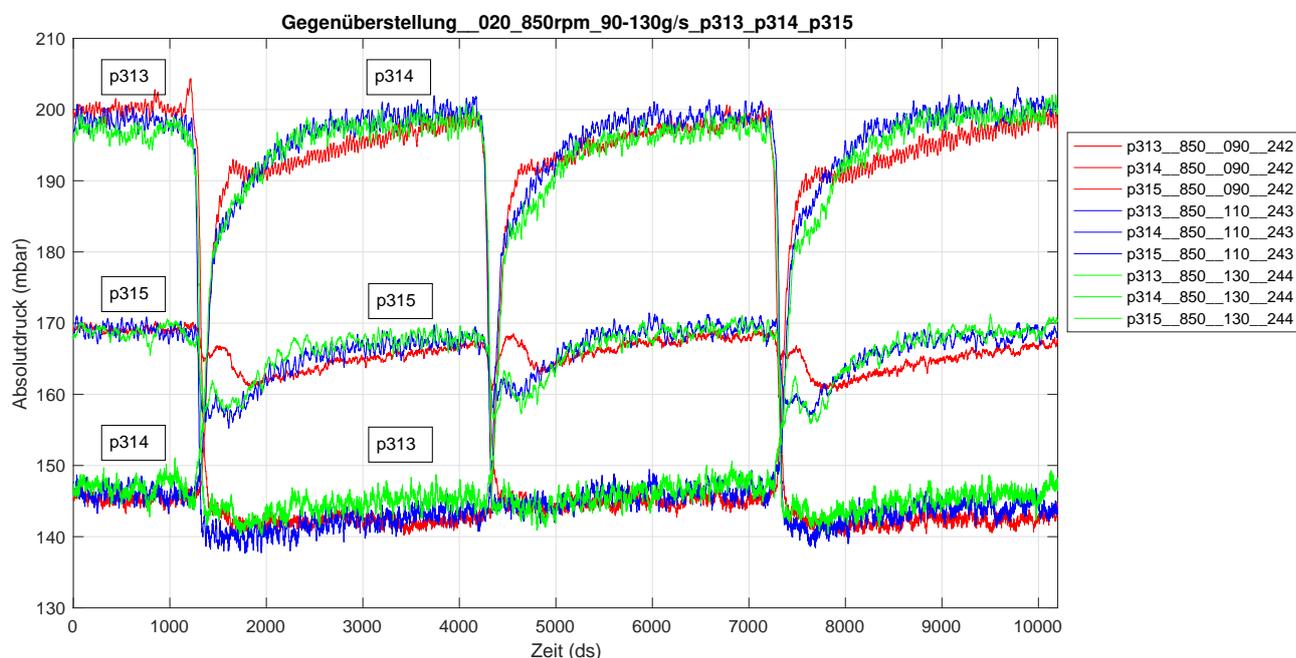


Abbildung 6.13.: Gegenüberstellung 850 rpm von p313, p314, p315 GID 020.

- Die Versuchsreihe mit $\dot{m}_S = 450$ rpm lässt die logische Anordnung der Fluidisierungsgradkurven erkennen (von oben: rot, blau und grün), wobei sich diese Reihenfolge in Richtung des steigenden Sandmassenstromes ($\dot{m}_S = 650$ rpm und 850 rpm) ändert.

Die blaue Absolutdrucklinie ist jedoch stets oberhalb der grünen Kurve. Dies deutet, wie schon beim Start-Stop Versuch angemerkt, darauf hin dass, die Förderzeit von 5 min zu gering ist um die logische Anordnung, vor allem bei hohen Sandmassenströmen herstellen zu können.

- Warum aber vor allem bei höheren eingebrachten Sandmassenströmen $n = 850 \text{ rpm}$ die Kurvenverläufe der geringsten Fluidisierung $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ am niedrigsten sind kann bis dato nicht erklärt werden. Dieses Verhalten bedeutet, dass der Bettlevelanstieg trotz geringerem eingebrachten Luftmassenstromes langsamer erfolgt als bei höherer Fluidisierung. Da sich aber ein kontinuierlicher Verlauf dieses Phänomens über die unterschiedlichen Messreihen abzeichnet, sollten Fehler in der Messprozedur eher ausgeschlossen werden können. Wird jedoch durch diese Messreihen ein falsches Ergebnis dargestellt, ist die naheliegendste Erklärung eine Fehlmessung des Drucksensors p314.
- Bei einer Fluidisierung mit $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ stellt sich unmittelbar nach dem Richtungswechsel stets ein steiler Anstieg ein, welcher danach aber wieder abfällt und somit als Peak in den roten Kurven ersichtlich ist. Dieser Effekt bildet sich mit steigendem Sandmassenstrom immer stärker aus. Vor allem an den Kurvenverläufen des Drucksensors p315 kann dieser Peak (aber auch bei den anderen Luftmassenströmen entdeckt werden).
- Generell verringern sich die Abstände zwischen den Kurven der einzelnen Sensoren mit steigendem Sandmassenstrom

Stellvertretend für alle drei Messreihen soll nun an Hand des Sandmassenstromes $\dot{m}_S = 450 \text{ g/s}$ der Relativdruckverlust $\Delta p_{Düse}$ über den Düsenboden dargestellt werden, siehe dazu Abbildung 6.14.

Interpretation Messergebnisse Relativdruck Düsenboden p316 und p323 GID 020, Abbildung 6.14

- Die Kurvenanordnung entspricht der Steigerung des Fluidisierungsgrades. Ein höherer Luftmassenstrom entspricht daher einem höheren Relativdruck der Sensoren p313 und p323. Dies wird durch höhere Geschwindigkeiten beim Durchströmen der Drosselblende hervorgerufen.
- Der Differenzrelativdruck zwischen p323 und p316 sinkt mit steigender Fluidisierung, dadurch wird wieder die Umverteilung der Luft über die Windbox verdeutlicht. So kommt es bei einer höheren Fluidisierung unter der Förderschnecke im Vergleich zu niedrigeren Fluidisierungsgraden zu geringeren Betthöhen wodurch eine geringere Umverteilung der einströmenden Luft korrespondiert.

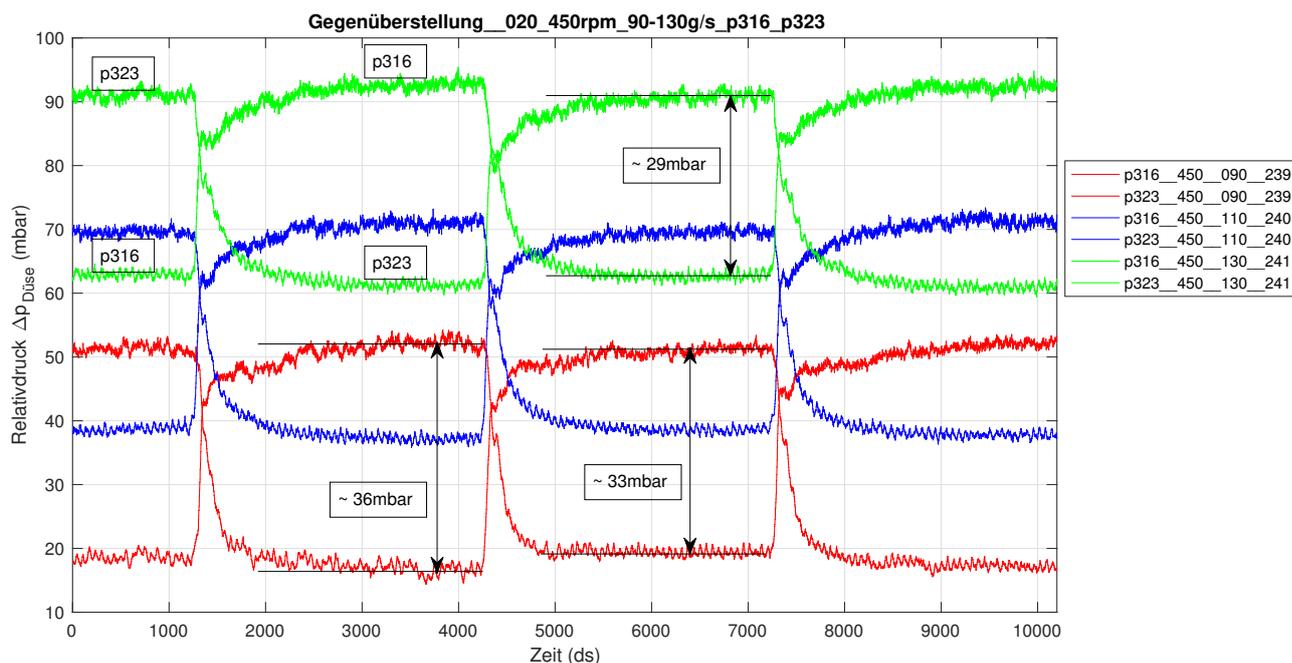


Abbildung 6.14.: Gegenüberstellung 450 rpm von p316, p323 GID 020.

- Die Form der Graphen passt qualitativ gut zusammen.
- Es sind jedoch leichte Unterschiede zwischen den Förderrichtungen durch höhere Relativdruckdifferenzen zwischen p313 und p323 erkennbar.

6.2.2.2. Ergebnisse Richtungswechsel-Versuch

Im Zuge des Richtungswechsel-Versuchs wurden drei Messreihen mit unterschiedlichen Sandmassenströmen ($n = 450 \text{ rpm}$, 650 rpm und 850 rpm) durchgeführt. In jeder dieser Messreihen wurde der Fluidisierungsgrad \dot{m}_L durch die Messpunkte 90 g/s , 110 g/s und 130 g/s variiert. Bei diesem hochdynamischen Versuch sind teilweise nicht vorhersehbare Effekte aufgetreten für die es logische Erklärungen zu finden gilt.

Bei diesem Versuch konnten folgende Erkenntnisse aus den Messwerten, welche die Anlagencharakteristik widerspiegeln, gewonnen werden.

Endinterpretation Messergebnisse Richtungswechsel-Versuch

- Die Versuchswerte lassen, wie schon im Start-Stop Versuch erwähnt, förderrichtung- bedingte Unterschiede erkennen. Diese werden durch die Absolutwerte und typische Kurvenverläufe sichtbar.
- Mit steigendem Sandmassenstrom ist ein langsamerer Anstieg der roten Linie (geringster Luftmassenstrom) erkennbar. Betrachtet man jedoch die Ausgangslage der

stationären Förderung in den ersten zwei Minuten der Versuche ist die logische Anordnung der Fluidisierungsgrade bei allen Sandmassenströmen gegeben. Daher ist für das Einstellen eines stationären Betriebs eine vermutlich zu kurze Zeitdauer von 5 min abzuleiten. (siehe dazu Abbildungen 6.11, 6.12 und 6.13)

- Bei der Förderrichtungsänderung ist vor allem an der Stelle der Symmetrieachse (p315) das Auftreten eines Peaks zu beobachten. Auch mit ansteigendem Sandmassenstrom lässt sich eine Verstärkung dieses Effektes erkennen. Vergleicht man diese Werte mit den Ergebnissen des Start-Stop Versuches sind dort keine Peaks zu finden. Aus diesem Grund ist es sehr naheliegend, dass dieser Peak durch den Richtungswechsel mit den damit verbundenen Trägheitskräften der Sandmasse in Verbindung gebracht werden kann (siehe Abbildung 6.13).
- Die Abstände zwischen den verschiedenen Fluidisierungsgradkurven einer Versuchsreihe verringern sich mit steigendem Sandmassenstrom. (siehe Abbildungen 6.11, 6.12 und 6.13)
- Der Differenzrelativdruck zwischen p323 und p316 im Düsenboden sinkt mit steigendem Luftmassenstrom ab. Dieses Verhalten kann mit der Umverteilung des Luftmassenstromes in der Windbox erklärt werden. (siehe Abbildung 6.14)
- Auch bei der Auswertung der Düsenboden-Messwerte ergibt sich ein Unterschied zwischen den beiden Förderrichtungen. Dies verhärtet den Verdacht auf förderrichtungsbedingte Anlagencharakteristik. (siehe Abbildung 6.14)

Da hier einige Phänomene nicht logisch erklärt werden konnten und aufgrund der hochdynamischen Versuchsdurchführung eine Vielzahl an Einflussfaktoren mitzubersichtigen sind, sollten hier weiterführende Versuche durchgeführt werden, um technisch plausible Erklärungen zu finden.

6.2.3. Düsenboden-Versuch

Der benötigte Leistungseinsatz der Hilfsantriebe um den stabilen Betrieb des Wärmetauschers garantieren zu können ist für die Auslegung des Prototyps entscheidend. Es soll bei diesem Versuch untersucht werden ob bzw. welchen Einfluss die Anzahl der Drosselblenden auf den Betrieb hat. Eine Reduktion der Drosselblenden würde eine Reduktion der eingesetzten Hilfsantriebe mit sich bringen, was sich direkt positiv auf den Anlagenwirkungsgrades auswirkt.

Versuchserklärung Düsenboden-Versuch

Um diese Thematik versuchstechnisch zu erproben, werden die voneinander gasdicht ge-

trennten Düsenbodenmodule über einen Luftschlauch miteinander verbunden. Damit ist es der Fluidisierungsluft möglich sich über mehrere Düsenboxen auszugleichen, wodurch es zu einem einheitlichen Luftmassenstrom über diese Düsenblenden und somit den Sinterboden kommt. Siehe dazu auch Abbildung 5.5.

Um den Einfluss des Düsenbodens zu untersuchen ist es von Vorteil diese Versuche an der untersten Betriebsgrenze des Wärmetauschers durchzuführen. Wie bereits in Kapitel 6.2.1.1 erwähnt ist es schwierig einen genauen Messwert zu definieren bei dem gerade noch von einer intakten Wirbelschicht ausgegangen werden kann, da das Zusammenbrechen der Wirbelschicht schleichend erfolgt und neben dem Fluidisierungsgrad und Sandmassenstrom vor allem von der Versuchsdauer abhängig ist.

Zur Abschätzung dieser Betriebsgrenze wurde eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt um möglichst aussagekräftige Betriebsparameter zu erhalten. Die Anwendung der folgenden Betriebsparameter wurde als sinnvoll erachtet: ein Luftmassenstrom \dot{m}_L von 100 g/s und ein Sandmassenstrom \dot{m}_S induziert durch die Schneckendrehzahl von 850 rpm. Damit wird ein hoher Sandmassenstrom bei mittlerem Fluidisierungsgrad dem Wärmetauscher zugeführt.

Ausgegangen wurde von einem ausgeglichenen Wirbelschichtbett ohne Sandförderung. Nach einer Versuchsdauer von 1 min wurde Sand durch die Förderschnecke 1 (850 rpm) dem Wärmetauscher zugeführt wodurch sich eine Förderung von Silo1 nach Silo2 einstellt. Diese Sandförderung wurde für 5 min aufrecht gehalten. Nach dem Abschalten der Schnecke wurde dem Wirbelschichtbett weitere 5 min Zeit gegeben um sich wieder ausgleichen zu können. Die daraus resultierende Versuchsdauer beträgt damit 11 min.

Beginnend an der Messstelle x330 wurde die Serienschaltung der Düsenboxen immer wieder durch eine Adaption der Luftausgleichsleitung um eine weitere Düsenbox erweitert. Daraus bildet sich beim Zusammenschluss von sieben Düsenboxen eine Serienschaltung von Messstelle x330 bis x324. In Abbildung 6.15 ist eine Detailansicht dieses Versuchsaufbaues zu sehen.

Diese Ausgleichsleitung wurde zusätzlich durch eine Relativdruckmessung zwischen Anfang und Ende der Leitung sowie einer Absolutdruckmessung ergänzt. Der Aufbau der Luftausgleichsleitung ist in den Abbildungen 6.16(a) und 6.16(b) dargestellt. Um einen ungestörten Ausgleich zwischen den Düsenboxen zu gewährleisten wurde eine Luftleitung mit dem Außendurchmesser von 10 mm, und somit vermutlich genügend großen Innendurchmesser, verbaut.

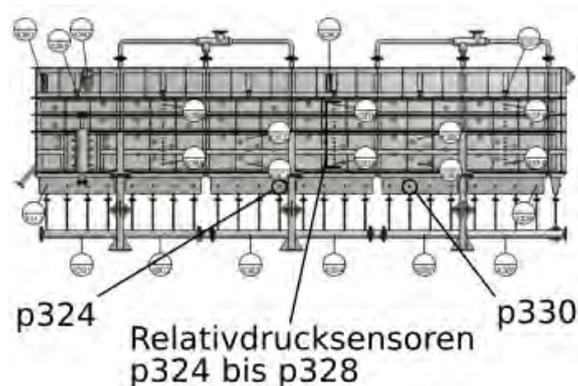


Abbildung 6.15.: Detailansicht des verwendeten Messaufbaus GID 024.



(a) Ausgangsanordnung des Versuches mit einer Düse

(b) Endanordnung der Serienschaltung mit 7 Düsen

Abbildung 6.16.: Ausführung der Luftausgleichsleitung im Zuge des Düsenbodenversuches, GID 024.

6.2.3.1. Durchführung Düsenboden-Versuch

Wie zuvor schon angeführt, wurde die erste Versuchsreihe mit den Parametern $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ und der Schneckendrehzahl $\dot{m}_S = 850 \text{ rpm}$ durchgeführt. Da der Düsenbodenverbund an der linken Wärmetauscherseite (Silo 2-Seite) installiert wurde und sich somit unter den Messstellen der Drucksensoren p324 bis p328 befindet (siehe auch Abbildung 5.6) sollen die, diesen Relativdruck messenden, Sensoren besondere Aufmerksamkeit zugesprochen werden. Leider konnte dabei nicht auf den Sensor p325 zurückgegriffen werden, da dieser in Folge eines defekten Siebes an der Messlanze falsche Werte lieferte. Neben diesen Drucksensoren wird auch eine Vielzahl anderer Sensoren untersucht um Auffälligkeiten während der Versuche aufzeigen zu können. In Abbildung 6.17 ist das zugehörige Messprotokoll ersichtlich.

Betrachtet man nun den Messsensor p324, welcher den Relativdruck zwischen den Messstellen X3DA und X3DB misst, ergibt sich Abbildung 6.18.

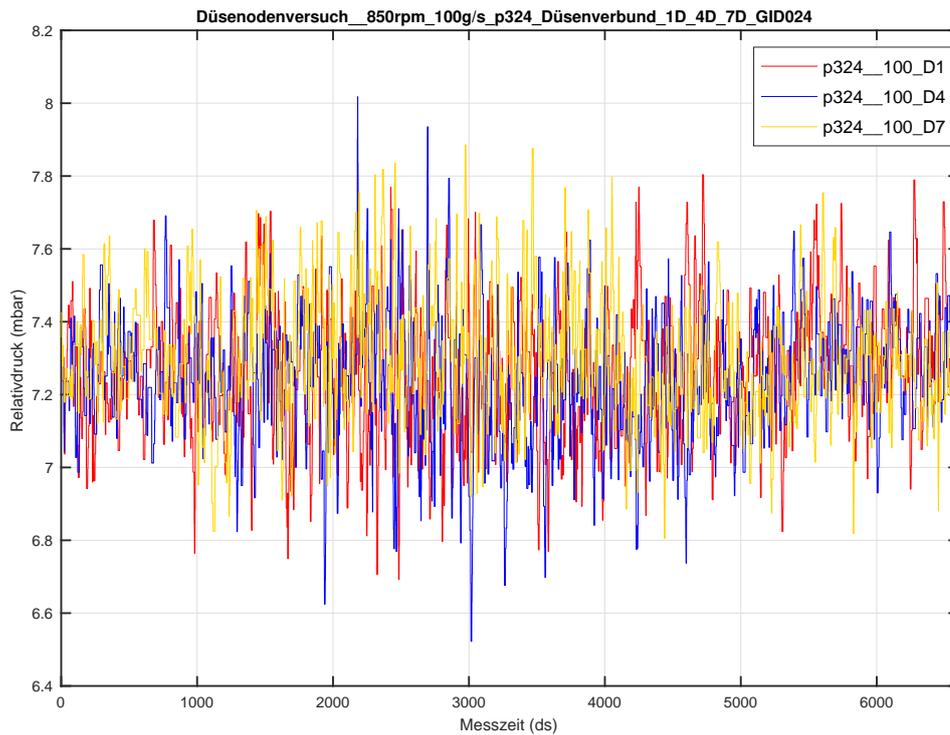


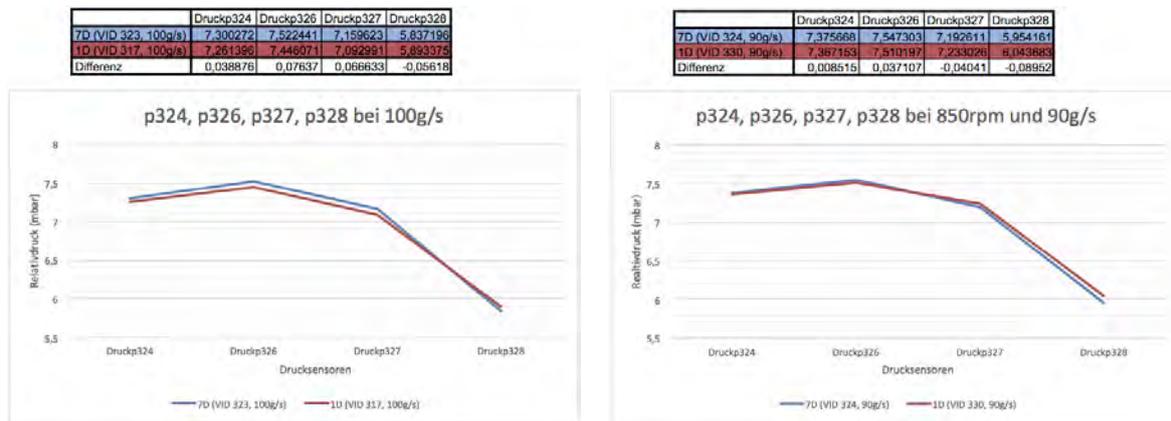
Abbildung 6.18.: Relativdruck p324 oberhalb des Düsenverbandes, 850rpm, 100g/s GID 024.

den p324-Resultaten sowie einer zweiten Messreihe mit $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$.

In Abbildung 6.19(a) ist die Auswertung der Relativdrücke der ersten Versuchsreihe mit $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ ersichtlich. Dem gegenüber wird in Abbildung 6.19(b) die zweite Versuchsreihe mit einer Reduktion der Fluidisierungsluft auf $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ dargestellt. Da die Messstellen für die Relativdruckmessungen (zB. bei p324 sind das x3DA und x3DB) jeweils eine konstante Höhendifferenz aufweisen ist ein unterschiedliches Ergebnis ausschließlich durch eine Änderung der Porosität zu erklären.

Interpretation Relativdruckmessung der Sensoren p324, p326, p327 und p328 bei GID 024, Abbildung 6.19

- Die messtechnischen Unterschiede zwischen den Messreihen $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ und $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ sind äußerst gering. Errechnete Differenzen zwischen den gasdicht abgetrennten Düsenboxen (entspricht in Abbildung 6.19(a) und 6.19(b) 1D) und dem Düsenverbund (entspricht in Abbildung 6.19(a) und 6.19(b) 7D) fallen äußerst niedrig aus, dabei lässt sich erst in der zweiten Nachkommastelle ein Unterschied feststellen. Bei so geringen Abweichungen sind eine Verfälschung der Versuchsergebnisse und somit mögliche Falschinterpretationen durch Messungenauigkeiten nicht auszuschließen.



(a) Relativdruck bei 100 g/s

(b) Relativdruck bei 90 g/s

Abbildung 6.19.: Relativdruckmessung der Sensoren p324, p326, p327 und p328 bei Versuch GID 024.

- An Hand des Relativdruckunterschiedes zwischen p324 und p328 ist ein klarer Abwärtstrend zu erkennen. Dies hängt mit den sinkenden Porositätsunterschieden zwischen den Messstellen Richtung Sandoberfläche zusammen und ist somit in Verbindung mit der Wirbelschichttheorie schlüssig zu erklären.
- Vergleicht man nun die Werte zwischen $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ (siehe Abbildung 6.19(a)) und $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ (siehe Abbildung 6.19(b)) ist zu erkennen, dass die Messergebnisse bei einem Fluidisierungsgrad von $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ geringfügig höher ausfallen. Dies ist gleichbedeutend mit einem höheren Porositätsunterschied über den konstanten Höhenunterschied zwischen zwei Messstellen. Daher ist der Porositätsunterschied und somit der Luftanteilunterschied bei geringerer Fluidisierung im Vergleich zu einer höheren Fluidisierung größer. Da diese Versuche an der unteren Betriebsgrenze durchgeführt wurden, entspricht auch dies den logischen Ansätzen der Wirbelschichttheorie. Es wird aber hier nochmals auf die geringen Absolutunterschiede zwischen den Messergebnissen hingewiesen, wodurch diese Aussagen aufgrund der Beeinflussung durch mögliche Messungenauigkeiten vorsichtig bewertet werden sollten.
- Auffällig ist auch der Abwärtstrend zwischen p324 und p328, dieser kann sowohl bei Abbildung 6.19(a) als auch bei Abbildung 6.19(b) beobachtet werden. Dieser Abfall des Relativdruckes p328 kann dadurch erklärt werden, dass die konstante Höhendifferenz zwischen X3DJ und X3DK im Inneren des Wärmetauschers nicht komplett mit Sand ausgefüllt ist. Aus diesem Grund liefert der Drucksensor im Vergleich zu den voll befüllten Abschnitten einen geringeren Wert. Als weitere Begründung könnte hier die, über die Steighöhe einer Wirbelschicht zunehmende Luftmenge, zum Beispiel

durch die Expansion der Luftblasen, genannt werden.

In weiterer Folge sollen die Messergebnisse der Relativdruckmessung über den Düsenboden (p316 bis p323) aufgearbeitet werden. Dazu werden die Ergebnisse für 100 g/s jeweils mit gasdicht abgetrennten Düsenboxen (entspricht in Abbildung 6.20 1D) und dem Düsenverbund (entspricht in Abbildung 6.20 7D) dargestellt. Um bei diesen Werten Auffälligkeiten aufzeigen zu können, wird in Abbildung 6.21 die zweite Messreihe mit 90 g/s ausgewertet.

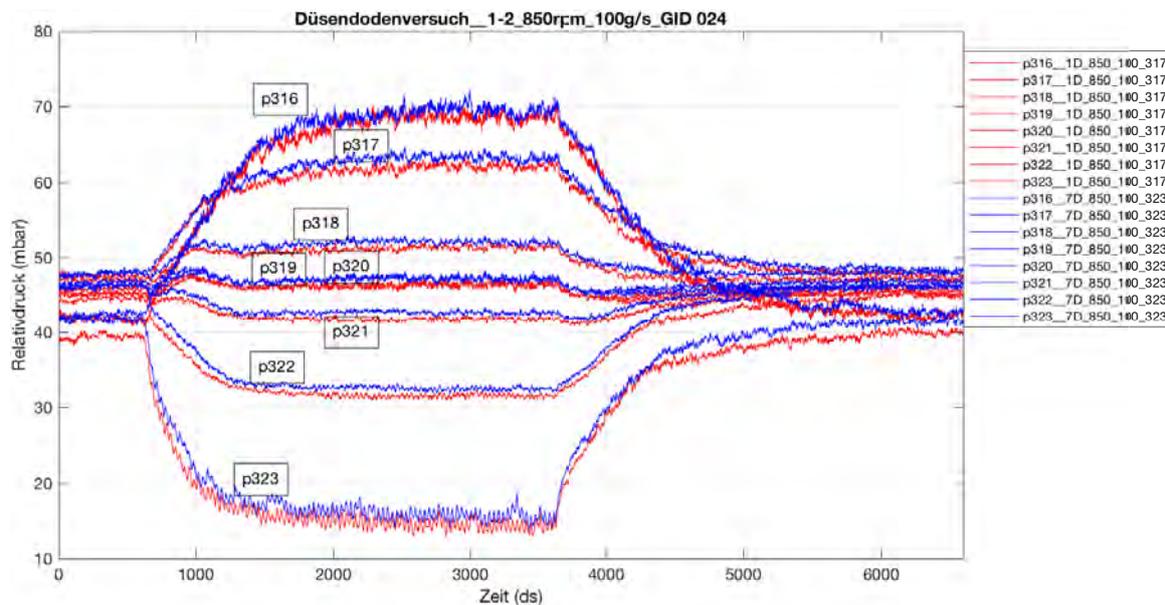


Abbildung 6.20.: Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 bei 100g/s, Versuch GID 024.

Interpretation Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 bei GID 024

- Anhand der Kurvenverläufe für 100 g/s (siehe Abbildung 6.20) und 90 g/s (siehe Abbildung 6.21) kann beobachtet werden, dass die Auswirkung des Düsenverbundes bei 100 g/s zum Tragen kommt. Hier sind die Kurven zwischen den gasdicht abgetrennten Düsenboxen (entspricht in Abbildung 6.20 1D) und dem Düsenverbund (entspricht in Abbildung 6.20 7D) versetzt. Im Gegensatz dazu, sind bei einer Fluidisierung von 90 g/s die Linien annähernd deckungsgleich (siehe Abbildung 6.21). Dieser Effekt ist überraschend, denn es wurde anfangs eher ein Einfluss des Düsenverbundes an der unteren Betriebsgrenze vermutet.
- Vergleicht man weiters die Absolutbeträge der Relativdrücke zwischen Abbildung 6.20 und 6.21 ist ein Unterschied zu erkennen. Der Zusammenhang eines höheren Luftmassenstromes mit den daraus resultierenden höheren Relativdrücken über den Düsenboden, wurde aber bereits in früheren Versuchen erkannt und ist damit nichts Außergewöhnliches.

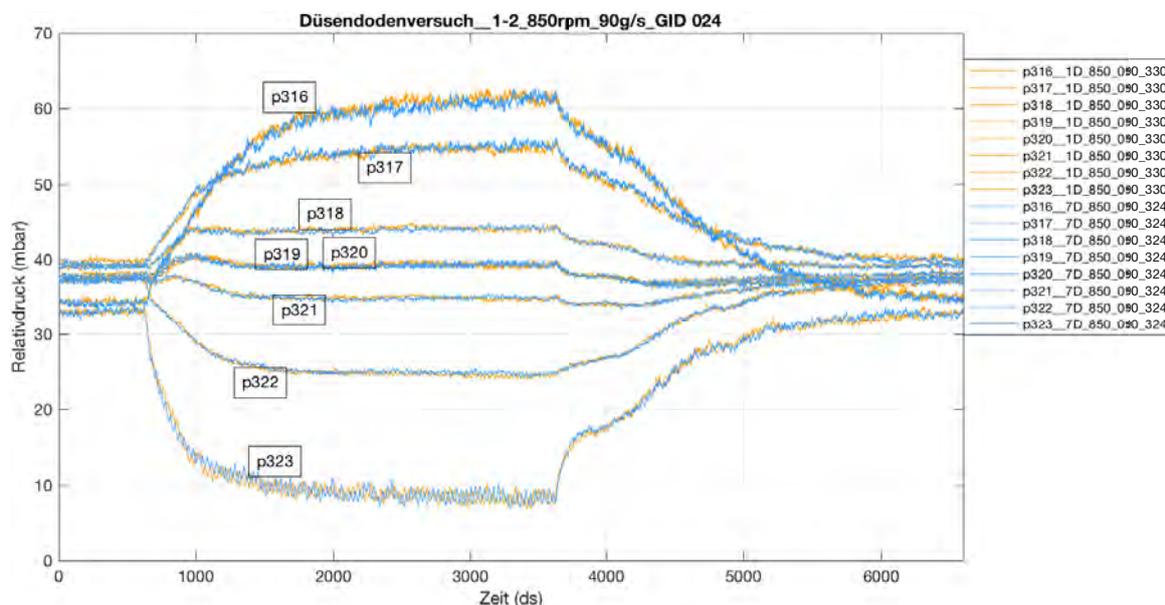


Abbildung 6.21.: Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 bei 90g/s, Versuch GID 024.

- In Abbildung 6.20 und 6.21 ist kein Unterschied zwischen den Kurven p319 und p320 ersichtlich. Die Messstellen dieser zwei Sensoren sitzen unmittelbar nebeneinander an der Stirnseite des Wärmetauschers und liefern daher annähernd gleiche Ergebnisse deren Unterschied bei dieser Skalierung nicht feststellbar ist.

Bei der weiteren Untersuchung der Düsenboden-Messergebnisse wurden auch die bereits bekannten Absolutdruck Sensoren p313, p314 und p315 begutachtet. Die resultierende Abbildung ist in 6.22 ersichtlich.

Zur übersichtlichen Unterscheidung der Kurven zwischen $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ und jenen von $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ wurden bei der höheren Fluidisierung dunklere Farben verwendet. Weiters sind die Linien bei gasdicht abgetrennten Düsenboxen in rot bzw. orange und für die Kurvenverläufe des Düsenverbundes in Blautönen gehalten worden (siehe dazu Abbildung 6.22). Es soll in Abbildung 6.22 lediglich auf den wiederkehrenden Buckel nach dem Abschalten der Förderschnecke hingewiesen werden, welcher nur bei einem Fluidisierungsgrad von 90 g/s auftritt.

Um zufriedenstellende Aussagen im Zusammenhang mit dem Düsenboden-Versuch zu finden wurden weitere Messpunkte ausgewertet. Bei der Analysierung der Messsensoren p310 und p311 konnten weitere Unterschiede aufgedeckt werden.

Mit Hilfe der Drucksensoren p311 und p310 kann das Gefälle der Sandoberfläche unterhalb des ersten Luftkissens dargestellt werden. Der Sensor p311 liegt dabei unterhalb der

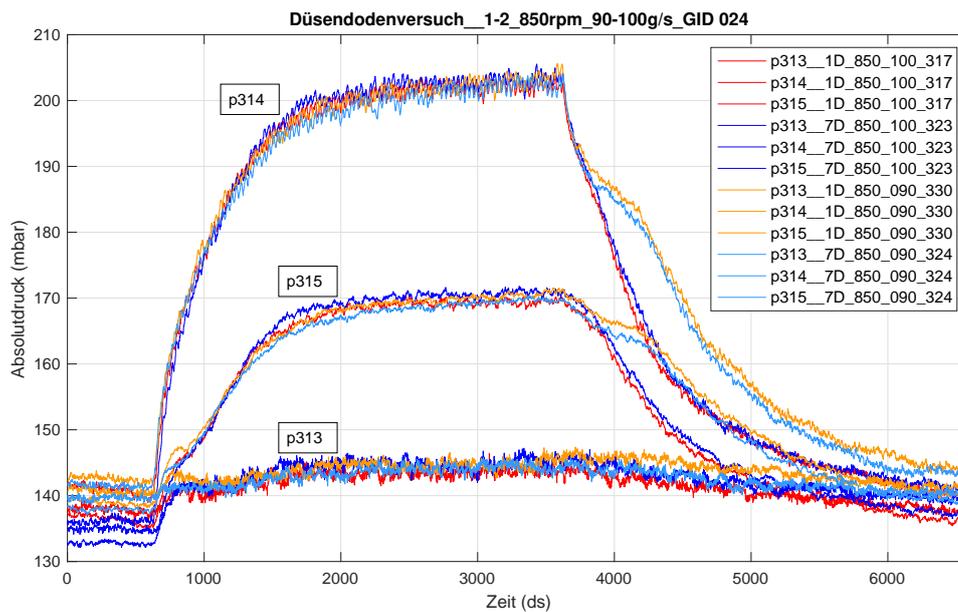


Abbildung 6.22.: Gegenüberstellung der Sensoren p313, p314 und p315 bei 90g/s und 100g/s, Versuch GID 024.

Förderschnecke, durch welche Sand in den Wärmetauscher eingebracht wird. Um einen für die Sandförderung im Wärmetauscher notwendigen Höhenunterschied zwischen Ein- und Austritt zu erreichen, muss in diesem Fall der Drucksensor p310 am anderen Ende des Luftkissenelementes, und somit unmittelbar vor dem Luftkissentrennblech, einen niedrigeren Wert anzeigen. (siehe dazu auch Abbildungen 4.2 und 5.13) Ein Ansteigen dieser Sensoren steht in direkter Verbindung mit einem steigenden Sandlevel.

Interpretation Relativdruckmessung der Sensoren p310 bis p311 bei GID 024, Abbildung 6.23

- In Abbildung 6.23 ist für den Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ (rote und dunkelblaue Linien) ein Anstieg des Relativdruckes p311 bei beginnender Sandförderung zu erkennen. Der Messwert pendelt sich danach bald auf einen konstanten Wert unterhalb der 10 mbar Linie ein und sinkt nach Abschalten der Förderschnecke wieder ab. Dabei bleibt der Wert des Sensors p310 konstant oberhalb der 0 mbar Marke. Diese Kurvenverläufe lassen somit auf eine intakte Wirbelschicht im Bereich des Sandeinlasses schließen.
- Betrachtet man dazu im Gegensatz den Kurvenverlauf bei einem Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ (orange und hellblaue Linien) so ergeben sich hier entscheidende Unterschiede. So nimmt p311 während der Fluidisierung mit 90 g/s bei einer Sandförderung von 5 min nie einen konstanten Wert an, sondern steigt bis zum Zeitpunkt der Schneckenabschaltung an. Daneben steigt auch der Messwert des Drucksensors

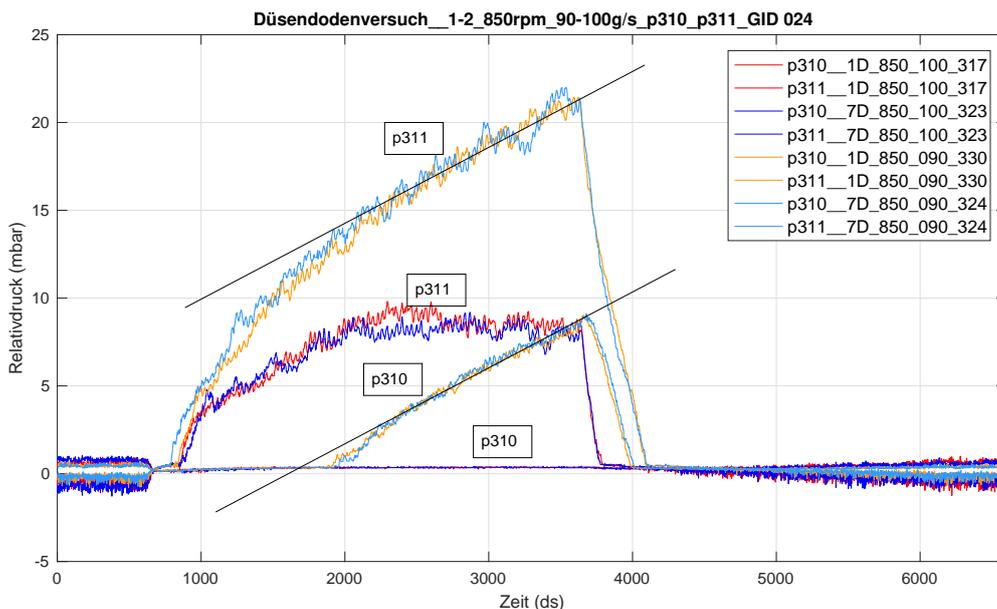


Abbildung 6.23.: Gegenüberstellung der Sensoren p310 und p311 bei 90g/s und 100g/s, Versuch GID 024.

p310 während der Sandförderung ausgehend von einem konstant niedrigen Wert plötzlich an. Dieser Anstieg von p310 könnte als Zusammenbruch der Wirbelschicht interpretiert werden, da der Sand im Bereich des ersten Luftkissens mit Hilfe der Wirbelschicht nicht mehr abtransportiert werden kann.

- Bei den Kurvenverläufen der Sensoren p311 und p310 für $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ kann aus den in Abbildung 6.23 eingezeichneten Linien eine sehr ähnliche Steigung abgelesen werden.
- Nach dem Ausschalten der Schnecke beim Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ sinkt anfangs die p310-Kurve und erst danach die Messkurve des Drucksensors p311. Dieses Verhalten kann durch das Absinken des Sandlevels in den davorgeschaltenen Luftkissen und ein damit verbundenes (aber zeitlich hinterher hinkendes) Abfließen des Sandes aus dem Luftkissenelement 1 erklärt werden. Damit kann auch im Bereich des ersten Luftkissens eine funktionsfähige Wirbelschicht wieder hergestellt werden.
- Durch den Kurvenverlauf bei 90 g/s ist nun klar ersichtlich, dass die Versuchsdauer bzw. Dauer der Sandförderung von entscheidender Bedeutung ist. Bei einer Sandförderung von 10 min würde die Sensormessgrenze von 25 mbar mit Sicherheit erreicht werden.
- Im Bezug auf die Auswirkungen wie viele Düsenboxen zusammengeschlossen wer-

den können damit es zu einer Einschränkung des Förderbetriebes durch den Wärmetauscher kommt, konnte aber auch bei dieser Messauswertung nicht gefunden werden.

6.2.3.2. Ergebnisse Düsenboden-Versuch

Der Betrieb des Düsenbodens steht in enger Verbindung mit dem Leistungsanspruch für Hilfsantriebe. Kann dieser Bereich optimiert werden führt dies direkt zur Verbesserung des SandTES-Wirkungsgrades und somit zu einer höheren Wirtschaftlichkeit des Konzepts. In diesem Versuch wurde untersucht welchen bzw. wie groß der Einfluss der Düsenanzahl und somit die Anzahl der Drosselblenden auf die Anlagenperformance ist. Schlussfolgernd konnten folgende Versuchserkenntnisse gefunden werden.

Endinterpretation Messergebnisse Düsenboden-Versuch

- Bei der durchgeführten Relativdruckmessung der Sensoren p324, p326, p327 und p328 konnten nur sehr geringe Differenzen zwischen den Ergebnissen mit gasdicht abgetrennten Düsenboxen (entspricht in Abbildung 6.19(a) und 6.19(b) 1D) und dem Düsenverbund (entspricht in Abbildung 6.19(a) und 6.19(b) 7D) errechnet werden. Unterschiede treten hier erst in der zweiten Nachkommastelle auf. Die Messwerte und deren Interpretationen müssen daher mit Vorsicht behandelt werden, da die Messgenauigkeit hier zu einer möglichen Verfälschung der Ergebnisse führen kann.
- Bei dem Luftmassenstrom $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ (siehe Abbildung 6.19(b)) sind geringfügig höhere Werte als bei $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ (siehe Abbildung 6.19(a)) ersichtlich. Dieses Verhalten kann auf den Porositätsunterschied durch den eingeblasenen Luftmassenstrom erklärt werden. Der Luftanteilsunterschied in der Wirbelschicht zwischen den, durch konstanten Höhenunterschied von einander entfernten, Messstellen wirkt sich daher bei geringerer Fluidisierung stärker aus als bei höheren Fluidisierungsgraden. Da diese Versuche an der unteren Betriebsgrenze durchgeführt wurden kann diese Aussage entsprechend den logischen Ansätzen der Wirbelschichttheorie erklärt werden. Jedoch handelt es sich auch hier wieder um sehr geringe Unterschiede womit wieder auf die begrenzte Messgenauigkeiten hingewiesen werden muss.
- Aufzuzeigen ist auch der Abwärtstrend zwischen p324 und p328, dieser kann sowohl bei Abbildung 6.19(a) als auch bei Abbildung 6.19(b) erkannt werden. Der starke Abfall des Relativdruckes im Bereich des Sensors p328 kann dadurch erklärt werden, dass die konstante Höhendifferenz zwischen x3DJ und x3DK im Inneren des Wärmetauschers nicht komplett mit Sand ausgefüllt ist. Der nicht komplett mit Sand gefüllte Abschnitt zwischen den Messstellen des Sensors p328 führt dadurch zu einem niedrigeren Relativdruck. Die gefundenen Aussagen der Abbildungen 6.19(b) und 6.19(a)

beziehen sich eher auf Unterschiede des Fluidisierungsgrades und nicht wie erhofft auf die Auswirkungen des Düsenverbundes.

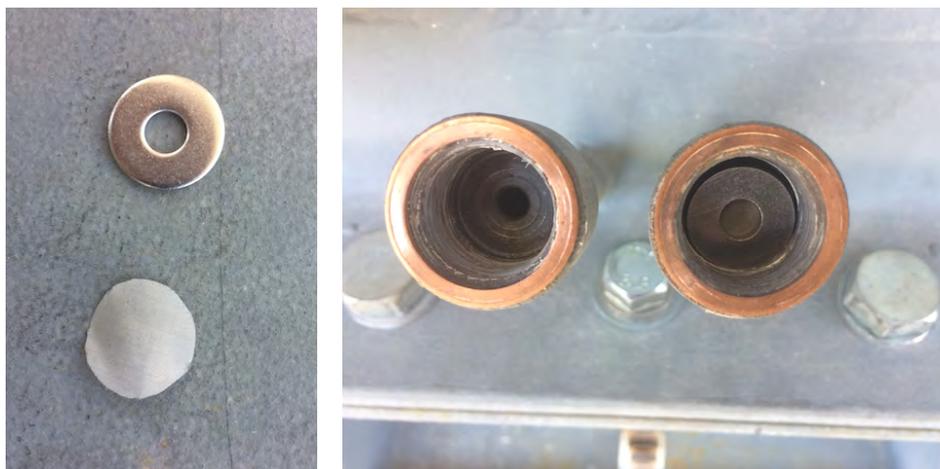
- Im Gegensatz dazu konnte bei der Auswertung der Ergebnisse für p316 bis p323 der Einfluss des Düsenboden aufgezeigt werden. So kann in Abbildung 6.20 bei der Fluidisierung mit 100 g/s ein unterschiedlicher Kurvenverlauf zwischen den durch gasdichte Trennplatten unterteilten Düsenboxen (1D) und dem mit Hilfe einer Ausgleichsleitung reichten Druckausgleich über sieben Düsenboxen (7D) verdeutlicht werden.
- Vor allem der Vergleich der Drucksensoren p310 und p311 (siehe dazu Abbildung 6.23) konnte den Einfluss des Fluidisierungsgrades nochmals deutlich darstellen. Mit Hilfe dieser Sensoren p311 und p310 kann das Gefälle der Sandoberfläche unterhalb des ersten Luftkissens dargestellt werden. Ein Ansteigen dieser Messelemente steht in direkter Verbindung mit einem steigenden Sandlevel. Während sich bei einem Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ (rote und dunkelblaue Linien) durch das Verhalten der Messwerte von p311 und p310 eine intakte Wirbelschicht erkennen lässt, zeigen die aufgezeichneten Messkurven für diese Sensoren (orange und hellblaue Linien) bei $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ ein mögliches Zusammenbrechen der Wirbelschicht. Bei der geringeren Fluidisierung mit den Parametern $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ und einer Schneckendrehzahl von 850 rpm steigt die Kurve von p311 ab dem Zeitpunkt der Sandförderung immer weiter an. Auch die Messwerte von p310 steigen ausgehend von einem konstanten Verlauf während der Sandförderung plötzlich an. Dieser Anstieg beider Sensoren ist ein starkes Anzeichen für den möglichen Zerfall der Wirbelschicht. Einen weiteren Einblick in die Vorkommnisse im Inneren der Wärmetauschers liefert das Abklingverhalten der Druckanstiege. Nach dem Ausschalten der Schnecke beim Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ sinkt anfangs die Kurve des Sensors p310 und erst danach die Messkurve des Drucksensors p311. Dieses Verhalten bei $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ kann durch das Abnehmen des Sandlevels in den übrigen Luftkissen und ein damit verbundenes Abfließen des Sandes aus dem Luftkissenelement 1 erklärt werden. Dadurch ist es im Bereich des ersten Luftkissens auch wieder möglich eine funktionsfähige Wirbelschicht herzustellen. Im Bezug auf die Auswirkungen eines Zusammenschlusses von Düsenboxen konnten auch bei dieser Messauswertung leider keine nützlichen Indizien gefunden werden.
- Durch die extrem kleinen Unterschiede der bei diesem Versuch erhaltenen Messwerte zwischen den gasdicht abgetrennten Düsenboxen und dem installierten Düsenverbund wird der Einfluss der Düsenanzahl bei diesem Messaufbau (sieben Düsen) als gering eingestuft. Dieser Versuch könnte durch eine Erweiterung von zusammengeschlossenen Düsenboxen verfeinert werden. Dies wurde in weiterer Folge auch durchgeführt.

6.2.4. Umbau

Nach Abschluss des Düsenboden-Versuches wurde ein Umbau am Wärmetauscher der SandTES-Anlage vorgenommen. Im Zuge dessen wurden die Kalkkästen entfernt um den finalen Aufbau des Wärmetauschers für die geplante Heißtestphase zu erhalten. Der Abbau dieser beiden Kalkkästen ergibt eine verringerte Wärmetauscherhöhe von insgesamt 500 mm und einen damit verbunden kleineren Querschnitt. Mit dem Abbau der Kalkkästen wurden auch die sich im Innen befindlichen Dummie-Rohrbündel entfernt (siehe dazu Abbildung 5.4).

Dabei mussten alle Sensorlanzen und Druckschläuche abmontiert werden um einen ungehinderten Umbau des Wärmetauschers gewährleisten zu können. Neben der Demontage wurden die abgenommenen Druckschläuche sorgfältig beschriftet und für das Anschließen nach dem Umbau wieder vorbereitet. Dadurch das Sandlevel im inneren des Wärmetauschers für den Umbau gesenkt werden musste, konnte diese Gelegenheit auch dazu genutzt werden diverse Mängel und Schäden zu beheben. So wurden vor allem beschädigte Schutzsiebe an den Messlanzen erneuert, Undichtheiten behoben sowie weitere Instandhaltungsarbeiten durchgeführt.

Vom Werkstattpersonal wurde im Rahmen des Umbaus ein Montagegerüst am Wärmetauscher angebracht um diesen für die geplante Wärmeisolation vor der Heißtestphase vorzubereiten.



(a) Schutzsieb mit Beilagscheibe

(b) Montage der Edelstahl-Drahtgewebe Schutzsiebe (Maschenweite beträgt $42 \mu\text{m}$)

Abbildung 6.24.: Instandhaltung der Schutzsiebe an Druckmessstellen.

Die in den Kalkkästen verbauten Drucksensoren wurden vorbereitet um anschließend, zuvor ungenützte, Messstellen für Messungen zugänglich zu machen. Unter Anderem konnten

hier die Messstellen x3JA bis x3JE in die Druckmessungen eingebunden werden.

Um für die geplanten Heißversuche alle versuchstechnisch relevanten Möglichkeiten ausschöpfen zu können, wurden vor der Isolierung eine Vielzahl an Thermoelementen am Wärmetauscher sowie den Silos verbaut. Dafür wurden Thermoelemente sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren des Wärmetauschers montiert. Somit können alle wichtigen Oberflächentemperaturen sowie auch die Temperatur im Inneren des Wärmetauschers und der Silos messtechnisch erfasst werden. **Die Datenblätter dieser Sensoren sind im Anhang abgebildet.**

Nach vollendetem Umbau konnten alle Messstellen wieder an die dafür vorgesehenen Drucksensoren angeschlossen werden. Hinzugefügte Thermoelemente bzw. geänderte Drucksensoren wurden in das Leitsystem eingepflegt und aktualisiert. Nachdem der Wärmetauscher einer positiven Dichtepfung unterzogen wurde, konnte der entnommene Sand wieder in das SandTES-System zurückgeführt werden. In einer finalen Überprüfung wurden alle Drucksensoren mit den Messaufbaulisten abgeglichen und auf den aktuellen Stand gebracht.

Um die Arbeiten abschließen und die Funktionsfähigkeit der Anlage nach dem Umbau gewährleisten zu können, werden nun einige Versuche durchgeführt. Unter anderem soll festgestellt werden wie sich die Entfernung der Kaltkästen und somit der neue Wärmetauscherquerschnitt auf die Anlagenperformance auswirkt. Es ist daher sinnvoll bereits vor dem Umbau durchgeführte Versuche zu wiederholen um Unterschiede hier herausarbeiten zu können. Nach einer Funktionskontrolle wurde mit einer Überprüfung der Förderkennlinie beider Schnecken begonnen, um in weiterer Folge den Rückstau- sowie den Düsenbodenversuch unter den selben Versuchsbedingungen wie zuvor zu wiederholen.

6.2.5. Überprüfung der Schneckenkennlinie

Die Schneckenkennlinie stellt den Zusammenhang zwischen der Schneckendrehzahl und dem in das System des Wärmetauschers gebrachten Sandmassenstrom her und ist somit wesentlich für jeglichen Betrieb der Versuchsanlage. Nach dem Umbau soll nun die Kennlinie erneut aufgenommen werden um sie mit jenen Ergebnissen der Erstinbetriebnahme des SandTES Prototypen vergleichen zu können.

Versuchserklärung für die Überprüfung der Schneckenkennlinie

Über eine Versuchsdauer von 5 min wurde im Kurzschluss über die Förderschnecke und das Becherwerk Sand von einen in den anderen Speichersilo gefördert. Mit Kurzschluss ist in diesem Fall gemeint, dass beide Absperrschieber geöffnet sind. Dadurch kann der von der Schnecke geförderte Sandmassenstrom, ohne den Wärmetauscher zu durchströmen,

in das Becherwerk gelangen.

6.2.5.1. Durchführung Schneckenkennlinien-Versuch

Im zuvor beschriebenen Kurzschluss wird Sand mit Hilfe des Becherwerkes über die Förderschnecke in den zweiten Speichersilo gefördert.

Tabelle 6.1.: berechnete Werte für den geförderten Sandmassenstrom zur Erstellung der Schneckenkennlinien

	250 rpm	450 rpm	650 rpm	850 rpm
Sandmassenstrom Schnecke 1, GID 025	1,036	1,878	2,689	3,520
Sandmassenstrom Schnecke 2, GID 026	1,063	1,909	2,770	3,502
Sandmassenstrom Schnecke 1, GID 001	1,048	1,9322	2,816	3,687
Sandmassenstrom Schnecke 2, GID 002	1,023	1,919	2,750	

In Abbildung 6.25 werden diese Werte in einem Diagramm aufbereitet.

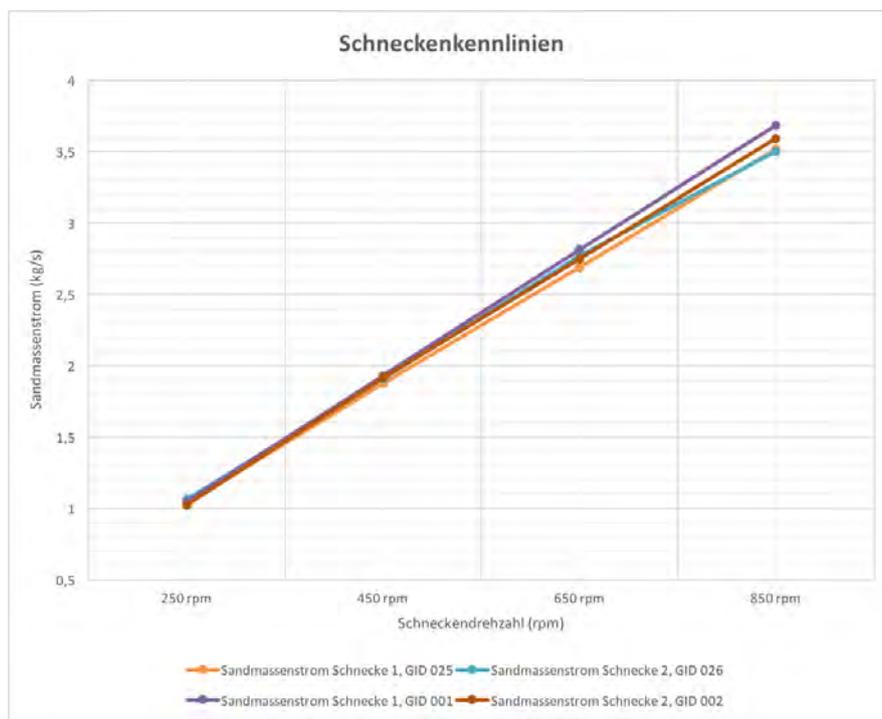


Abbildung 6.25.: Vergleich der Schneckenkennlinien nach dem Wärmetauscherumbau (GID 025 und 026) mit jenen bei der Erstinbetriebnahme (GID 001 und 002).

Interpretation Schneckenkennlinien Vergleich GID 025, GID 026, GID 001, GID 002; Abbildung 6.25 und Tabelle 6.1

- Bei allen dargestellten Kennlinien ist ein konstanter Verlauf zu erkennen. (siehe Abbildung 6.25)
- Die berechneten Massenstromergebnisse sind für beide Förderschnecken sowie zwischen Erstinbetriebnahme und nach abgeschlossenen Umbau in einem kleinen Schwankungsbereich wiederzufinden.
- Leider konnten von meiner Seite für die Förderschnecke 2 mit der Drehzahl $850rpm$ bei GID 002 keine Messergebnisse gefunden werden. Der eingesetzte Zahlenwert wurde dabei aus der Arbeit von Krassini [9] entnommen. Trotzdem lässt sich ein geringer Unterschied in Richtung höherer Drehzahl zwischen Erstinbetriebnahme und vollendeten Umbau erahnen. (siehe dazu auch Abbildung 6.25 und Tabelle 6.1)

6.2.5.2. Ergebnisse Schneckenkennlinien-Versuch

Trotz des geringen Aufwandes für diesen Versuch ist dessen Aussage für den Betrieb der gesamten Anlage von großer Bedeutung. Folgende Aussagen können daraus abgeleitet werden.

Endinterpretation Messergebnisse Schneckenkennlinien-Versuch

- Über die Zeitdauer von einem Jahr haben sich die Fördermengen der Schnecken nicht wesentlich verändert. Die geringen Unterschiede sollten daher die in der Zwischenzeit durchgeführten Versuche in keinsten Weise beeinflusst haben, wodurch deren Aussagekraft und Richtigkeit bekräftigt werden kann.
- Die dennoch geringen Unterschiede könnten die hochabrasiven Eigenschaften von Quarzsand durch Verschleißerscheinungen am Schneckenprofil widerspiegeln.

6.2.6. Rückstauversuch 2.0

Wie bereits unter Kapitel 6.1 erklärt steht dieser Versuch in direkter Verbindung mit fundamentalen Anlagen-Betriebsgrößen. Hier können unter anderem die Wärmetauscherhöhe, die Auslegung des Düsenbodens sowie das Luftkissenkonzept genannt werden. Die Erforschung aller in den Versuch involvierten Einflüsse ist damit von großer Wichtigkeit.

Nach dem Umbau des Wärmetauschers wird nun die Überprüfung der zuvor durchgeführten Rückstauversuche schlagend.

Dieser Versuch stellt die erste komplette versuchstechnische Inbetriebnahme der umgebauten Pilotanlage dar. Dadurch soll hier auch neben den Versuchsergebnissen auf erkennbare Veränderungen in der Anlagenperformance und ihre Auswirkungen auf den Be-

trieb eingegangen werden.

Versuchserklärung Rückstauversuch 2.0

Das SandTES-Konzept stützt sich auf die durch den Höhenunterschied zwischen Ein- und Ausgang ergebende Triebkraft zur horizontalen Sandförderung im Inneren des Wärmetauschers. Dieser durch die Viskosität der Wirbelschicht (bestehend aus Feststoffen und Luft) verursachte Rückstau wird für unterschiedlich zugeführte Sandmassenströme und diverse Fluidisierungsgrade entsprechend der Parametervorgabe von GID 021 und 022 nun auch ohne Kalkkästen untersucht.

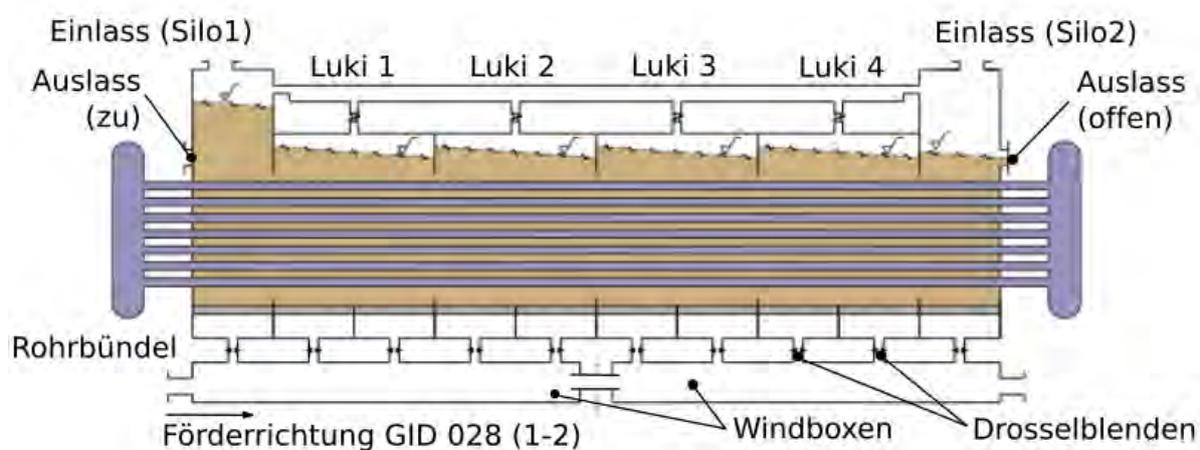


Abbildung 6.26.: Schema für Rückstauversuch ohne Kalkkästen, GID 027 und 028 [14].

In Abbildung 6.26 sind nochmals die wesentlichen Bestandteile des Wärmetauschers mit ausgebauten Kalkkästen dargestellt. Die eingetragene Förderrichtung verläuft von Silo1 zu Silo2 und entspricht somit der Versuchsidentifikationsnummer GID 028. An Hand dieser Abbildung ist auch nochmals die Funktion der Luftkissenventile (in Abbildung 6.26 kurz Luki genannt) klar ersichtlich. Durch den Verbau dieser regelbaren Ventile ist es möglich den Höhenunterschied zwischen Wärmetauscherein- und -auslass zu reduzieren und somit den Anteil an unbrauchbarer Sandmasse oberhalb der Rohrbündel zu minimieren. Der sich trotzdem bildende Höhenunterschied zwischen Ein- und Auslass resultiert aus dessen direkten Zusammenhang mit dem Druck, auch einen Druckunterschied welcher als Rückstau bezeichnet wird.

In diesem Versuch sollen die Aussagen von Steiner [15] und somit GID 021 und GID 022 überprüft werden, sowie Auffälligkeiten nach dem Wärmetauscherumbau aufgezeigt werden.

6.2.6.1. Durchführung Rückstauversuch 2.0

Da die Rückstauversuche mit der GID 021 und 022 mit Hilfe eines Luftstranges durchgeführt wurden und somit dem vor diesem Versuch vorliegenden Versuchsaufbau entsprechen, wird der Rückstauversuch 2.0 (nach Demontage der Kaltkästen) mit Hilfe der selben Versuchsparameter durchgeführt, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit der gemessenen Werte zu gewährleisten.

Es ergeben sich daher drei Messreihen mit den Luftmassenströmen $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$, 115 g/s und 140 g/s . Innerhalb jeder dieser Messreihen wurde die Schneckendrehzahl und damit verbunden der Sandmassenstrom $\dot{m}_S = 250 \text{ rpm} - 850 \text{ rpm}$ variiert. Unter diesen Parametern wurde der Versuch in beide Förderrichtungen durchgeführt.

Über eine Messdauer von 5 min wurde Sand von einem Speichersilo durch den Wärmetauscher in den anderen Silo befördert. Während dieser Versuchsdauer wurden keine Veränderungen der Luftkissenventilstellung vorgenommen.

Stellvertretend ist das Messprotokoll für die Messreihe mit $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ und der Förderrichtung 2-1 in Abbildung 6.27 dargestellt. Die weiteren Messprotokolle sind im Anhang zu finden.

Bei diesen ersten Versuchen konnte ein sensibleres Ansprechverhalten der Anlage festgestellt werden. Vor allem im Grenzbetrieb, wie zum Beispiel bei niedrigem Fluidisierungsgrad und hohen Sandmassenströmen, reagierte die Anlage auf kleine Änderungen der Luftkissenventile während des Einstellens ungewohnt sensibel. Die Folge war, dass diverse Sensoren über ihren Messbereich anstiegen oder unter einen Minimalwert absanken. Wie im Messprotokoll 6.27 ersichtlich, war es daher nicht möglich den fünf-minütigen Versuch bei einem Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ und der Schneckendrehzahl von 650 rpm und 850 rpm durchzuführen, da hier kein stationärer Betrieb möglich war.

In Abbildung 6.28 wurden die drei Messreihen in einem 3-D Diagramm eingebettet. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Messpunkte der Rückstauermessung mit Hilfe eines Netztes verbunden. Dabei fehlen die zuvor genannten nicht durchführbaren Versuche.

Interpretation Rückstauergebnisse von Silo 2 nach Silo 1 GID 027, Abbildung 6.30

- Anhand der Messpunkte ist der Anstieg der Messergebnisse für den Rückstau Δp_{RS} mit steigender Schneckendrehzahl und damit verbundenem Sandmassenstrom \dot{m}_S leicht ersichtlich.
- Bei genauerer Betrachtung kann mit Hilfe der Gitterlinien auch der Anstieg für Δp_{RS} bei sinkendem Fluidisierungsgrad \dot{m}_L ausgemacht werden.

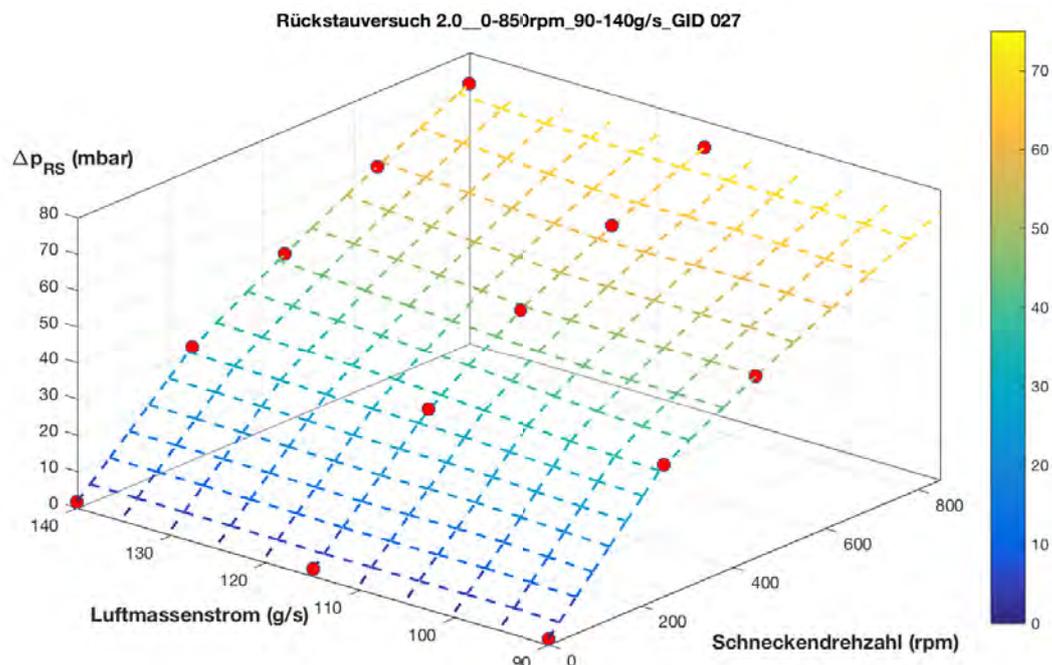


Abbildung 6.28.: Gegenüberstellung der Rückstaumessung von Silo 2 nach Silo 1, GID 027.

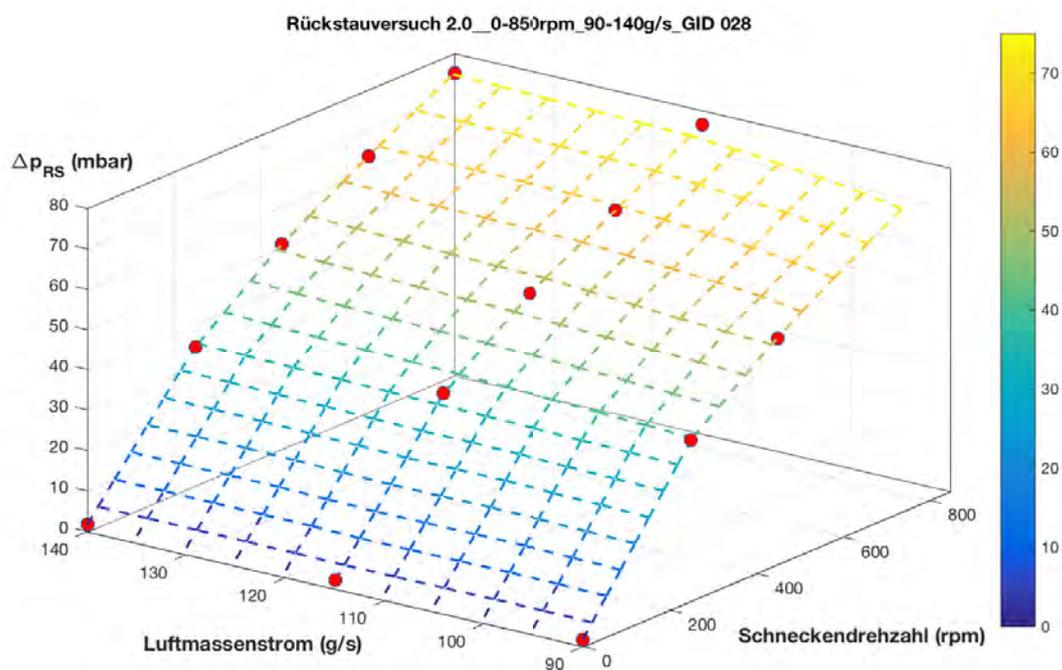


Abbildung 6.29.: Gegenüberstellung der Rückstaumessung von Silo 1 nach Silo 2, GID 028.

- Beide schon zuvor beschriebenen Verhalten können auch aus dem in diesem Diagramm eingezeichneten Messreihen abgeleitet werden.
- Der einzige Unterschied zwischen den Versuchen in unterschiedlicher Förderrichtung

sind die unter GID 028 geringfügig höheren, gemessenen Absolutdruckwerte. Diese von der Förderrichtung abhängige Anlagencharakteristik konnte schon zuvor in diversen Versuchen beobachtet werden und wird mit Anlagenimperfectionen in Verbindung gebracht.

In weiterer Folge sollen die bei den Rückstauversuchen ermittelten Absolutdruckergebnisse nochmals aufbereitet werden. Dabei wird nun auch der Druck in der Luftverrohrung oberhalb des Wärmetauschers berücksichtigt. Diese korrigierten Werte setzen sich entsprechend der Gleichung 6.1 für die Ergebnisse von GID 027 (Sandförderung von Silo 2 nach Silo 1) zusammen.

$$\Delta p_{RS,korr} = (p_{313} - p_{106}) - (p_{314} - p_{206}) \quad (6.1)$$

Die Berechnung der Werte $\Delta p_{RS,korr}$ wertet die Ergebnisse, durch verbesserte theoretische Hintergrundüberlegungen auf, da hier auch der Druck im Abgas berücksichtigt wird, jedoch erweitert sich in der Praxis auch der Einflusskreis für mögliche Einflüsse und sich daraus ergebender Messungenauigkeiten. Vor allem kleine Verstopfungen und Sandablagerungen könnten sich hier auf die Ergebnisse auswirken.

Die sich aus Gleichung 6.1 ergebenden Werte sind in Tabelle 6.2 ersichtlich.

Tabelle 6.2.: Berechnung $\Delta p_{RS,korr}$ für GID 027

VID	Drehzahl (rpm)	\dot{m}_L (g/s)	$\Delta p_{RS,korr}$	Δp_{RS}	Differenz
375	0	90	1,473	1,738	0,265
342	250	90	36,275	36,201	-0,074
341	450	90	50,000	49,810	-0,190
374	0	115	1,957	2,179	0,222
365	250	115	32,991	32,662	-0,329
363	450	115	49,553	49,464	-0,089
361	650	115	62,357	61,931	-0,426
359	850	115	72,982	72,779	-0,203
372	0	140	1,635	1,732	0,097
371	250	140	31,418	31,049	-0,369
369	450	140	46,021	46,088	0,067
367	650	140	59,593	59,360	-0,233
366	850	140	71,391	71,409	0,018

Durch die Mitberücksichtigung der Druckverhältnisse in der Abluftleitung ergeben sich nur

geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen (siehe dazu in Tabelle 6.2 die errechneten Differenzen). Somit ändert sich auch bezüglich der Aussagekraft der zuvor angeführten Ergebnisse nichts.

In der Abbildung 6.30 werden nun die Messwerte von Tabelle 6.2 sowie für die Versuchsreihen in die entgegengesetzte Richtung im 3D Diagramm 6.31 aufbereitet.

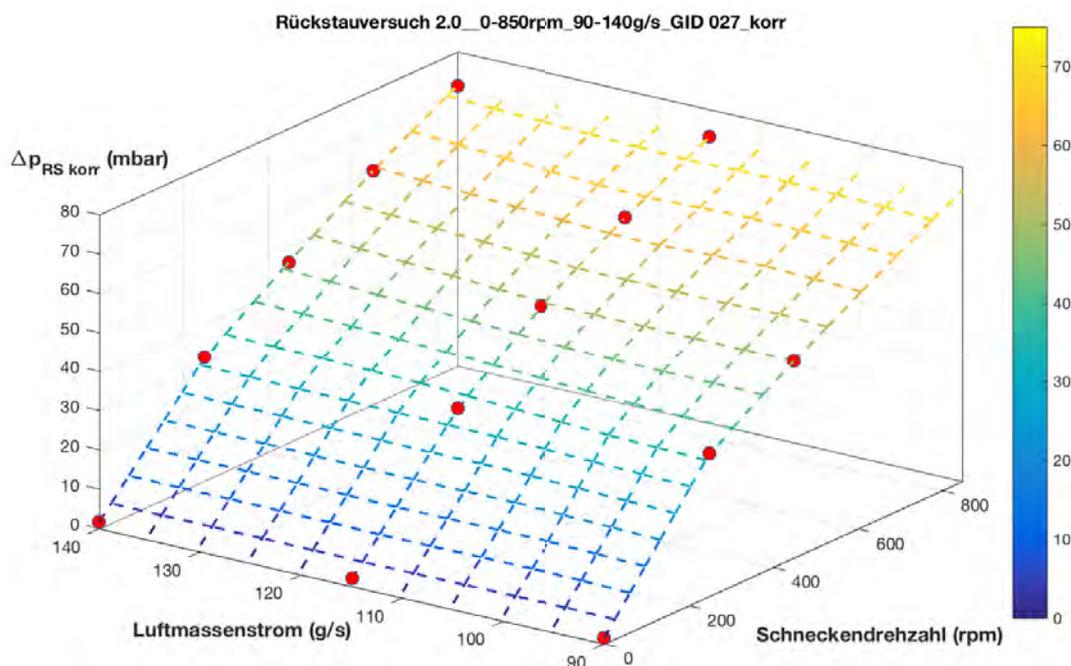


Abbildung 6.30.: Gegenüberstellung der korrigierten Rückstaumessungen von Silo 2 nach Silo 1, GID 027.

Interpretation der korrigierten Rückstauergebnisse GID 027 und 028, Abbildung 6.30 und 6.31

- Die Ergebnisse und die daraus resultierenden Diagramme unterschieden sich nur sehr gering von den Ergebnissen aus Abbildung 6.2.6.1 und 6.2.6.1
- Durch die Berücksichtigung der Drücke in den Abluftleitungen erhöht sich die Aussagekraft dieser Messungen. Obwohl der Unterschied zwischen Versuchen mit und ohne Berücksichtigung sehr gering ausfällt ist die Richtigkeit der zuvor aufgenommenen Ergebnissen trotzdem gegeben.

6.2.6.2. Einfluss der Wärmetauscher-Höhe auf den Rückstau

Nach der erfolgreichen Durchführung und Bestätigung der zuvor erhaltenen Rückstauergebnisse soll nochmals auf den durch den Umbau reduzierten Querschnitt des Wärmetauschers hingewiesen werden. Bei dem errechneten Referenzquerschnitt des Wärme-

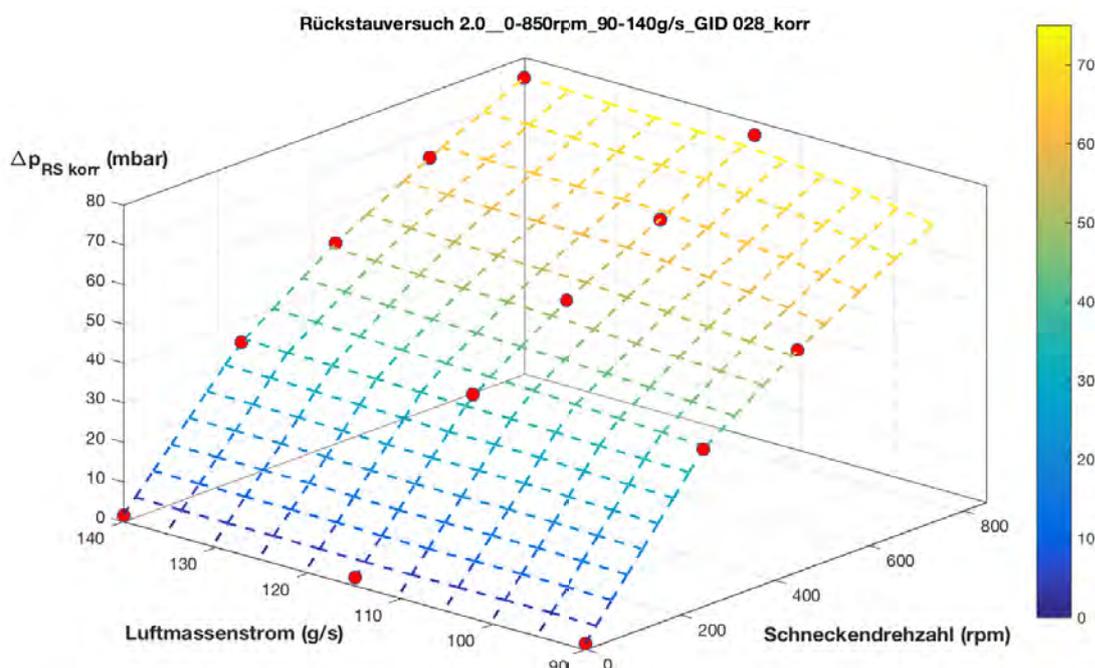


Abbildung 6.31.: Gegenüberstellung der korrigierten Rückstaumessungen von Silo 1 nach Silo 2, GID 028.

tauschers von $A_{ref} = 0,15 \text{ m}^2$ (siehe Steiner [15]) ergibt sich bei einer Wärmetauscher-Breite von $b_{Hex} = 0,15 \text{ m}$ und unter Berücksichtigung der von den Rohrbündel in Anspruch genommenen Fläche die Referenzhöhe von ca. $h_{ref} = 1,13 \text{ m}$. Durch die abgezogene Gesamthöhe der Kaltkästen mit $0,5 \text{ m}$ ergibt sich eine neue Referenzhöhe von $h_{ref,neu} = 0,63 \text{ m}$. Dies bedeutet eine deutliche Verkleinerung des Fließquerschnittes im Wärmetauscher.

Diese Verkleinerung des Referenzquerschnittes ergibt eine Reduktion der WT-Höhe um ca. 44%. Welche Veränderungen sich dabei im Vergleich zu den Rückstau-Versuchen mit Kaltkästen ergeben wird in Tabelle 6.3 für die Förderrichtung von Silo 2 nach Silo 1 verdeutlicht. Dabei wurde mit Hilfe der Messdaten von Steiner [15] der sich für verschiedene Fluidisierungsgrade \dot{m}_L und Sandmassenströme \dot{m}_S ergebende Rückstau berechnet und mit jenen Daten von GID 027 6.2.6.1 verglichen. Da die Versuchsparameter vom Versuch GID 027 mit den Betriebsparameter von GID 021 übereinstimmen wird hier von einer guten Vergleichbarkeit und Aussagefähigkeit der Messwerte ausgegangen.

Die Messpunkte von GID 027 und GID 021 sind in Abbildung 6.32 mit Hilfe einer 3D-Darstellung durch zwei Netze ersichtlich.

Um die Aussagekraft der Messungen zu maximieren wurde die Gegenüberstellung der Rückstau-Ergebnisse auch für die entgegengesetzte Förderrichtung aufbereitet, welche in

Tabelle 6.3.: Gegenüberstellung $\Delta p_{RS,027}$ zu $\Delta p_{RS,021}$

VID	Drehzahl (rpm)	\dot{m}_L (g/s)	$\Delta p_{RS,021}$	$\Delta p_{RS,027}$	Differenz
260	0	90	-1,788	1,738	3,526
259	250	90	22,304	36,201	13,897
258	450	90	35,461	49,810	14,350
269	0	115	-2156	2,179	4,335
268	250	115	18,122	32,662	14,540
267	450	115	32,119	49,464	17,345
266	650	115	42,446	61,931	19,486
265	850	115	51,755	72,779	21,024
250	0	140	-2,308	1,732	4,040
249	250	140	15,212	31,049	15,838
248	450	140	28,217	46,088	17,871
247	650	140	39,630	59,360	19,730
246	850	140	49,260	71,409	22,149

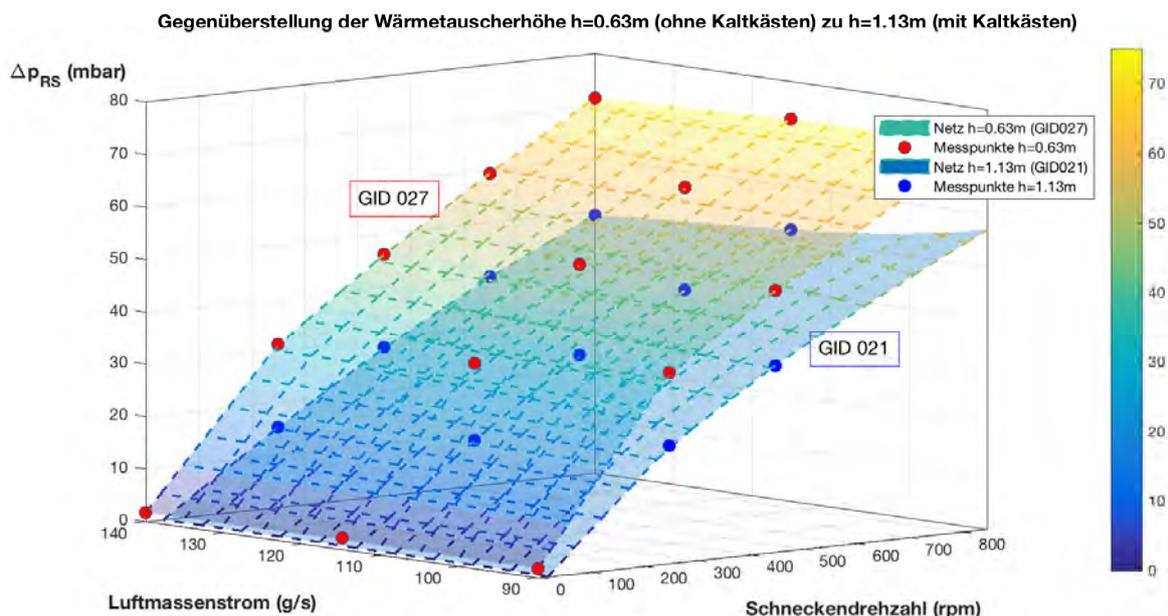


Abbildung 6.32.: Gegenüberstellung der Wärmetauscherhöhe $h=0.63\text{m}$ (ohne Kaltkästen, GID 027) zu $h=1.13\text{m}$ (mit Kaltkästen, GID 021).

Tabelle 6.4 zu sehen ist. Dabei entsprechen die Messergebnisse mit der GID 028 der Messung ohne Kaltkästen und die Rückstauwerte GID 022 jenen mit den verbauten Kaltkästen.

Die berechneten Rückstauwerte in Tabelle 6.4 werden wie zuvor in einem dreidimensiona-

Tabelle 6.4.: Gegenüberstellung $\Delta p_{RS,028}$ zu $\Delta p_{RS,022}$

VID	Drehzahl (rpm)	\dot{m}_L (g/s)	$\Delta p_{RS,022}$	$\Delta p_{RS,028}$	Differenz
260	0	90	-1,788	1,738	3,526
264	250	90	25,119	39,675	14,556
263	450	90	39,160	56,028	16,867
296	0	115	-2156	2,179	4,335
273	250	115	21,330	37,059	15,729
272	450	115	35,153	52,906	17,753
271	650	115	46,198	64,342	18,143
270	850	115	55,945	76,606	20,661
250	0	140	-2,308	1,732	4,040
254	250	140	19,169	34,447	15,278
253	450	140	32,186	50,977	18,792
252	650	140	43,344	63,633	20,289
251	850	140	52,900	75,210	22,310

len Diagramm durch zwei Messwert-Netze veranschaulicht. Diese sind in Abbildung 6.33 dargestellt.

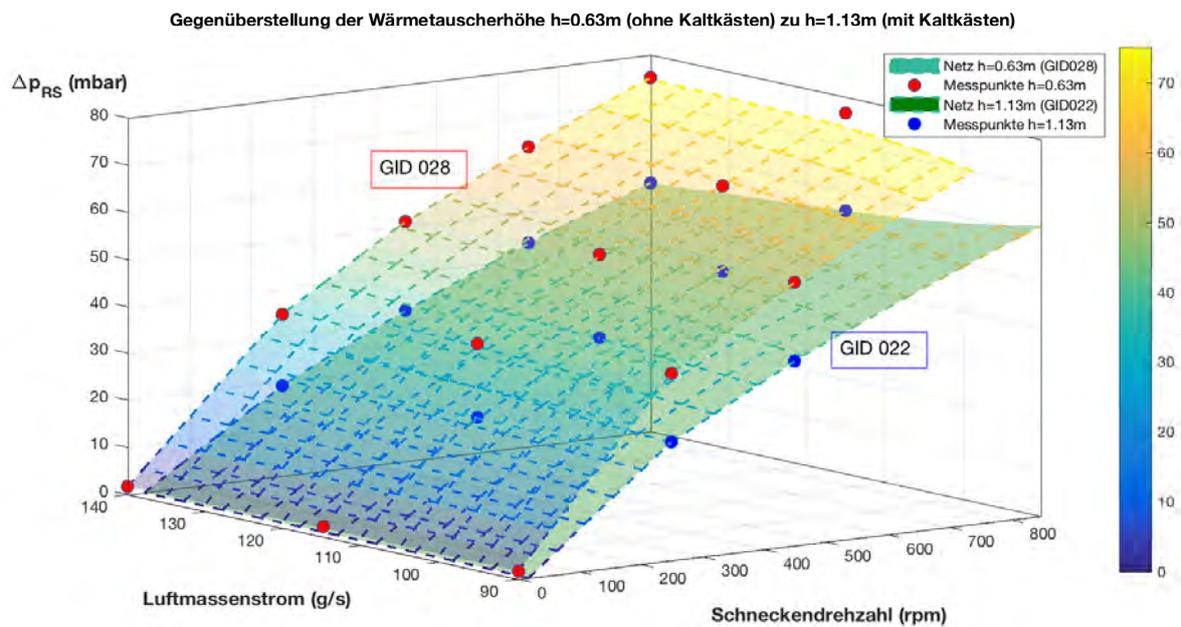


Abbildung 6.33.: Gegenüberstellung der Wärmetauscherhöhe $h=0.63\text{m}$ (mit Kaltkästen, GID 022) zu $h=1.13\text{m}$ (ohne Kaltkästen, GID 028).

Interpretation der Ergebnisse der Rückstauergegenüberstellung GID 027 und 021 siehe Abbildung 6.32 und GID 028 und 022 siehe Abbildung 6.33

- In den dargestellten Diagrammen wird veranschaulicht, dass durch die Demontage der Kaltkästen der Rückstauereffekt Δp_{RS} gegenüber der anfänglichen Wärmetauscherkonfiguration mit Kaltkästen ansteigt.
- Aus den Ergebnissen der Tabellen 6.3 und 6.4 ist klar ersichtlich, dass mit steigender Schneckendrehzahl \dot{m}_S die Differenz zwischen den beiden Rückstaumessungen ansteigt. Dieses Verhalten wird durch die Abbildungen 6.32 und 6.33 wieder gespiegelt.
- Bei den höheren Werten, welche bei den Rückstaumessungen ohne Kaltkästen erfasst wurden, kann ein Annähern der oberen Betriebsgrenze erahnt werden. Ein stabiler Betrieb und somit das Überschreiten der Betriebsgrenze wurde dabei zuvor bei den Versuchen GID 027 und GID 028 mit den Parameter $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ und einer Schneckendrehzahl oberhalb von 450 g/s festgestellt.

6.2.6.3. Ergebnisse Rückstauversuch 2.0

Der Rückstauversuch ist ein wesentlicher Bestandteil des SandTES-Mechanismus und ist entscheidend für wichtige Auslegungskriterien. Nach dem durchgeführten Umbau am Wärmetauscher war es daher unabdingbar diesen Versuch zu wiederholen und damit die Umbauauswirkungen bezüglich diesen Versuches festzuhalten.

Endinterpretation Messergebnisse Rückstauversuch 2.0

- Anhand der Messergebnisse Δp_{RS} können die Aussagen bezüglich des Rückstauverhaltens von Steiner [15] bestätigt werden. Der Rückstauereffekt steigt mit sinkendem Fluidisierungsgrad \dot{m}_L und steigendem Sandmassenstrom \dot{m}_S .
- Die Anlage reagiert seit der Demontage der Kaltkästen bedeutend sensibler in Folge von Betriebsänderungen. Durch die Entfernung der beiden Kaltkästen wurde die Wärmetauscherhöhe um $0,5 \text{ m}$ verringert wodurch sich eine Abnahme des Referenzquerschnittes um ca. 44% ergibt. Es liegt daher auf der Hand, dass dadurch auch eine Art Puffer entfällt und sich damit der Betrieb der Pilotanlage sensibilisiert.
- Trotz der bei niedrigster Fluidisierung 90 g/s nicht durchführbaren Messpunkte an der Betriebsgrenze 650 rpm und 850 rpm ist es durchaus überraschend, dass trotz der beträchtlichen Reduktion des Referenzquerschnittes der über die Schnecken zugeführte Sandmassenstrom ohne große Probleme durch den WT bewegt werden konnte. Daraus kann eine höhere Massenstromgeschwindigkeit des Sandes beim Durchgang des Wärmetauschers schlussgefolgert werden.

- Eine Berücksichtigung der Druckverhältnisse in der Rohrleitung der Abluft wurde erfolgreich durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Messwerte führen aber zu keinen wesentlichen Veränderungen in der Aussage der Ergebnisse für diesen sowie für alle zuvor durchgeführten Versuche.
- Bei der Betrachtung der Rückstaubergebnisse mit und ohne Kaltkästen wurde auf den Einfluss der Wärmetauscherhöhe eingegangen. Die in den Tabellen 6.3 und 6.4 berechneten Ergebnisse wurden anschließend in 3D-Diagrammen gegenübergestellt. Dabei liefern die Messreihen ohne Kaltkästen höhere Werte für den Rückstau verglichen mit dem Ausgangszustand. Diese Differenz zwischen den Rückstau-Ergebnissen vergrößert sich mit steigendem Sandmassenstrom \dot{m}_S . Diese Charakteristik konnte für beide Förderrichtungen messtechnisch erfasst werden, wobei sich hier zwischen den Förderrichtungen nur geringfügige Unterschiede feststellen ließen.

Für eine detailliertere Untersuchung der Rückstauversuche wird auf die Arbeiten von Krasini [9] und Steiner [15] verwiesen.

6.2.7. Düsenboden-Versuch 2.0

In diesem Versuch sollen die Aussagen aus Kapitel 6.2.3 überprüft und durch die Erweiterung von Messstellen verfeinert werden.

Versuchserklärung Düsenboden-Versuch 2.0

Überlegungen bezüglich der Ausführungsform des Düsenbodens spielen für diesen Versuch die entscheidende Rolle. Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit den zuvor durchgeführten Düsenbodenersuchen (inklusive Kaltkästen) zu schaffen wird dieser Versuch ident zu Kapitel 6.2.3 durchgeführt.

6.2.7.1. Durchführung Düsenboden-Versuch 2.0

Auch die Durchführungsprozedur entspricht exakt der Beschreibung in Kapitel 6.2.3.1.

Der einzige Unterschied in der Durchführung zu den vorangegangenen Düsenbodenversuchen ist, dass:

- der Düsenverbund um zwei Elemente erweitert wurde und somit neun zuvor gasdicht abgeteilte Düsenboxen in Serie geschaltet werden können
- und nach dem Umbau freigewordene Drucksensoren in einer zuvor nicht genutzten Messstrecke verbaut werden konnten.

In Abbildung 6.34 sind die protokollierten Messreihen ersichtlich. Es wurden zwei Mess-

reihen bei unterschiedlicher Fluidisierung $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ und 90 g/s durchgeführt. Dabei wurde eine Ausgleichsleitung zwischen den Düsenboxen (bis 9 Elemente) schrittweise auf- bzw. abgebaut. Eine installierte Relativdruckmessung (p332) vergleicht dabei wieder die Druckdifferenz zwischen Verbundanfang und -schluss, während in der Leitung ein weiterer Sensor (p337) die Absolutdruckmessung übernimmt.

Das zweite Messprotokoll für die entgegengesetzte Förderrichtung (Silo 2 nach Silo 1) ist vollständigkeithalber im Anhang zu finden.

Interpretation der Messreihenauswertung Düsenboden-Versuch 2.0 GID 029, Abbildung 6.35

- Wie bereits im vorangegangenen Düsenbodenversuch fallen auch hier die Unterschiede zwischen den gasdicht abgetrennten Düsenboxen und dem Düsenverbund sehr gering aus, obwohl bei den in Abbildung 6.35 gemessenen Ergebnissen der Düsenverbund um zwei Düsenboxen erweitert wurde. Weiters sind die Ergebnisse der Messsensoren p326 und p338 auffällig, da die Messwerte keinen logischen Sinn vermitteln müssen und damit als falsch deklariert werden. Beide Messsonden wurden mehrmals mit Spülluft beaufschlagt, eine erhoffte Verbesserung blieb jedoch aus.
- Hier stellt sich die Frage ob der verwendete Schlauchquerschnitt der Ausgleichsleitung von 10 mm ausreichend ist um für gleiche Fluidisierungsbedingungen in dem zusammengeschlossenen Düsenverband zu sorgen. Anhand der Messergebnisse von p332 kann dieser Verdacht jedoch entkräftet werden, da sich über die gesamte Länge des Düsenverbundes lediglich eine Druckdifferenz von $0,4 \text{ mbar}$ einstellt. Bei der Betrachtung der p332-Ergebnissen leicht erkennbar, dass die Druckdifferenz in der zweiten Hälfte der Ausgleichsleitung nicht mehr ansteigt.
- Da mit einer Ausgleichsleitung über neun Düsenboxen keine nennenswerte Beeinträchtigung der Anlagenperformance festgestellt werden konnte, die Düsenanzahl jedoch sicherlich einen nicht unwesentlichen Einfluss für den Betrieb des Prototypen haben muss, liegt die Vermutung nahe, dass hier die poröse Eigenschaft des Sinterbodens einen Einfluss hat.

Bei der weiteren Betrachtung der Messergebnisse konnten wie in den folgenden Abbildungen 6.36 und 6.37 ersichtlich förderrichtungsbedingte Unterschiede bei der Auswertung von p313, p314 und p315 festgestellt werden.

Interpretation der Relativdruckmessung der Sensoren p313 bis p315 bei 90-100g/s, Versuch GID 029, Abbildung 6.36 und 6.37

- Für das Abklingverhalten ergibt sich aus Abbildung 6.36 für die Messreihe mit $\dot{m}_L =$

SandTES-Pilotanlage Messprotokoll

GID	Versuchsgruppe	VIDs	Vorgänger VID	Nachfolger VID
029	1->2	375 _393		
Bearbeiter	Beginndatum	Beginnzeit	Enddatum	Endzeit
JG	11/08/2017	13:34	11/08/2017	19:46

	Bezeichnung	Wert	Einheit	PLS-Variable
Zielgröße	Dp_v			Druckp313, Druckp314
Parameter 1	Luftmassenstrom	90-100	g/s	LuftMassenstrom1/2
Parameter 2	Sandmassenstrom	850	rpm	Schnecken Drehzahl
Parameter 3	Düsenverbund	1-9		
Weitere relevante PLS-Variablen				

Versuche

VID	Zeitstempel Beginn	Zeitstempel Ende	p ³	Bemerkung
375	11/08/2017 13:34	11/08/2017 13:45	1	100 g/s , 850 rpm
376	11/08/2017 14:00	11/08/2017 14:11	1	100 g/s , 850 rpm, WH
377	11/08/2017 14:15	11/08/2017 14:26	2	100 g/s , 850 rpm
378	11/08/2017 14:29	11/08/2017 14:40	3	100 g/s , 850 rpm
379	11/08/2017 14:43	11/08/2017 14:54	4	100 g/s , 850 rpm
380	11/08/2017 14:59	11/08/2017 15:10	5	100 g/s , 850 rpm
381	11/08/2017 15:43	11/08/2017 15:54	6	100 g/s , 850 rpm
382	11/08/2017 16:00	11/08/2017 16:11	7	100 g/s , 850 rpm
383	11/08/2017 16:16	11/08/2017 16:27	8	100 g/s , 850 rpm
384	11/08/2017 16:30	11/08/2017 16:41	9	100 g/s , 850 rpm
385	11/08/2017 17:08	11/08/2017 17:19	9	90 g/s , 850 rpm
386	11/08/2017 17:24	11/08/2017 17:35	8	90 g/s , 850 rpm
387	11/08/2017 17:41	11/08/2017 17:52	7	90 g/s , 850 rpm
388	11/08/2017 17:57	11/08/2017 18:08	6	90 g/s , 850 rpm
389	11/08/2017 18:13	11/08/2017 18:24	5	90 g/s , 850 rpm
390	11/08/2017 18:28	11/08/2017 18:39	4	90 g/s , 850 rpm
391	11/08/2017 19:02	11/08/2017 19:13	3	90 g/s , 850 rpm
392	11/08/2017 19:19	11/08/2017 19:30	2	90 g/s , 850 rpm
393	11/08/2017 19:35	11/08/2017 19:46	1	90 g/s , 850 rpm

Bemerkungen

ausgegangen wurde von einem stat. Bett im WT, dannach wurde die Schnecke1 eingeschaltet (rpm850) und somit wurde von Silo1 in 2 gefördert (Schieber2 offen und Schieber1 geschlossen). An der linken (2er) Seite des WT wurde ausgehend von der Messstelle x330 und x322 ein Verbund des Düsenboden eingerichtet. (zB.: bei Versuch 377 waren die Messstellen x330-x329 verbunden) An diesem Verbund wurde eine Realivdruckmessung zw. der vordersten und hintersten Stelle (x330) durch den Drucksensor p332 sowie eine Absolutdruckmessung mit p337 durchgeführt. Bei den Versuchen 385-393 wurde der Verbund wieder stellenweise abgebaut. An der Messstelle x326 befindet sich der Drucksensor p317 dieser wurde abmontiert und x351 in den Verbund integriert.

Ansprechperson: Peter Steiner, peter.p.steiner@tuwien.ac.at, 01 58801 302 333

Abbildung 6.34.: Messprotokoll des Düsenboden-Versuchs 2.0 von Silo 1 nach Silo 2, GID 029.

90 g/s und $\dot{m}_S = 850$ rpm eine Verzögerung der Druckabsenkung im Wärmetauscher. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu allen anderen Messreihen und ließ zu Beginn der Auswertung einen Fehler in der Versuchsdurchführung vermuten. Nach Kontrolle aller aufgezeichneten Messwerte konnte dies aber ausgeschlossen werden. Des wei-

Düsenbodenversuch 2.0				Durchschnittswert													
GID 029				linke Seite (Silo2)						rechte Seite (Silo1)							
Messreihe1: 1->2				p324	p325	p326	p327	p328	p338	p339	p332	p337	p313	p314	p315	p303	p312
Versuch	g/s	Düsenanzahl															
376	100	1	1D (100g/s)	7,0635	7,4686	-0,1524	7,2403	7,2556	10,0000	0,6770	-0,0146	117,2867	82,1995	124,5134	101,8826	23,5019	63,4643
380	100	5	5D (100g/s)	7,0765	7,5083	-0,1524	7,2489	7,3080	10,0000	0,6770	-0,4286	116,2907	82,3836	124,7898	102,0997	23,5613	63,2847
384	100	9	9D (100g/s)	7,1077	7,5104	-0,1524	7,2610	7,2994	10,0000	1,0852	-0,4185	116,3793	82,5964	125,0738	102,4734	23,8649	63,7184
Diff. Zwischen 1 und 9 Düsen				0,0442	0,0419	0,0000	0,0207	0,0438	0,0000	0,4082	-0,4039	-0,9074	0,3969	0,5605	0,5908	0,3631	0,2541
GID 029				linke Seite (Silo2)						rechte Seite (Silo1)							
Messreihe2: 2->1				p324	p325	p326	p327	p328	p338	p339	p332	p337	p313	p314	p315	p303	p312
Versuch	g/s	Düsenanzahl															
393	90	1	1D (90g/s)	7,1334	7,5444	-0,1524	7,4974	7,2759	10,0000	-0,2802	-0,0360	117,7454	82,2051	129,6649	103,3556	23,1461	67,1038
389	90	5	5D (90g/s)	7,1361	7,5281	-0,1524	7,4946	7,2804	10,0000	1,0588	-0,4450	116,3678	82,2085	129,9709	103,4974	23,4957	66,8249
385	90	9	9D (90g/s)	7,1357	7,5420	-0,1524	7,4946	7,2676	10,0000	1,0588	-0,4167	115,7108	81,9330	129,1502	102,8857	23,1489	67,0379
Diff. zwischen 1 und 9 Düsen				0,0023	-0,0024	0,0000	-0,0029	-0,0082	0,0000	1,3390	-0,3808	-2,0346	-0,2721	-0,5146	-0,4699	0,0028	-0,0659
Aussage:											sinkt						

Düsenbodenversuch 2.0				Durchschnittswert													
GID 029				linke Seite (Silo2)						rechte Seite (Silo1)							
Messreihe2: 2->1				p324	p325	p326	p327	p328	p338	p339	p332	p337	p313	p314	p315	p303	p312
Versuch	g/s	Düsenanzahl															
403	100	1	1D (100g/s)	7,2404	7,5847	-0,1608	6,7130	7,2556	9,0047	6,6368	-0,0318	116,1762	119,8213	81,0405	99,1868	60,5439	20,9657
407	100	5	5D (100g/s)	7,2634	7,5944	-0,1608	6,7955	7,3408	9,0047	6,6254	-0,4190	117,9352	122,2837	83,6285	101,7157	62,7638	23,5124
411	100	9	9D (100g/s)	7,2451	7,5998	-0,1608	6,7894	7,3484	9,0047	7,5717	-0,4143	118,6220	122,8852	84,2277	102,2789	62,7624	24,2201
Diff. Zwischen 1 und 9 Düsen				0,0047	0,0151	0,0000	0,0764	0,0928	0,0000	0,9349	-0,3825	2,4459	3,0639	3,1872	3,0921	2,2185	3,2543
GID 029				linke Seite (Silo2)						rechte Seite (Silo1)							
Messreihe2: 2->1				p324	p325	p326	p327	p328	p338	p339	p332	p337	p313	p314	p315	p303	p312
Versuch	g/s	Düsenanzahl															
421	90	1	1D (90g/s)	7,3088	7,6280	-0,1608	6,8978	7,3199	9,0047	6,8061	-0,0131	119,3862	123,8356	83,5935	102,4052	64,0389	23,2478
417	90	5	5D (90g/s)	7,3141	7,6324	-0,1608	6,8402	7,2825	9,0047	7,9893	-0,4096	119,1408	124,4571	84,1368	103,1265	64,1000	24,3512
413	90	9	9D (90g/s)	7,3328	7,6282	-0,1608	6,8784	7,2956	9,0047	8,0846	-0,4215	118,2982	123,8317	83,8198	102,5882	64,0123	23,1986
Diff. zwischen 1 und 9 Düsen				0,0240	0,0002	0,0000	-0,0195	-0,0242	0,0000	1,2785	-0,4084	-1,0879	-0,0040	0,2263	0,1830	-0,0265	-0,0492
Aussage:											sinkt						

Abbildung 6.35.: Auswertung der Messreihen Düsenboden-Versuch 2.0 GID 029.

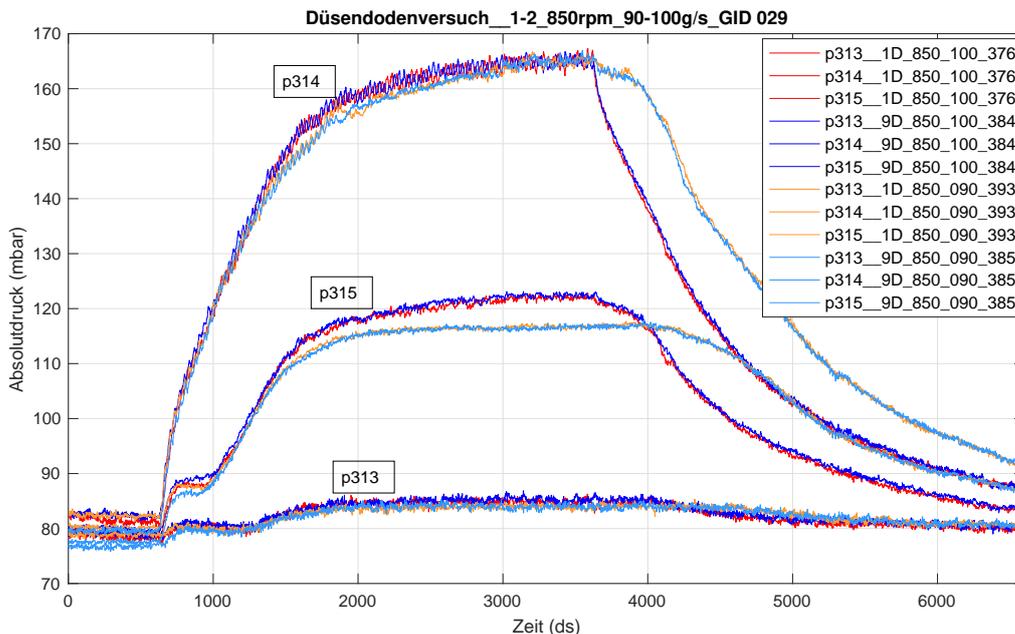


Abbildung 6.36.: Absolutdruckmessung der Sensoren p313 bis p315 von 1-2 bei 90-100g/s, Versuch GID 029.

teren zeigen die Ergebnisse aller neun Einzelversuche das selbe Verhalten, womit mit Sicherheit festgestellt werden kann, dass hier das reale Verhalten der Anlage wieder spiegelt wird. Trotz der zuvor auftretenden förderrichtungsbedingten Unterschiede ist diese Charakteristik erstaunlich, da sie in die entgegengesetzte Richtung in keinsten Form auftritt (siehe Abbildung 6.37). Um fundierte Antworten für dieses Verhalten zu

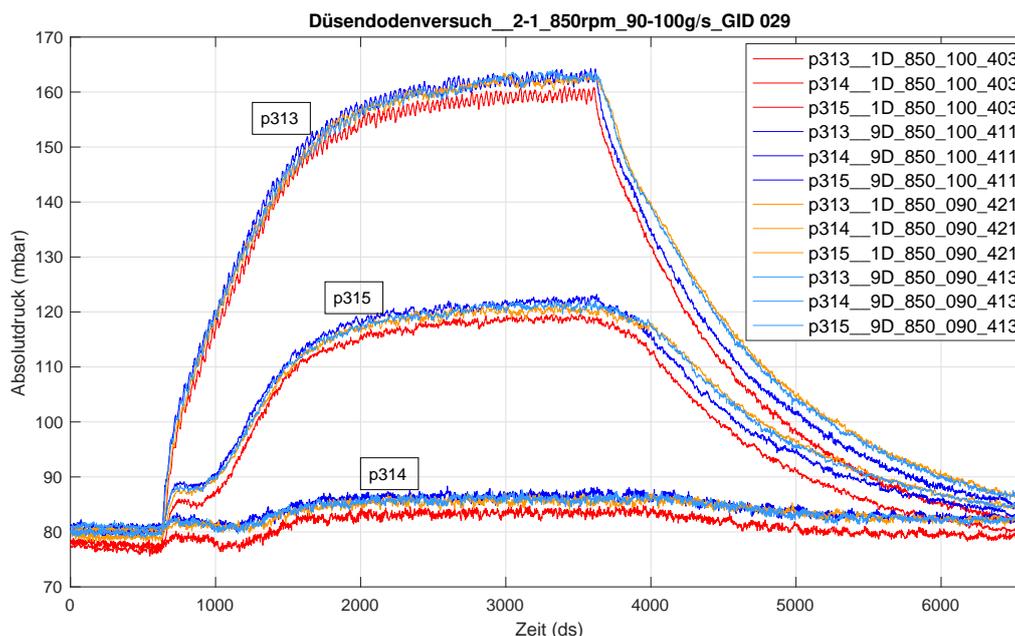


Abbildung 6.37.: Absolutdruckmessung der Sensoren p313 bis p315 von 2-1 bei 90-100g/s, Versuch GID 029.

bekommen sollten weiterführende Versuche durchgeführt werden.

- Vergleicht man dieses Verhalten jedoch mit den Messergebnissen von Abbildung 6.22 in Kapitel 6.2.3.1 so lässt sich auch hier ein gedämpftes Abklingverhalten nach dem Abstellen der Förderschnecke erkennen. Da in Kapitel 6.2.3.1 der Versuch nur in eine Förderrichtung (1-2) durchgeführt wurde konnte dieser Unterschied nicht sichtbar gemacht werden. Durch das Entfernen der Kaltkästen wurde dieser Effekt, vermutlich wie aus den Abbildungen ersichtlich, verstärkt.
- Völlig andere Ergebnisse lassen sich für die Förderrichtung 2 nach 1 in Abbildung 6.37 erkennen. Hier tritt nach dem Abschalten der Förderschnecke nur ein minimaler Unterschied zwischen den durchgeführten Fluidisierungsgraden $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ und 90 g/s auf. Die Kurvenverläufe zeigen dazu eine gute qualitative Übereinstimmung.
- Der gezeigte Druckunterschied der Kurven $\dot{m}_L = 100 \text{ g/s}$ und 90 g/s in Abbildung 6.37 zwischen den gasdicht abgetrennten Düsenboxen (blau) und dem Düsenverbund (rot) lässt sich gut mit der Vermutung für erschwerte Wirbelschichtbedingungen beim Zusammenschluss von Düsenboxen erklären.
- Des weitern fällt in Abbildung 6.37 auf, dass der Druckunterschied zwischen Versuchen mit gasdicht abgetrennten Düsenboxen (hellblau) und dem Düsenverbund (orange) bei niedriger Fluidisierung $\dot{m}_L = 90 \text{ g/s}$ geringer ausfallen.

Als nächstes sollen die Messergebnisse für die Relativdruckmessung über den Düsenboden mit den Sensoren p316 bis p323 in Abbildung 6.38 diskutiert werden.

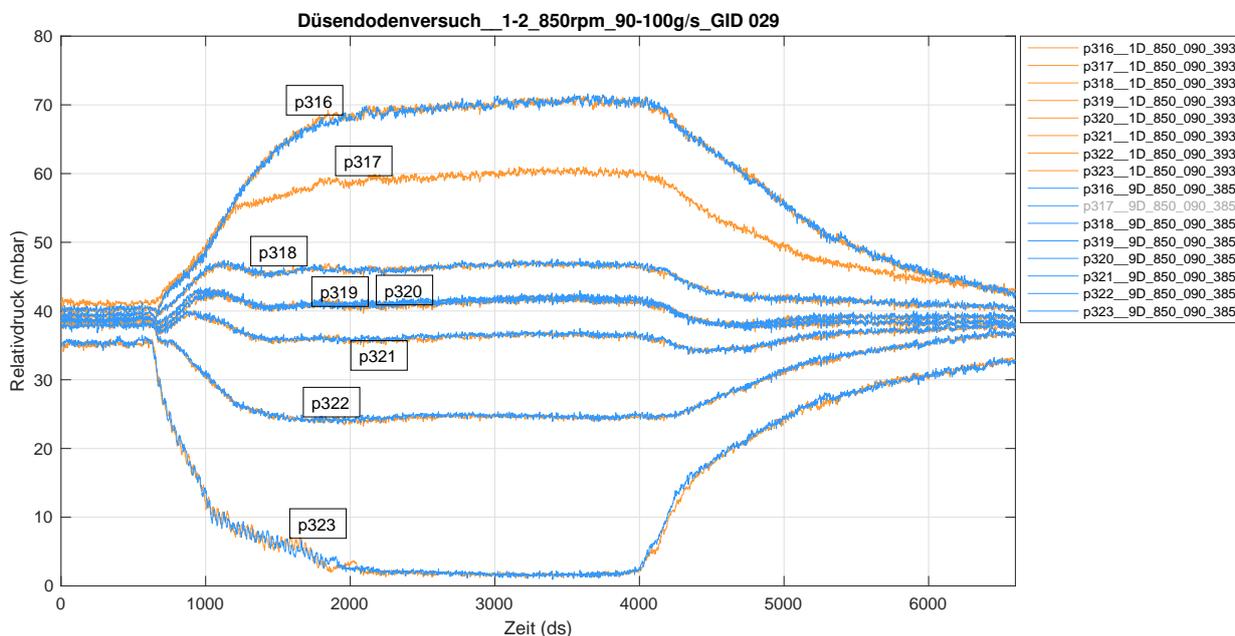


Abbildung 6.38.: Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 von 1-2 bei 90g/s, Versuch GID 029.

Um die Unterschiede bezüglich Förderrichtung und verschiedenen Fluidisierungsgraden besser herausarbeiten zu können, werden die Ergebnisse der Relativmessungen in Abbildung 6.39 und 6.40 gegenübergestellt. Für die Erstellung der Ausgleichsleitung wurde auch die Messstelle x326 in den Düsenverbund aufgenommen. Da diese Messstelle im Normalfall für die Relativdruckmessung von p317 herangezogen wird, ergeben sich bei dieser Versuchsanordnung falsche Ergebnisse bezüglich des Sensors p317. Aus diesem Grund wurden diese Messwerte nicht angezeigt. Die selben Umstände ergeben sich für die entgegengesetzte Förderrichtung (2-1) am Drucksensor p322 (siehe Abbildung 6.40).

Interpretation der Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323, Versuch GID 029, Abbildungen 6.38, 6.39 und 6.40

- Die Kurvenverläufe in Abbildung 6.39 bekräftigen die Aussagen von Abbildung 6.36, da hier wieder ein verzögertes Reagieren der Kurven erkennbar ist.
- Dem gegenüber steht wieder das einheitliche Erscheinungsbild der Messkurven in Abbildung 6.40. Hier sind lediglich die sich durch unterschiedliche Luftmassenströme ergebenden Verhaltensmuster zu erkennen.
- Eklatante Unterschiede zwischen geteilten Düsenboxen und dem Düsenverbund können hier aber wieder nicht festgestellt werden.

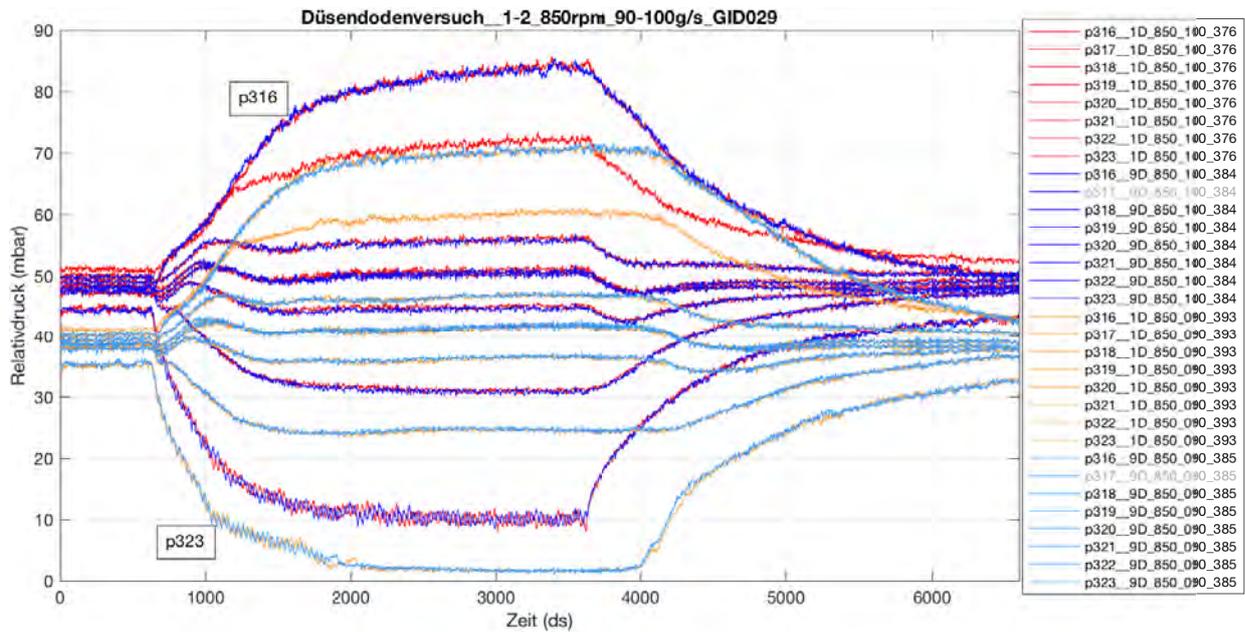


Abbildung 6.39.: Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 von 1-2 bei 90-100 g/s, Versuch GID 029.

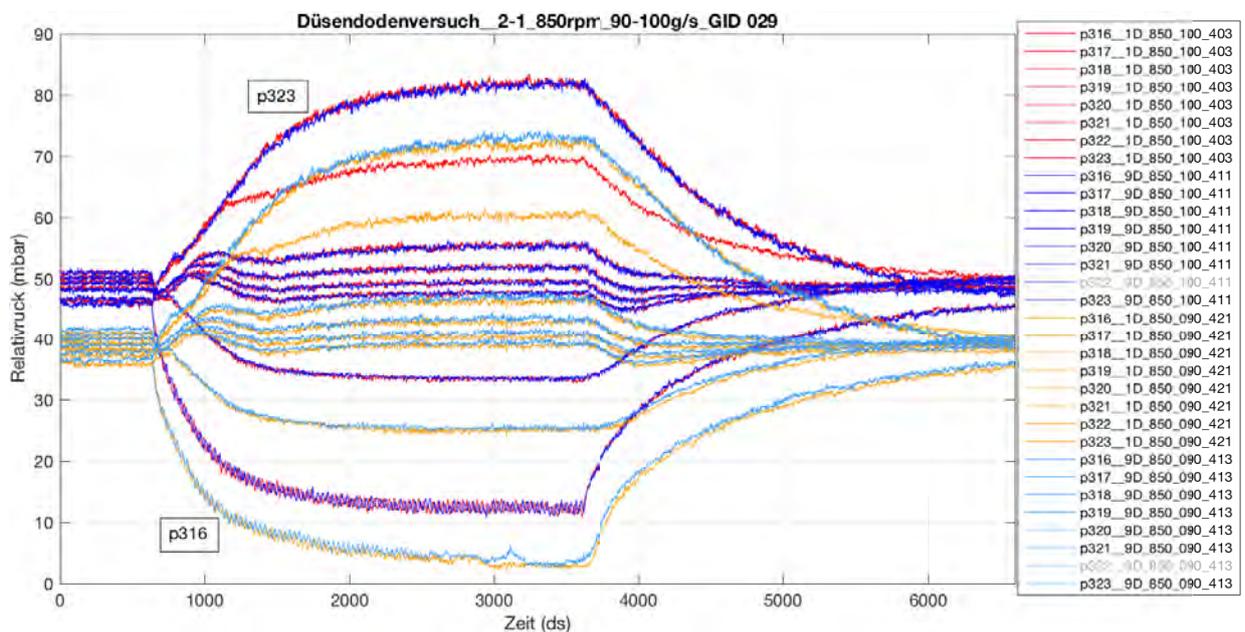


Abbildung 6.40.: Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 von 2-1 bei 90-100 g/s, Versuch GID 029.

Abschließend sollen noch die Ergebnisse der Drucksensoren p310 und p311 dargestellt werden. Diese Sensoren geben bei einer Sandförderung von 1-2 das Gefälle des ersten nach dem Sandeinlass angeordneten Luftkissensegmentes (für diesen Fall daher Luftkissen 1) wieder. Rückblickend auf Abbildung 5.13 stellt sich bei der Förderung von Sand

dabei ein Gefälle von p311 auf p310 ein. Da die Versuche GID 029 in beide Förderrichtungen durchgeführt wurden, kann auch in Gegenrichtung dieses Gefälle mit Hilfe von p304 und p305 dargestellt werden. Die Kurvenverläufe für diese Ergebnisseauswertung werden in den Abbildungen 6.41 und 6.42 wiedergegeben.

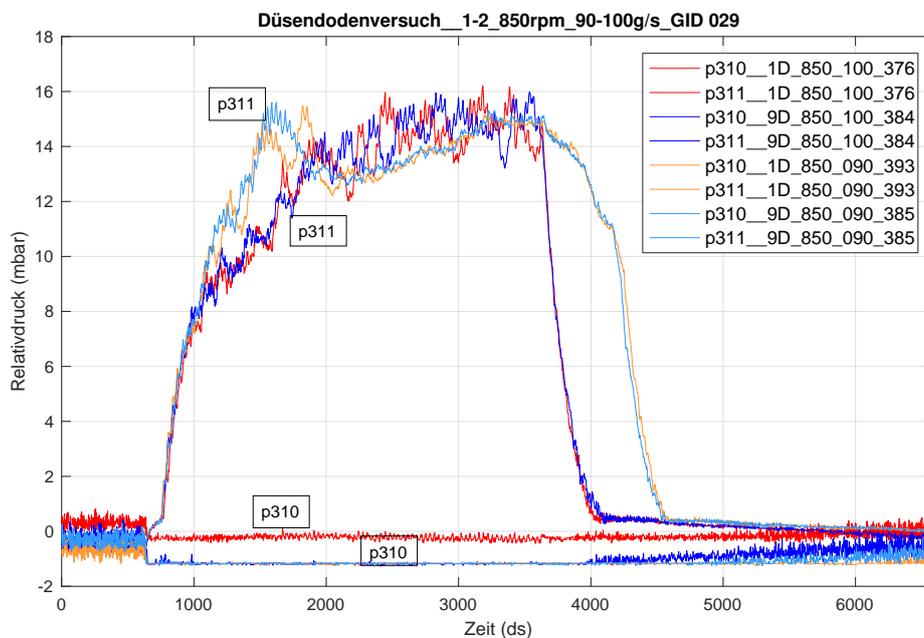


Abbildung 6.41.: Gegenüberstellung der Sensoren p310 und p311 von 1-2 bei 90 und 100 g/s, Versuch GID 029.

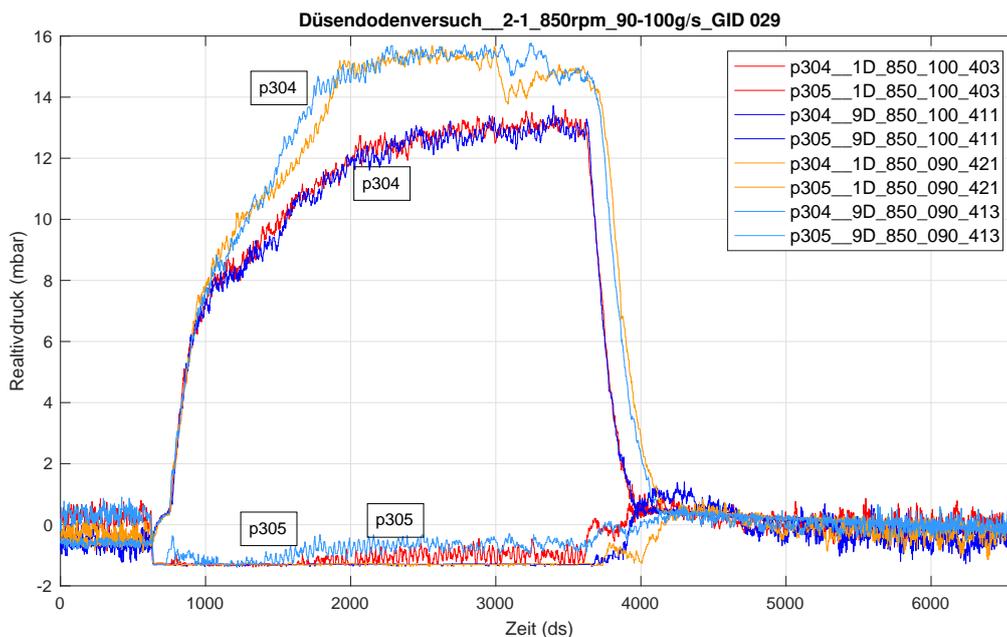


Abbildung 6.42.: Gegenüberstellung der Sensoren p304 und p305 von 2-1 bei 90 und 100 g/s, Versuch GID 029.

Interpretation der Gefällemessung anhand der Abbildungen 6.42 und 6.41, Versuch GID 029

- Die Diagramme unterscheiden sich dabei in ihren Kurvenverläufen wieder grundlegend voneinander, was wieder die förderrichtungsgebundenen Unterschiede aufzeigt.
- Während in Abbildung 6.41 p310 konstante Verläufe zeigt kommt es in der entgegengesetzten Richtung in Abbildung 6.42 bei p305 (und dem entsprechenden Pendant) zu einem Anstieg der Kurve.
- Auch die Kurven von p311 und p304 unterschieden sich stark. Dabei können schwierig aussagekräftige Unterschiede hinsichtlich der Ergebnisse zwischen geteilten Düsenboxen und dem Düsenverbund ausgemacht werden.

6.2.7.2. Ergebnisse Düsenboden-Versuch 2.0

Aufgrund der ausgeweiteten Versuchsdurchführung des Düsenbodenversuches nach dem Umbau des Wärmetauschers (GID 029) können folgende Erkenntnisse den Aussagen des zuvor durchgeführten Düsenbodenversuch (GID 024) hinzugefügt werden.

Endinterpretation Messergebnisse Düsenboden-Versuch 2.0

- Wie bereits im Rückstauversuch 2.0 konnte auch während der Durchführung dieses Versuches ein sensibleres Anlagenverhalten durch das Wegfallen der Kaltkästen festgestellt werden.
- die Ergebnisse dieser Messreihen konnten weitere Hinweise auf förderrichtungsbedingte Unterschiede geben. Da die Unterschiede jedoch sehr stark ausgeprägt waren lässt sich auch hier eine Verbindung zum Umbau und somit der Entfernung der Kaltkästen vermuten. Über die Ursache dieses Verhaltens kann bis dato aber nur spekuliert werden. Naheliegend wären hier Gegebenheiten im Inneren des Wärmetauschers wie zum Beispiel eine unterschiedliche Anordnung der Rohrbündel. Um jedoch fundierte Aussagen treffen zu können, müssten hier weiterführende Versuche durchgeführt werden.
- Trotz der Intensivierung der Versuchsdurchführung durch die Erweiterung des Düsenverbundes um zwei weitere Boxen konnten bezüglich der gemessenen Unterschiede zwischen getrennten Düsenboxen (in den Versuchen mit 1D bezeichnet) und dem Düsenverbund (in den Versuchen als 9D bezeichnet) keine aussagekräftigen Unterschiede aufgezeigt werden. Die dabei berechneten Unterschiede konnten großteils nur eine Differenz in den Nachkommastellen vorweisen. Da bei so geringen Unterschieden bereits Messungenauigkeiten eine entscheidende Rolle spielen, sollte hier

mit Tendenzen vorsichtig umgegangen werden. Somit kann als Kernaussage der Düsenbodenversuche zusammengefasst werden, dass die Anzahl der für die Einbringung der Fluidisierungsluft in den Wärmetauscher und damit die, zur Ausbildung einer Wirbelschicht notwendigen Düsen deutlich reduziert werden können, ohne negative Auswirkungen auf den Betrieb der Anlage befürchten zu müssen. Eine Verminderung der Düsenanzahl würde darüber hinaus positive Aspekte in wirtschaftlichen sowie in technischen Überlegungen bezüglich der Umsetzbarkeit einer solchen Anlage bringen.

7. Fazit und abschließende Worte

Speichertechnologien im Bezug mit Energie werden in den kommenden Jahren zunehmende Bedeutung erlangen. Vor allem im Zusammenhang mit regenerativen Energieformen sind diese enorm wichtig um Bedarf und Überschuss ausgleichen zu können. Das vorgestellte SandTES-Konzept kann dabei im Bereich (der Speicherung) von thermischer Energie ein Baustein zur Umsetzung von zukünftigen energietechnischen Vorhaben genutzt werden.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche und Tätigkeiten wurden in einer Zeitspanne von fast zehn Monaten durchgeführt. In dieser Zeit konnten viele Eindrücke und Erfahrungen im Umgang mit der Versuchsanlage gewonnen werden. Diese Arbeit soll neben der Offenlegung von Versuchsergebnissen, mit dem dazu nötigen theoretischen Hintergrundwissen bezüglich der Wirbelschichttechnik, auch dazu dienen zukünftig an der Anlage arbeitenden Person einen Überblick zu bieten und die gesammelten Erfahrungen weiterzugeben.

Das Tätigkeitsspektrum rund um die Anlage erfordert neben technischem Fachwissen auch den Willen sich handwerklich einzubringen. Schraubenschlüssel und ähnliches Werkzeug sollte daher immer in greifbarer Nähe verwahrt werden. Durch den großen Umfang an installierter Messtechnik spielt auch genaues Arbeiten und Dokumentation eine wichtige Rolle um den Überblick und die Nachvollziehbarkeit getätigter Arbeiten gewährleisten zu können. Zu guter Letzt ist natürlich die Erfahrung im Umgang mit der Anlage von großer Bedeutung wodurch bei Problemen rasch zielgerichtete Gegenmaßnahmen ergriffen werden können.

7.1. Gesammelte Erfahrungen und Optimierungspotential

7.1.1. Feuchtigkeit

Da die Anlage wettertechnisch nur durch ein Flugdach geschützt wird, ist Feuchtigkeit ein wichtiges Thema. Sand in Kombination mit Feuchtigkeit erschwert den Betrieb der Anlage ungemein, besonders die Verstopfung von Rohren ist hierbei problematisch. Vor allem bei winterlichen Temperaturen kann diese Kombination zum Stillstand bzw. zu nur sehr eingeschränktem Betrieb der Anlage führen (siehe dazu Abbildung 4.1(a)). Aber auch durch das ständige einbringen von Frischluft um den Wirbelschichtbetrieb zu ermöglichen wird Feuchtigkeit in das System eingeschleust. In Folge von Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht kann diese eingebrachte Feuchtigkeit im Inneren der Anlagen kondensieren.

Aus diesen Gründen ist es unabdingbar alle Möglichkeiten zu nutzen um ein Eindringen

von Feuchtigkeit in die Anlage zu verhindern.

Verbesserungen in folgenden Bereichen würden sich dafür besonders anbieten:

- Die Feuchtigkeitzufuhr über den Kompressor sollte verhindert werden. In den kalten Monaten wurde versucht das Temperaturniveau des Wärmetauschers über warme Prozessluft anzuheben. Dieser verfügt zwar über eine Luftentfeuchtungsfunktion jedoch könnte diese bei der Betrachtung von Abbildung 7.1 als unzureichend eingestuft werden.
- Durch das Flugdach nicht geschützt und somit allen Wettereinflüssen ausgesetzt befindet sich das Becherwerk weit außerhalb seiner Komfortzone. Die einzelnen Becherwerkselemente sind zwar über Stoffdichtungen gegenüber Staub abgedichtet, diese Dichtungen bieten jedoch vermutlich bei widrigen Wetterbedingung unzureichenden Schutz gegen Feuchtigkeit.



Abbildung 7.1.: Gefrorenes Wasser im Druckreduzierer der Prozessluft.

7.1.2. Sandtransport- und Ablagerungen in der Luftverrohrung

Durch die Fluidisierungsluft mitgerissener Sand, welcher sich später in Rohrleitungen und anderen Komponenten ablagert, behindert den Betrieb der Anlage stark und führt daher auch zu ungenauen Messungen zu einer Beeinträchtigung der Messergebnisse. Wird die Anlage in der Nähe der unteren bzw. oberen Betriebsgrenze gefahren kommt es meist zur Austragung von Sand. An der unteren Betriebsgrenze wirkt sich hier für den Sandtransport fördernd das hohe Sandlevel aus, während bei hohen Fluidisierungsgraden die Luft-

geschwindigkeit sehr hoch ist und so durch Blasen an der Oberfläche Sand in die Nähe der Abluftleitungen vordringen kann, wo er mit der Abluft mitgerissen wird. Hier soll vor allem auf die Auswirkungen bezüglich Geschwindigkeiten in Zusammenhang mit engen Querschnitten hingewiesen werden. So wird durch die Verengung von Querschnitten die Luftgeschwindigkeit erhöht (Prinzip Düse), wodurch bei ausreichender Geschwindigkeit Sand mitgerissen und ausgetragen werden kann. Kommt es in weiterer Folge zu einer Aufweitung bzw. Vergrößerung des Querschnittes (Prinzip Diffuser) wird die Geschwindigkeit reduziert und der Sand lagert sich in diesen Bereichen ab.

Sandablagerungen an der SandTES Anlage betreffen meist die selben Komponenten. Dabei kann vor allem die Abluftverrohrung oberhalb des Wärmetauschers genannt werden, in welche die Rohre der Luftkissen mit geringerem Querschnitt münden. Auch die Rekupe ratoren sind oft von Sandablagerungen betroffen. Die dadurch notwendige Entfernung des Sandes ist durch die begrenzten Platzverhältnisse und der dort installierten Sensorik sehr mühsam.



Abbildung 7.2.: Verstopfte Rohrleitung durch mitgeführten Sand.

Diese Sandablagerungen müssen für einen praxistauglichen Betrieb nach dem Gesichtspunkt der Wartungsfreundlichkeit einer solchen Anlage unbedingt stark vermindert werden. Vor allem in Kombination mit Feuchtigkeit führt abgelagerter Sand zu erschwerten Betriebsbedingungen verbunden mit einem hohen Wartungsaufwand.

Mögliche Abhilfen zum Verhindern der Sandaustragung wären:

- Rohre, welche die aus dem Wärmetauscher abströmende Luft führen, sollten einen großen Querschnitt besitzen, insbesondere der Mündungsquerschnitt zwischen Wärmetauscherdeckel und Abluftrohr sollte nicht die für das Mitreißen von Sand nötige Geschwindigkeit ermöglichen.
- Die Verwendung von Sieben wurde bereits im SandTES-Betrieb erprobt, durch Verstopfungsprobleme und erhöhten Druckverlusten wurden diese jedoch wieder entfernt. Experimente mit unterschiedlichen Maschenweiten der Siebe könnten an bestimmten Einbauorten trotzdem Verbesserungen mit sich bringen.
- Die Installation eines Behälters, in welchem sich ausgetragener Sand ablagert und anschließend bei Wartungsarbeiten leicht entnommen werden kann bzw. eine direkte Rückführung in das System möglich ist, wäre eine weitere jedoch aufwändigere Möglichkeit die Ablagerung in anderen Anlagenkomponenten zu verhindern. Hier wäre auch der Einsatz einer Zyklonkonstruktion denkbar.
- Da bekanntlich ein Einblick in das Innere der Anlage nur durch wenige Schaugläser bzw. bei Wartungsarbeiten durch Demontage von Komponenten möglich ist, sind Bestrebungen zur Minimierung des Ablagerungsproblems durch weiterführende Experimente vermutlich mit einem großen Zeit- und auch Materialeinsatz verbunden.

Die nach Abschluss der Kaltversuchsphase durchgeführte Isolierung des Wärmetauschers und somit die Vorbereitung für eine bevorstehende Heißtestphase spielt hier auch eine wichtige Rolle. Zum einen können dadurch alle am Wärmetauscher angebrachten Schaugläser nicht mehr genutzt werden, da sie unter der Isolierung verschwinden und darüber hinaus können auftretenden Verstopfungen durch Klopfen am Gehäuse nicht mehr gelöst werden. Um bei Verstopfungen in der Rohrleitung oberhalb des Wärmetauschers bei zukünftigen Wartungs- und Demontearbeiten die Isolierung nicht zu beschädigen bzw. entfernen zu müssen, wurde dazu geraten, an diesen besonders für Verstopfungen und Ablagerungen gefährdeten Abschnitte keine Isolierung anzubringen. Diese Aufforderung wurde im Zuge der Auftragserteilung an die Isolationsfirma berücksichtigt, wodurch alle abluftfördernden Luftverrohrungen von der Isolierung ausgenommen wurden und somit weiterhin zugänglich sind. Dadurch soll auch in der Testphase der Heißversuche die Wartungsfreundlichkeit und Zugänglichkeit der Anlage in einem angemessenen Bereich gehalten werden.

7.1.3. Verstopfungen an der Saugzuganlage

Während der Durchführung der Versuche wurden mehrmals erhöhte Überdrücke in der Abluftleitung festgestellt. Diese Druckbeaufschlagung wirkt sich besonders an den großflächigen Abmessungen der Becherwerksmodule mit rechteckigem Querschnitt negativ aus, daher wird ein erhöhter Becherwerksdruck (p503) als kritisch verstanden.

Nach dem dieses Problem immer wieder auftauchte und eine Behebung durch verschiedenste Gegenmaßnahmen (zum Beispiel Experimente mit Ventilstellungen) meist nicht zufriedenstellend waren, konnten folgende Ursachen ausgemacht werden:

- Die Sandablagerungen im Bereich des Rekuperators verursachen eine Verminderung der Saugleistung des Abzugventilators. Ein hoher Becherwerksdruck kann daher mit Sandablagerungen innerhalb der Rekuperatoren in Verbindung gebracht werden.
- Die entscheidende Ursache für eine unzureichende Funktion und Leistungsabnahme des Saugzuges konnte aber in Verbindung mit den Filterelementen gefunden werden. Diese Filter werden während des Betriebes durch den Feinanteil der mit der Abluft geführten Sandpartikel verlegt. Damit verschlechtert sich die Saugleistung abhängig von der Betriebszeit und der Menge des mittransportierten Sandes. Bei einem Anlagenbetrieb im Nahbereich der möglichen Betriebsgrenzen, welcher einen starken Transport der mitgeführten Sandpartikel verursacht, kommt es hier bereits nach kurzer Zeit zu einem Verschluss der Filterelemente und damit verbundenen Leistungsabfall des Sauggebläses. Die in dem Saugzug verbaute automatische Filterreinigung, welche mit Hilfe von Druckstößen funktioniert, ist damit für dieses Anwendungsgebiet unzureichend. Um ein besseres Verständnis für dieses Problem zu erhalten kann ein kleines Beispiel, welches während des Rückstauversuches 2.0 aufgezeichnet wurde, genannt werden. So wurde bei gleichbleibenden Versuchsparametern (Anzahl der im Düsenverbund involvierten Düsenboxen, Sandmassenstrom und Fluidisierungsgrad) vor der Filterreinigung mit 98% der Saugzugleistung im Becherwerk ein Überdruck von > 5 mbar aufgezeichnet. Nach der Filterreinigung durch mechanisches Abklopfen dieser konnte mit nur 65% der Maximalleistung der Überdruck im Becherwerk auf 2 mbar begrenzt werden.

Diese Filterproblematik wirkt sich entscheidend auf den Betrieb und die nötigen Wartungsfreundlichkeit der Anlage aus. Ein Betrieb der Anlage bei geringeren Fluidisierungsgraden erhöht die Wirtschaftlichkeit der Pilotanlage durch den geringeren Leistungsbedarf des Gebläses und verlängert dazu auch die nötigen Wartungsintervalle der Filterelemente. Unter diesem Gesichtspunkt soll nochmals auf die erosiven Eigenschaften des Sandes hingewiesen werden. Es ist naheliegend, dass der Feinanteil an Feststoffen (Abrieb von Quarzsand aber auch der Metalloberfläche des Gehäuses) mit fortschreitender Betriebszeit ansteigen wird und dadurch diese Problematik verschärft.

7.2. Mögliche Einsatzgebiete SandTES-Konzept

Die Verwendung des vorgestellten SandTES-Konzeptes ist in mehreren Energietechnischen Bereichen möglich (erdenklich). Neben der Nutzung von Überschussenergie in di-

versen Industriebereichen würde sich vor allem eine Einbindung des Konzepts im Zusammenhang mit Solarenergie anbieten. Hier würde die Verwendung einer SandTES-Anlage eine wirtschaftliche Lösung zum Ausgleich der Schwankungen insbesondere zwischen Tag und Nacht darstellen. In der Arbeit von Schwaiger [14] werden einige in diese Richtung weisende Verwendungen aufbereitet.

7.3. Ausblick

Nach abgeschlossener Kalttestphase und Bestätigung der Funktionsfähigkeit des Konzeptes wurde ein Umbau an der Anlage vorgenommen wobei die Kaltkästen entfernt wurden und eine Isolierung am Wärmetauscher sowie der Silos und Becherwerk vorgenommen wurde. Somit kann nun mit der Durchführung der geplanten Heißversuchsphase gestartet werden bei welcher unter anderem der Wärmeumgangskoeffizient der Anlage berechnet werden soll.

Dabei sollen alle relevanten wärmetechnischen Daten aufgenommen werden um weiterführende Aussagen über das Funktionsverhalten der Pilotanlage treffen können und deren Weiterentwicklung voran zu treiben.

SandTES-Pilotanlage Messprotokoll

GID	Versuchsgruppe	VIDs	Vorgänger VID	Nachfolger VID
029	2->1	403 - 421		
Bearbeiter	Beginndatum	Beginnzeit	Enddatum	Endzeit
JG	12/08/2017	14:05	12/08/2017	19:59

Zielgröße	Bezeichnung	Wert	Einheit	PLS-Variable
Parameter 1	Luftmassenstrom	90-100	g/s	Druckp313, Druckp314
Parameter 2	Sandmassenstrom	850	rpm	LuftMassenstrom1/2
Parameter 3	Düsenverbund	1-9		Schnecken Drehzahl
Weitere relevante PLS-Variablen				

Versuche

VID	Zeitstempel Beginn	Zeitstempel Ende	p ³	Bemerkung
403	12/08/2017 14:05	12/08/2017 14:16	1	100 g/s , 850 rpm
404	12/08/2017 14:18	12/08/2017 14:29	2	100 g/s , 850 rpm
405	12/08/2017 14:31	12/08/2017 14:42	3	100 g/s , 850 rpm
406	12/08/2017 14:44	12/08/2017 14:55	4	100 g/s , 850 rpm
407	12/08/2017 14:57	12/08/2017 15:08	5	100 g/s , 850 rpm
408	12/08/2017 15:34	12/08/2017 15:45	6	100 g/s , 850 rpm
409	12/08/2017 15:47	12/08/2017 15:58	7	100 g/s , 850 rpm
410	12/08/2017 16:00	12/08/2017 16:11	8	100 g/s , 850 rpm
411	12/08/2017 16:13	12/08/2017 16:24	9	100 g/s , 850 rpm
412	12/08/2017 16:44	12/08/2017 16:55	9	90 g/s , 850 rpm
413	12/08/2017 17:33	12/08/2017 17:44	9	90 g/s , 850 rpm, WH
414	12/08/2017 17:46	12/08/2017 17:57	8	90 g/s , 850 rpm
415	12/08/2017 17:59	12/08/2017 18:10	7	90 g/s , 850 rpm
416	12/08/2017 18:34	12/08/2017 18:45	6	90 g/s , 850 rpm
417	12/08/2017 18:47	12/08/2017 18:58	5	90 g/s , 850 rpm
418	12/08/2017 19:00	12/08/2017 19:11	4	90 g/s , 850 rpm
419	12/08/2017 19:13	12/08/2017 19:24	3	90 g/s , 850 rpm
420	12/08/2017 19:26	12/08/2017 19:37	2	90 g/s , 850 rpm
421	12/08/2017 19:48	12/08/2017 19:59	1	90 g/s , 850 rpm

Bemerkungen

ausgegangen wurde von einem stat. Bett im WT, dannach wurde die Schnecke1 eingeschaltet (rpm850) und somit wurde von Silo1 in 2 gefördert (Schieber2 offen und Schieber1 geschlossen). An der rechten (1er) Seite des WT wurde ausgehend von der Messstelle x347 bis x355 ein Verbund des Düsenboden eingerichtet. (zB.: bei Versuch 404 waren die Messstellen x347-x348 verbunden) An diesem Verbund wurde eine Realdruckmessung zw. der vordersten und hintersten Stelle (x347- x...) durch den Drucksensor p332 sowie eine Absolutdruckmessung mit p337 durchgeführt. Bei den Versuchen 412-420 wurde der Verbund wieder stellenweise abgebaut. An der Messstelle x351 befindet sich der Drucksensor p322 dieser wurde abmontiert und x351 in den Verbund integriert.

Ansprechperson: Peter Steiner, peter.p.steiner@tuwien.ac.at, 01 58801 302 333

Abbildung A.6.: Messprotokoll der Düsenboden Versuch 2.0 von Silo 2 nach Silo 1, VID 029.

Nomenclature

Griechische Formelbuchstaben

α	Wärmeübergangszahl	$W/(m^2 \cdot K)$
Δ	Differenz	—
η_C	Carnot-Faktor	—
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
μ	dynamische Viskosität	$kg/(m \cdot s)$
Ω – Zahl		—
Φ	Sphärizität	—
Ψ	Porosität	—
ψ	Rohrreibungszahl	—
ρ	Dichte	kg/m^3
ε	Emissionsgrad	—
ζ	Widerstandsbeiwert	—

Indizes

A	Auftrieb
B	Gasblase
b	Schüttgut von bulk
f	Fluid
ges	gesamt
$m.f$	Minimal Fluid
p	Partikel
s	Solid
u	Umgebung

Naturkonstanten

σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5.67 \cdot 10^{-8}$	$W/(m^2 \cdot K^4)$
g	lokale Gravitationskonstante	9.81	m/s^2

Römische Formelbuchstaben

\dot{V}	Volumenstrom		m^3/s
A_p	Oberfläche eines Partikels		m^2
Ar	Archimedes-Zahl		–
C	Konstante		–
c_p	spezifische Wärmekapazität		$J/(kg \cdot K)$
d	Durchmesser		m
d_A	Sieb Durchmesser		m
d_p	Referenzpartikel Durchmesser		m
d_S	Oberflächenbezogener Durchmesser		m
d_V	Volumenbezogener Durchmesser		m
d_{SV}	Oberflächen-Volumenbezogener Durchmesser		m
F	Kraft		N
Fr	Froundzahl		–
Fr^*	erweiterte Froundzahl		–
l	Dicke eines Körpers		m
n	Drehzahl		U/min
Re	Reynoldszahl		–
T	Temperatur		K
u	Düsengeschwindigkeit		m/s
V_p	Volumen eines Partikels		m^3
w	Relativgeschwindigkeit		m/s
$\dot{E}x_Q$	Exergie eines Wärmestroms		J/s
\dot{Q}	Wärmestrom		J/s

A	Fläche	m^2
f	Fläche	m^2
G	Gewichtskraft	N
h	Höhe	m
L	Länge	m
M	Gesamtmasse	kg
m	Masse	kg
p	Druck	Pa
Q	Wärme	J
t	Zeit	s
U	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
v	Geschwindigkeit	m/s

Literaturverzeichnis

- [1] S. Baehr Hans Dieter und Kabelac. *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2016.
- [2] P. Basu. *Circulating fluidized bed boilers: design, operation and maintenance*. Springer, 2015.
- [3] S.-. u. E. Fraunhofer-Institut für Umwelt-. *Thermochemischer Festphasen-Speicher*. Online; abgerufen am 27-09-2017. 2016. URL:http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Waerme_auf_kleinstem_Raum_speichern/.
- [4] J. Frauscher. „Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur Hochtemperatur Sand-Wärmespeicherung“. Master Thesis. Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2016.
- [5] D. Geldart. *Particle entrainment and carryover*. 1986.
- [6] W. van Helden. *Thermische Speicher mit hoher Energiedichte*. AEE - Institute for Sustainable Technologies, 2008.
- [7] T. Hirn. „Versuchsanlage thermische Energiespeicher, Technische Dokumentation, Wirkungsweise und Analyse“. Master Thesis. Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2016.
- [8] H. Hofbauer. „Wirbelschichttechnik“. Skriptum zur Vorlesung. Technische Universität Wien.
- [9] L. Krassini. „Inbetriebnahme und erste Messungen einer Wirbelschicht-Wärmespeicheranlage“. Master Thesis. Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2017.
- [10] A. Kratzsch. *Speichertechnologien im Überblick*. Online; abgerufen am 27-09-2017. 2014. URL:<https://image.slidesharecdn.com/141029wt2014berblickspeichertechnologie/141126051130-conversion-gate01/95/stromspeicher-schlssel-zur-energiegewende-7-638.jpg?cb=1416978800>.
- [11] M. Kraume. *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen*. Springer-Verlag, 2013.
- [12] L. Reh. „Verbrennung in der Wirbelschicht“. *Chemie Ingenieur Technik* Bd. 40, Nr. 11 (1968), S. 509–515.
- [13] S. Reuter. „Partikeldynamik in Wirbelschichtsystemen - Geschwindigkeit und Zirkulation granularer Medien untersucht mit bildgebender und geschwindigkeitskodierender NMR“. Dissertation. RWTH Aachen University, 2011.
- [14] K. Schwaiger. „Development of a Novel Particle Reactor/Heat-Exchanger Technology for Thermal Energy Storages“. Dissertation. Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2016.

-
- [15] P. Steiner. „Experimental Investigations and Application Analysis of a Particle-based High Temperature Thermal Energy Storage“. Dissertation. Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2017.
- [16] P. Steiner. „Flow Characteristics of a Fluidized Bed Heat Exchanger used for High Temperature Thermal Energy Storage“ (2017).
- [17] M. Sterner und I. Stadler. *Energiespeicher-Bedarf, Technologien, Integration*. Springer-Verlag, 2014.
- [18] M. Stuess. *Mechanische Verfahrenstechnik*. Bd. 2. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [19] V. e. V [Corporate Author] und S. C. Provider. *VDI-Wärmeatlas*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [20] J. Werther. „Grundlagen der Wirbelschichttechnik“. *Chemie Ingenieur Technik* Bd. 54, Nr. 10 (1982), S. 876–883.
- [21] J. Werther. „Measurement techniques in fluidized beds“. *Powder Technology* Bd. 102, Nr. 1 (1999), S. 15–36.
- [22] Wikipedia. *Paranuss-Effekt*. Online; abgerufen am 27-09-2017. 2017. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Paranuss-Effekt>.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Funktionsprinzip von Energiespeicher.	1
1.2	Einteilung von Energiespeicher.	2
1.3	Übersicht der verschiedenen Technologien zur Speicherung thermischer Energie.	3
1.4	Funktionsprinzip thermochemische Speicher.	4
2.1	Eigenschaften einer Wirbelschicht.	7
3.1	Charakteristische Strömungszustände in Wirbelschichten.	13
3.2	Unterscheidung verschiedener Typen von Gas-fluidisierten Feststoffen nach Geldart.	14
3.3	Kräftegleichgewicht an einem Wirbelschichtelement der Länge L	16
3.4	Druckverlustverlauf einer homogenen fluidisierenden Schicht.	17
3.5	Experimentelle Bestimmung des Lockerungspunktes und der Minimalfluidisierungsgeschwindigkeit.	18
3.6	Vergleich zwischen Experiment und Berechnung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit.	19
3.7	Wirbelschicht-Zustandsdiagramm nach Reh.	21
3.8	Druckzustand einer einzeln aufsteigenden Gasblase.	22
3.9	Schematische Darstellung des Mitreißens von Feststoff durch eine aufsteigende Blase.	23
3.10	Gasaustausch im Nahbereich einer aufsteigenden Gasblase.	23
3.11	Abhängigkeit der mittleren Blasengröße von der Höhe über dem Gasverteiler in Wirbelschichten aus Geldart A und B Partikeln.	24
3.12	Räumliche Gasblasenverteilung in Abhängigkeit vom Abstand zur Bettmitte für unterschiedliche Höhen über dem Anströmboden und der daraus resultierende Feststoffumlauf.	26
3.13	Abhängigkeit des lokalen Blasenvolumenanteils Ψ_B vom Abstand r zur Bettmitte für unterschiedliche Reaktordurchmesser.	27
4.1	Gefrorener Sand in Folge der tiefen Temperaturen April 2017.	30
4.2	Schematische Darstellung eines Wärmetauscher-Segmentes.	32
5.1	Versuchsanlage SandTES.	35
5.2	CAD-Modell SandTES-Anlage.	36
5.3	Grundprinzip SandTES-Anlage.	36
5.4	3D-Modell Wärmetauscher.	37
5.5	3D-Modell Düsenboden.	38
5.6	Messstellenzuordnung am Wärmetauscher.	40
5.7	Auszug der Variablen und Kartenliste.	41
5.8	Messsonde mit Schutzsieb.	41

5.9	3D-Modell Rekuperator.	42
5.10	R & I Fließschema der SandTES Luftverrohrung.	43
5.11	3D-Modell Becherwerk und Schneckentrieb.	44
5.12	R & I Fließschema der SandTES Förderanlage.	45
5.13	Bedienungsoberfläche für den SandTES Wärmetauscher Aprotl.	46
6.1	Messprotokoll der Start-Stop Versuche GID 018	50
6.2	Gegenüberstellung von $\Delta p_{Düse}$ bei einer Fluidisierung mit 80g/s bzw. 90g/s GID 018	51
6.3	Gegenüberstellung von p313, p314, p315 GID 018	52
6.4	Gegenüberstellung von p313, p314, p315, p316, p323 GID 018	53
6.5	Messprotokoll der Start-Stop Versuche GID 019	55
6.6	Gegenüberstellung von p313, p314, p315, p316, p323 GID 019	56
6.7	Gegenüberstellung von p313, p314, p315, p316, p323 GID 018.	56
6.8	Rückstau Berechnung GID 018 019, variabler Luftmassenstrom	58
6.9	Rückstau Berechnung GID 018 019, variabler Sandmassenstrom	58
6.10	Messprotokoll der Richtungswechsel Versuche GID 020	61
6.11	Gegenüberstellung 450 rpm von p313, p314, p315 GID 020	62
6.12	Gegenüberstellung 650 rpm von p313, p314, p315 GID 020	63
6.13	Gegenüberstellung 850 rpm von p313, p314, p315 GID 020	63
6.14	Gegenüberstellung 450 rpm von p316, p323 GID 020	65
6.15	Detailansicht des verwendeten Messaufbaues GID 024.	68
6.16	Ausführung der Luftausgleichsleitung für Düsenbodenversuch, GID 024.	68
6.17	Messprotokoll der Düsenboden Versuche GID 024.	69
6.18	Relativdruck p324 oberhalb des Düsenverbandes, 850rpm, 100g/s GID 024.	70
6.19	Relativdruckmessung der Sensoren p324, p326, p327 und p328 GID 024.	71
6.20	Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 bei 100g/s, Versuch GID 024.	72
6.21	Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 bei 90g/s, Versuch GID 024.	73
6.22	Gegenüberstellung der Sensoren p313, p314 und p315 bei 90g/s und 100g/s, Versuch GID 024.	74
6.23	Gegenüberstellung der Sensoren p310 und p311 bei 90g/s und 100g/s, Versuch GID 024.	75
6.24	Instandhaltung der Schutzsiebe an Druckmessstellen.	78
6.25	Vergleich der Schneckenlinien nach dem Wärmetauscherumbau (GID 025 und 026) mit jenen bei der Erstinbetriebnahme (GID 001 und 002).	80
6.26	Schema für Rückstauversuch ohne Kaltkästen, GID 027 und 028 [14].	82
6.27	Messprotokoll der Rückstauversuche 2.0 GID 027.	84

6.28	Gegenüberstellung der Rückstaumessung von Silo 2 nach Silo 1, GID 027.	85
6.29	Gegenüberstellung der Rückstaumessung von Silo 1 nach Silo 2, GID 028.	85
6.30	Gegenüberstellung der korrigierten Rückstaumessungen von Silo 2 nach Silo 1, GID 027.	87
6.31	Gegenüberstellung der korrigierten Rückstaumessungen von Silo 1 nach Silo 2, GID 028.	88
6.32	Gegenüberstellung der Wärmetauscherhöhe $h=0.63\text{m}$ (ohne Kaltkästen, GID 027) zu $h=1.13\text{m}$ (mit Kaltkästen, GID 021).	89
6.33	Gegenüberstellung der Wärmetauscherhöhe $h=0.63\text{m}$ (ohne Kaltkästen, GID 022) zu $h=1.13\text{m}$ (mit Kaltkästen, GID 028).	90
6.34	Messprotokoll des Düsenboden-Versuchs 2.0 von Silo 1 nach Silo 2, GID 029. . . .	94
6.35	Auswertung der Messreihen Düsenboden-Versuch 2.0 GID 029.	95
6.36	Absolutdruckmessung der Sensoren p313 bis p315 von 1-2 bei 90-100g/s, Versuch GID 029.	95
6.37	Absolutdruckmessung der Sensoren p313 bis p315 von 2-1 bei 90-100g/s, Versuch GID 029.	96
6.38	Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 von 1-2 bei 90g/s, Versuch GID 029.	97
6.39	Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 von 1-2 bei 90-100 g/s, Versuch GID 029.	98
6.40	Relativdruckmessung der Sensoren p316 bis p323 von 2-1 bei 90-100 g/s, Versuch GID 029.	98
6.41	Gegenüberstellung der Sensoren p310 und p311 von 1-2 bei 90 und 100 g/s, Versuch GID 029.	99
6.42	Gegenüberstellung der Sensoren p304 und p305 von 2-1 bei 90 und 100 g/s, Versuch GID 029.	99
7.1	Gefrorenes Wasser im Druckreduzierer der Prozessluft.	104
7.2	Verstopfte Rohrleitung durch mitgeführten Sand.	105
A.1	Messprotokoll der Rückstauversuche 2.0 MR2, GID 027.	109
A.2	Messprotokoll der Rückstauversuche 2.0 MR3, GID 027.	110
A.3	Messprotokoll der Rückstauversuche 2.0 MR1, GID 028.	111
A.4	Messprotokoll der Rückstauversuche 2.0 MR2, GID 028.	112
A.5	Messprotokoll der Rückstauversuche 2.0 MR3, GID 028.	113
A.6	Messprotokoll der Düsenboden Versuch 2.0 von Silo 2 nach Silo 1, VID 029. . . .	114

Tabellenverzeichnis

3.1	gebräuchliche Referenzdurchmesser zur Partikelcharakterisierung	10
3.2	Sphärizität für unterschiedliche nicht kugelige Materialien	10
3.3	Experimentelle Werte Porosität im Lockerungspunkt Ψ_{mf} [19].	12
6.1	berechnete Werte für den geförderten Sandmassenstrom zur Erstellung der Schneckenkennlinien	80
6.2	Berechnung $\Delta p_{RS,korr}$ für GID 027	86
6.3	Gegenüberstellung $\Delta p_{RS,027}$ zu $\Delta p_{RS,021}$	89
6.4	Gegenüberstellung $\Delta p_{RS,028}$ zu $\Delta p_{RS,022}$	90