



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK
Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Inbetriebnahme und erste Messungen einer Wirbelschicht-Wärmespeicheranlage

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

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

Und

Projektass. Dipl.-Ing. Peter Philipp Steiner

Institut für Energietechnik und Thermodynamik
eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

BSc. Lyuben Krassini
1226029

Wien, am 12.07.2017

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation.....	4
1.2. Aufbau der Arbeit	4
1.3. Beschreibung der Anlage.....	4
1.3.1. Funktionsprinzip.....	5
1.3.2. Speichermedium.....	8
2. Prozessleitsystem.....	9
2.1. Elektroschema, Kommunikation.....	10
2.2. Aprot Engin, Cae Manager.....	12
2.2.1. Control Computer	12
2.2.2. CPU Controller	13
2.2.3. SandTES Logik und Visualisierung	14
2.3. Aprot Runtime.....	15
2.3.1. Operator Manager.....	15
2.3.2. SandTES Display Center.....	15
2.4. Implementieren von Sensoren.....	25
2.5. Berechnung von Messdaten.....	28
2.6. Alarmer und Sicherheitseinrichtungen.....	30
3. Durchgeführte Versuche.....	34
3.1. Sandmassenstrom.....	35
3.2. Blendenabweichung	38
3.3. Rückstau	41
3.3.1. Ausgeglichenes Sandbettniveau	49
3.4. Dynamische Bettwechselung	51
3.5. Stabilität Düsenboden.....	53
4. Optimierung Vorschläge, Kurzfristige Lösungen.....	53

4.1. Messstellen.....	53
4.2. Transport von Sand in den Abluftrohrleitungen.....	55
4.3. Feuchtigkeit, Abtrocknen von Sand in dem Silo.	57
5. Schlusswort.....	59
6. Abbildungsverzeichnis.....	62
7. Tabellenverzeichnis.....	64
8. Literatur	65

1. Einleitung

Im physikalischen Sinne ist ein Verlust von Energie nicht möglich, sie kann nur umgewandelt werden. Das ist die Kernaussage des Energieerhaltungssatzes. Deshalb war es immer schon ein Anliegen der Menschen die Energieumwandlung möglichst effizient zu gestalten. Heute ist dieses Effizienzdenken nicht nur in der Wirtschaft, sondern auch bei den Konsumenten angekommen.

Trotz des Energieerhaltungssatzes wird umgangssprachlich von „Energieverbrauch“, „Energieverschwendung“ oder „Energieverlust“ gesprochen. Meist wird damit thermische Energie in Form von Wärme bezeichnet, die an die Umgebung abgegeben wird (Anergie). Heutzutage werden große Mengen an Anergie abgegeben, die nicht genutzt werden können, z.B. beim Bremsen und Kühlen von Fahr- und Flugzeugen oder beim Schneiden und Schweißen von Metallen etc. Ein wichtiger Schritt zur Effizienzsteigerung ist die Nutzung von Energiespeicheranlagen - sowohl im industriellen Maßstab wie zum Beispiel bei Stahlwerken, Gas- und Dampfkraftanlagen oder Produktionsfabriken, als auch im kleinen Maßstab wie zum Beispiel bei thermischen Speichern (Boiler) oder Batterien auf Haushaltsebene.

Ausgangspunkt einer effizienzsteigernden Maßnahme im Rahmen des Einbringens eines Energiespeichers ist die Überlegung welche Art von Energie vorliegt und ob sie vor Ort erzeugt werden kann oder weitertransportiert werden muss. Beispielsweise wird im Vereinigten Königreich bis zu 2.5% der gesamten Elektroenergie mittels Luftkompression gespeichert. „Compressed air energy storage“ (CAES) - Systeme können sowohl in kleineren Betrieben (verbunden mit vergleichsweise hohen Kosten für die Luftdruckspeicherbehälter), als auch für große Gaskraftwerke in denen die Luft in alten Kavernen gespeichert wird, genutzt werden. CAES-Systeme zeichnen sich durch einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad von 42-54% aus (Letcher, 2016).

„Pumped hydroelectric storage“ (PHES) sind die am meisten verbreiteten Speicherkraftwerke. Sie spielen eine sehr wichtige Rolle am Regelleistungsmarkt zum Ausgleich von Ungleichgewichten zwischen Leistungsangebot und Nachfrage.

Pumpspeicherkraftwerke stellen über 95% der globalen Speicherkapazität. Sie zeichnen sich durch einen sehr hohen Wirkungsgrad (>85%) und eine sehr rasche Reaktionszeit (<5min) aus, abhängig von Konzept und Baugröße. Grob lässt sich die von PHES gespeicherte Energie mit der Formel $E = V * P$ berechnen, wobei V für das Wasservolumen (m³) und P für den statischen Druck ($P = \rho * g * h$ [N/m²]) steht. Da die Dichte (ρ) und die Erdbeschleunigung (g) als Konstanten angenommen werden können, bleiben als Möglichkeiten die eingespeicherte Energiemenge zu vergrößern nur die Erhöhung des Wasservolumens oder der Fallhöhe (h). Der große Nachteil von PHES ist, dass die Anzahl an geeigneten geografischen Plätzen zur Errichtung von Pumpspeicherkraftwerken sehr beschränkt ist. Zusätzlich erschweren strenge Umweltauflagen die Planung und Errichtung von neuen PHES.

Ähnlich den PHES Systemen sind die s.g. „Advanced Rail Energy Storage“ (ARES)-Anlagen, die ebenso wie Pumpspeicherkraftwerke kinetische in potentielle Energie umwandeln. Der Unterschied ist das Speichermedium: Anstelle von Wasser werden großen Massen (Betonpanelen oder Erde) auf einer Eisenbahn auf einen Berg transportiert. Die Bewegungsenergie wird dabei von einem Elektromotor/Synchron-Generator bereitgestellt. Die ARES Anlagen haben einen hohen Wirkungsgrad von 78-80% und keine Energieverluste in der Standby-Phase. Ein weiterer Vorteil sind die niedrigen Produktionskosten von $\approx 1200\$/KW$ im Vergleich zu den Kosten von PHES Anlagen in der Höhe von 2500-4000 $\$/KW$ (Letcher, 2016).

Eine weitere Möglichkeit kinetische Energie zu speichern sind Schwungräder. Bereits seit 6000 v.Chr. in Verwendung (mit nur ein Paar Umdrehungen pro min (rpm)), sind moderne Schwungräder aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK), Magnetlagerung und mit bis zu 50000 Umdrehungen pro Minute, noch heute in der Industrie und im Verkehr im Einsatz. Mit einer sehr hohen Lebensdauer (bis $1.7 * 10^{11}$ Umdrehungen) und einer niedrigen Reaktionszeit (innerhalb von ein paar Sekunden) stehen die Schwungradenergiespeicher in Konkurrenz zu den Ultrakondensatoren mit einem ähnlich hohen Energiespeicherpreis von $\$20\ 000\ kWh^{-1}$ (Letcher, 2016).

Thermische Energie Speicher (TES) spielen heutzutage in der Wirtschaft eine wichtige Rolle. Ihre Bedeutung wird durch den immer größer werdenden Anteil an erneuerbaren Energien noch zunehmen. Man unterscheidet Latente (mit

Phasenänderung) und Sensible (ohne Phasenänderung) Thermische Energiespeicher. Abhängig von der Speicherzeit können Überlegungen angestellt werden welcher thermische Energiespeicher gewählt werden soll.

Die gespeicherte Energie eines Sensible Wärmespeichers hängt von der Masse des Mediums (m), spezifische Wärmespeicherkapazität (c_p) und dem Temperaturunterschied (ΔT) ab und kann mit der folgenden Formel beschrieben werden:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} m * c_p * dT$$

Da große Mengen (m) mit großen Baukosten und Platzproblemen verbunden sind, bleibt die spezifische Wärmespeicherkapazität (c_p) als wesentliches Element bei der Auslegung des Speichers. Vorteilhaft bei niedrigeren Temperaturen sind beispielsweise Wasser, Glykol, Paraffin - bei höheren Temperaturen sind Sand, Ziegel und Gips die bessere Wahl.

Im Vergleich dazu können latente Wärmespeichern (Salt NaNO_3 , KNO_3) bei niedrigem Temperaturunterschied (ΔT) mehr Energie aufnehmen. Formal stellt sich dies wie folgt dar:

$$E = \int_{T_1}^{T_{tr}} m * c_{p-fest} * dT + \int_{T_{tr}}^{T_2} m * c_{p-fluid} * dT + m * \Delta H_{ver}$$

ΔH_{ver} -Verdampfungsenthalpie des Mediums;

In der Energiewirtschaft ist das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage ein entscheidender Aspekt. Wird das Netz überlastet kann es zum sogenannten Blackout kommen. Der Energieverbrauch wird bis zum Jahr 2050 stetig um ca. 1.2% p.a. auf rund 4300 TWh steigen (TASK, 2013). Dabei erhöht sich der Anteil an erneuerbaren Energien zunehmend. Dies führt zu einem volatileren Verhalten auf der Angebotsseite. Um diese Schwankungen auszugleichen werden effiziente Energiespeichern im Strom- und Wärmenetzwerk benötigt. *Energiespeicher ermöglichen eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch.*

1.1. Motivation.

Diese Diplomarbeit soll die Zusammenhänge und Beziehungen zwischen der Fluidisierungsluft und dem Sand in einem SandTES Wirbelschichtreaktor feststellen. Sie soll auch den weiteren Betreibern der SandTES Wärmespeicheranlage als Nachschlagewerk und Orientierungshilfe bei den zukünftigen Arbeiten und Experimenten dienen.

1.2. Aufbau der Arbeit

- Einführung.
- Beschreibung des Prozessleitsystems.
- Durchgeführte Experimente, erste Messergebnisse.
- Optimierungsvorschläge.
- Schlusswort

In den folgenden Kapiteln werden sowohl die technischen Prozesse beim Betrieb der Anlage (Porosität, Rückstau, Sandmassenstrom etc.) als auch die Prozesse für die Inbetriebnahme der Anlage (Implementierung von Drucksensoren, Regler und Alarmen) beschrieben. Zum Schluss werden einige Verbesserungsvorschläge zur Lösung von Problemen, die bei der Arbeit an der Anlage auftauchen können, vorgestellt.

1.3. Beschreibung der Anlage.

Die SandTES Anlage besteht hauptsächlich aus fünf Bestandteilen. Der Sandkreislauf hat zwei Silos zur Lagerung des warmen/kalten Sandes, zwei Förderschnecken und ein Becherwerk. Die Thermoölanlage dient zum Heizen und Kühlen der gesamten Anlage und ist mit dem Regenerator, Lessy, LaTES, und dem SandTES Wärmetauscher (WT) verbunden. Die Fluidisierungsluft wird von einem Gebläse verdichtet und läuft durch die Rekuperatoren zu dem WT. Die Saugzug-Filter Anlage hat die Aufgabe die Abluft abzusaugen und zu filtern bevor sie an die Umgebung freigelassen wird. Die Rekuperatoren befinden sich neben

dem Gebläse Container und dienen dazu die Abluft vorzuwärmen bzw. abzukühlen.

1.3.1. Funktionsprinzip.

Die Sand-Wärmespeicher Anlage kann in drei Strömungskreise aufgeteilt werden: Fluidisierungsluft, Terminölkreislauf und Sandkreislauf. Diese funktionieren nach dem folgenden Prinzip:

- Fluidisierungsluft

In der Planungsphase waren für die Fluidisierungsluft 2 Gebläse geplant. Aus finanziellen Gründen ist nur eines eingebaut worden. Die angesaugte Umgebungsluft wird in einem Bereich von 50 bis zu 500mbar verdichtet und auf zwei Rohleitungen verteilt. Die gleichmäßige Verteilung erfolgt anhand von 2 Scheiben mit 20 mm Bohrungen. Nachgeschaltet sind zwei Windkessel, die als Puffer dienen. Weiters gibt es zwei mögliche Luftströmungswege: durch die Rekuperatoren (um im heißen Betrieb die Luft vorzuwärmen) oder über den Bypass-Weg - um nur einen niedrigen Druckverlust zu haben. Je nach dem kommt die Luft an die Windboxen, wo zur gleichmäßigen Verteilung des Drucks entlang des Wärmetauschers 52 Düsen vor den Düsenboxen verbaut sind. Dort wird die Luft in den Wärmetauscherboden eingeleitet um den Sand zu fluidisieren. Weiter wird die Luft in die Abluftrohrleitungen geführt. Optimalerweise herrscht dort ein leichter Unterdruck. Diese Aufgabe übernimmt der Saugzug mit einem maximalen Luftvolumenstrom von 3000 m³/h. Da die maximal erlaubte Eintrittstemperatur 80°C beträgt, muss die Abluft unbedingt durch die Rekuperatoren fließen um dort abgekühlt zu werden. Das hat den Nachteil, dass sich dort Sand ablagern könnte und es regelmäßig entleert werden muss.

- Sandmassenstrom Kreislauf

Der Sand wird von dem Silo durch einen Schneckenförderer in den Wärmetauscher (WT) gefördert. Dort wird er durch ein Luftgebläse im Boden fluidisiert, wobei jedes Segment (4 bei SandTES, es könnten aber theoretisch auch mehr sein) das neue Sand-Luft Fluid durch ein Gefälle neben dem Rohrbündel weitertransportiert. Die Konsistenz kann anhand von 4 elektronisch

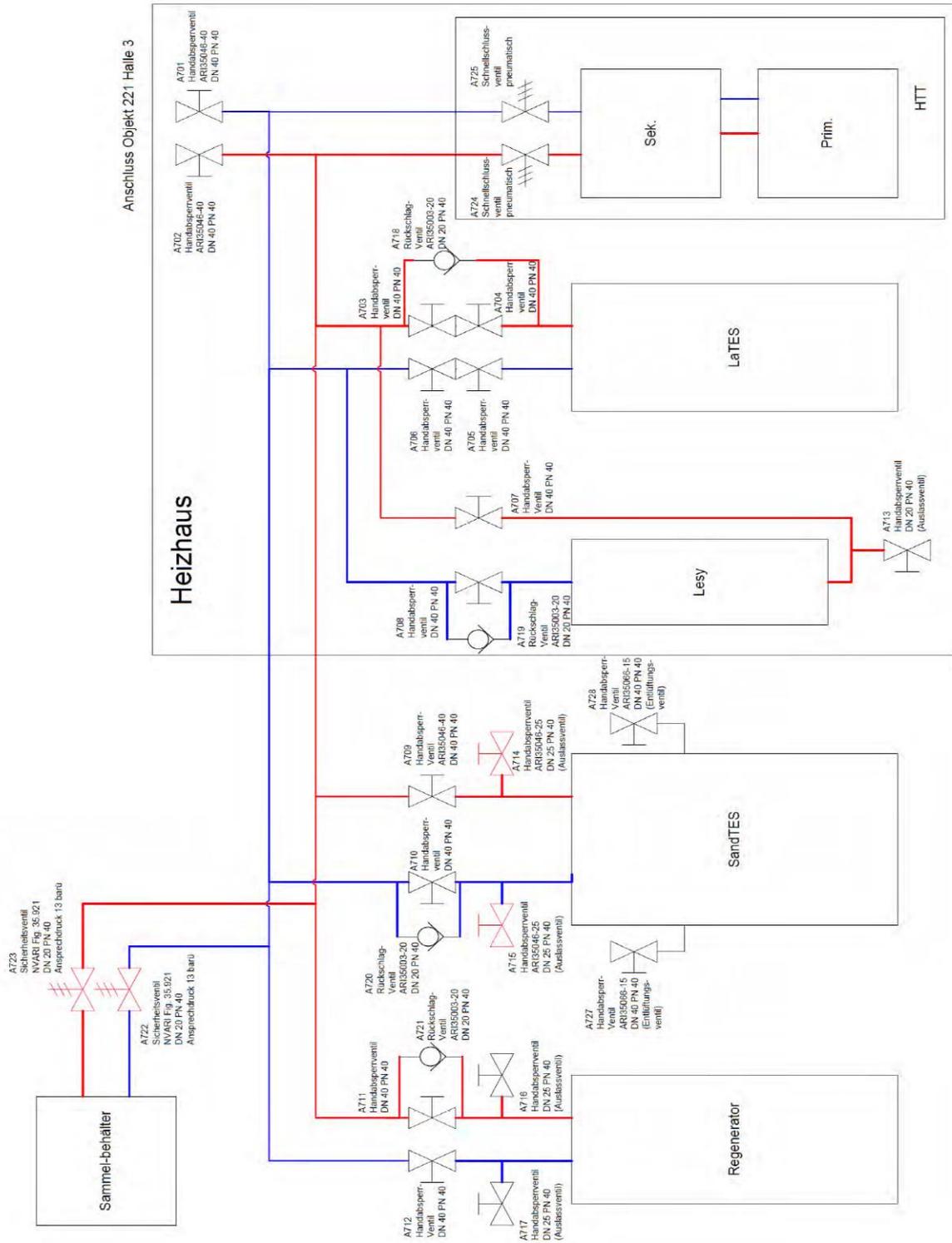
gesteuerten Luft-Ventilen geregelt werden. Am Austritt des WT fließt der Sand durch die Schieber in das Becherwerk, wo er an der Verteilerweiche in die Höhe gebracht und in das andere Silo abgelagert wird.

- Thermoölkreislauf

Das für das Heizen und Kühlen verwendete Medium des WT wird von einer vom Hersteller HTT Thermoölanlage gefördert. Die Ausführung erfolgte nach DIN 4754 und besteht aus einem Primär- und einem Sekundärkreislauf. Die Förderung erfolgt mit zwei Umwälzpumpen, eine im Primärkreislauf mit einer Motorleistung von 4 kW und einer Fördermenge von 20 m³/h. Die Sekundärkreis Pumpe hat eine Motorleistung von 5,5 kW, die Fördermenge beträgt 2-6 m³/h und die Förderhöhe von 7-55 mFIS.

Der Erhitzer hat eine gesamte Leistung von 280KW und besteht aus 7 Heizstäbe. Die maximale zugelassene Betriebstemperatur ist 390°C.

Das Verwendete Medium ist Terminol[®] VP1, das eine sehr hohe Schmelztemperatur (ca. 12°C) besitzt. Darum ist eine Begleitheizung für die außenstehende Rohleitung installiert worden. In folgender Abb. 1 ist das Arbeitsprinzip zu sehen:



1 Abb. Thermoölkreislauf

Der Primärkreislauf hat eine Leistung von 280 kW_{th} und eine maximale Vorlauftemperatur von 390 °C. Dieser versorgt sowohl die SandTES Anlage als auch die Lesy und LaTES.

Der Sekundärkreislauf hat 205 kW_{th} Leistung und dient zur Kühlung der Anlage. Das verwendete Kühlmedium ist Glycol.

Die Vorteile dieses Prinzips sind:

- Theoretisch unbegrenzt großes Speichermedium.
- Hohe Wärmekapazität des Speichermediums.
- Schneller Wechsel von Lade- zu Entladephase

Die Nachteile:

- Zusätzliche Energieverluste über Gebläse, Saugzug und Becherwerk.
- Höhere Wartungskosten, Baukosten.

1.3.2. Speichermedium.

Das Speichermedium Quarzsand mit Partikelgröße von 80 bis 100 µm gehört zur Geldart-Gruppe A, mit einer hohen Wärmekapazität (fester Sand $0,835 \frac{kJ}{kgK}$). Es kommt in großen Mengen auf die Erde vor und hat einen sehr niedrigen Preis im Vergleich zu anderen Wärmespeichermedien.

Die Nachteile des Quarzsandes sind, dass er sehr abrasiv ist, weshalb alle rotierenden Teile, die mit ihm in Berührung kommen entsprechend geschützt werden sollten. Außerdem werden durch die Schnecke und das Becherwerk Sandpartikel zerstäubt und der noch feinere Staub kann dann leicht durch die Bauteilverbindungen verloren gehen oder die Filter des Saugzuges verstopfen. Alle Bauteile müssen mit staubdichten Verbindungen miteinander verbunden werden, was die Kosten der Anlage erhöht.

Feuchtigkeit ist auch ein großes Problem der SandTES Anlage: tritt Wasser in Form von Kondensat oder Dampf in den Silo oder den WT wird der Sand nass wodurch die Fluidisierung erschwert wird und es zu Verstopfungen in den engen Querflächen (Auslass WT, Einlass Becherwerk) kommen kann. Für die Kälte-Versuche wurde kein Entfeuchter im Gebläse eingerichtet. Dies führt zum Ansaugen von warmer, feuchter Luft am Tag, die in der Nacht, wenn die Temperatur sinkt, an den Wänden der Wärmetauscher kondensieren kann.

2. Prozessleitsystem

Die Hauptprozesse in der Anlage werden mit dem Prozessleitsystem von Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik GesmbH Arol gesteuert und geregelt. Durch den Aufbau gut verfügbarer Systeme mit Standard-Komponenten (Bausteine in Logik miteinander verbunden) werden Kosten reduziert, weil teure Spezialhardware ausgespart werden kann. Der üblicherweise redundante Aufbau der Operator-Stationen lässt sich in APROL mit Standardkomponenten einfach gestalten. Darüber hinaus bietet B&R die Möglichkeit, mit POWERLINK den Feld Bus redundant auszuführen.¹

POWERLINK bietet eine hohe Performance und kompromisslose Echtzeitfähigkeit auf Basis der weltweit etablierten Standard Ethernet Technologie. Mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 100 MBit/s und einer Synchronisationsgenauigkeit von +/- 100ns lassen sich anspruchsvolle Aufgaben die für den Betrieb benötigt werden in einem Netzwerk kombinieren.

B&R bietet verschiedene vorgefertigte Regelungspakete, die sowohl Zeit als auch Kosten sparen. Auch die Produktivität der Maschinen und Anlagen kann so verbessert werden. Alle Pakete stehen als Automation Studio Bibliotheken zur Verfügung und sind besonders einfach anwendbar. Dies erlaubt eine rasche Umsetzung an der Anlage und reduziert die Projektlaufzeit erheblich.

Die Regelungspakete von B&R:

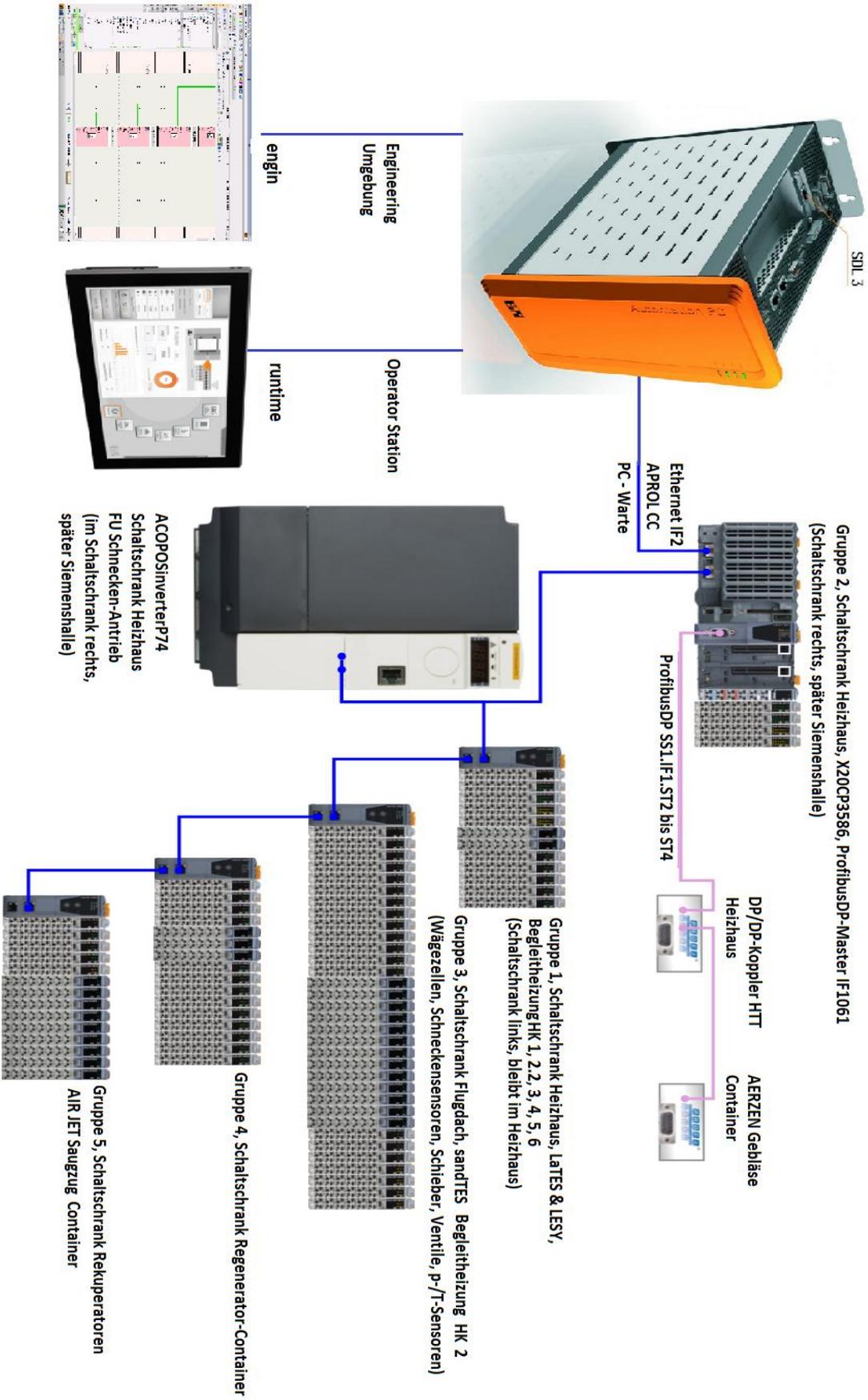
- General purpose
- Temperatur
- Hydraulik
- Servopumpen
- Auf- und Abwickelprozesse
- Registerregelung für Druckmaschinen
- Windkraftanlagen
- Modellprädiktive Verfahren für die Prozessautomation
- Repetitive Control zur Unterdrückung periodischer Störungen in Antriebssystemen
- Kompensation von Motorrastmomenten

¹ <https://www.br-automation.com/de-at/unternehmen/presse/aprol-gewahrleistet-hochverfuegbarkeit-auf-allen-ebenen/>

2.1. Elektroschema, Kommunikation.

Alle Sensoren und Aktoren der SandTES Anlage sind an den Buskoppler angeschlossen und kommunizieren durch Ethernet Kabel in LAN wie im Abb. 2 zu sehen ist. In der Feldebene arbeiten viele Sensoren und Aktoren mit dem 24V 4 bis 20 mA Stromsignal. Für den Betrieb der Ventile und Schiebern wird Energie benötigt, die durch die DO (Digital Output) Karten geliefert wird.

Das Gebläse und die Thermoöl Pumpen werden mit Frequenzumrichter betrieben. Der kommuniziert über den Profi Bus mit dem CPU Controller.



2 Abb. Signalübertragung Schema

2.2. Aprol Engin, Cae Manager.

Die Engin (kommt aus Engineering) ist eine Linux basierte Arbeitsumgebung in der alle virtuelle Verknüpfungen gemacht werden können. Eine Anlage kann eine oder mehrere Controller haben. Idealerweise werden neue Anlagenerweiterungen mithilfe von neuen Controller ausgeführt, damit durch das Kompilieren und Zusammenbauen von neuen Logiken nicht das bereits installierte Programm abstürzt. Eine Querkopplung zwischen den Controllern zu installieren ist auch möglich. Bei der Anlegung der Controller werden die Ethernet Eigenschaften (Subnetmask, IP) eingegeben.²

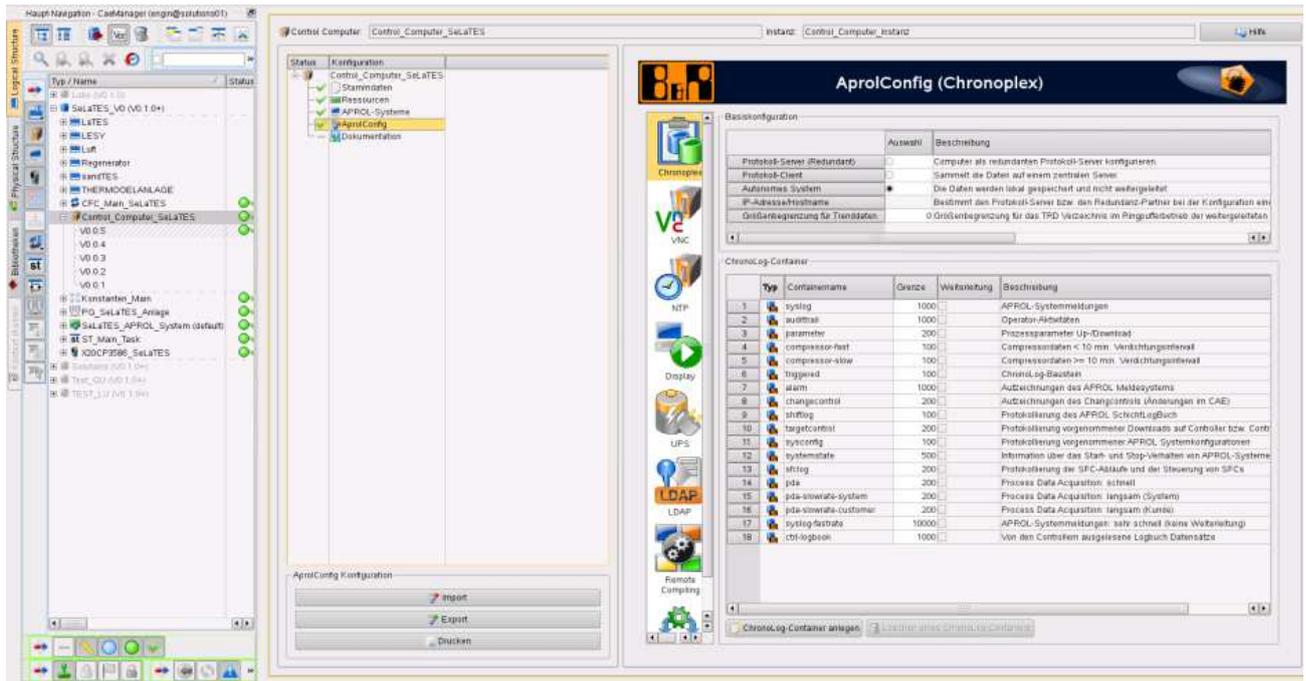
SelaTES Anlage hat einen Controller der in CaeManager angelegt ist. Mit ihm werden alle I/O-Variablen, Konnektoren für jeden separaten Anlagenteil (Lessy, Lates, Wärmetauscher, Regenerator, Luft) in Logical Strukturen aufgebaut.

2.2.1. Control Computer

Der Control Computer liegt im Messcontainer und schafft die Verbindung zwischen dem Benutzer und der graphischen Umgebung. Auf ihm laufen alle Runtime Anwendungen (Display Center, Trendviewer). In Abb. 3 sind die Einstellmöglichkeiten der Controller Computer in CaeManager zu sehen. Unter VNC werden die Eigenschaften für die Fernbedienung-Verbindungen eingestellt. Das erlaubt anderen Nutzern mithilfe von tragbaren Geräten die Anlage zu bedienen und bestimmte Prozesse zu steuern.

In Falle eines Stromausfalls ist eine 24V Not-Aus Stromversorgung zugeschaltet, die die BUS-Konnektoren für kurze Zeit mit Strom versorgen kann. Somit können die elektronisch gesteuerten Luft-Ventile geschlossen bzw. geöffnet werden. Unter UPC werden die Eigenschaften für die Externe Stromversorgung bestimmt.

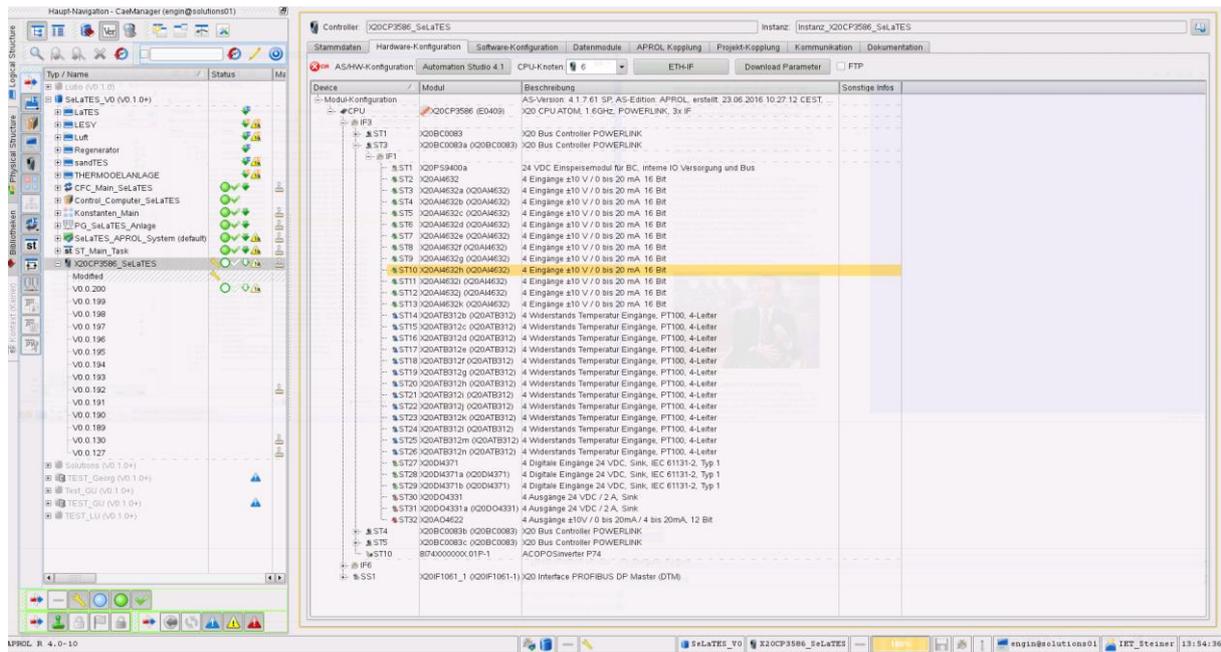
² TM830 APROL Project Engineering, S.39.



3 Abb. Control Computer

2.2.2. CPU Controller

Der CPU Controller liegt im HTT Heizhaus Elektroschrank und macht alle Berechnungen und bearbeitet die Daten die am Server gespeichert werden. Bei ihm kommen alle Kartenkonfigurationen zusammen und die analogen Signale werden digitalisiert. Die maximale Abtastfrequenz wird in der Taskklasse bestimmt. Die Toleranz der Trendviewer kann beim Baustein zusätzlich gewählt werden. Grundsätzlich sind die meisten Prozessvariablen der SandTES Anlage in der Task-Klasse #5 die einer Zykluszeit von 200000 [μ s] entspricht. Nur die Safety Prozessvariablen liegen in der Task-Klasse #3 mit 50000 [μ s] um eine bessere Reaktionszeit zu erreichen.



4 Abb. CPU Controller

Unter der Hardware-Konfiguration (Abb. 4) sind alle Karten aufgelistet, wobei Ifjj (Interface) die Position des BUS-Moduls bezeichnet, STjj bezeichnet die Position der Karte in dem Modul von links nach rechts und X20jjjjjjjj ist die Art der Karte. Jede Karte hat verschiedene Eigenschaften und besondere Anschlussanordnungen. Zu beachten sind die vorgeschriebene Spannung, die maximal zugelassene Leistung und die Frequenz des Ausgangssignals der Karte (Kartendatenbank unter: <https://www.br-automation.com/de-at/produkte/steuerungssysteme/x20-system/>).

2.2.3. SandTES Logik und Visualisierung

Das SandTES Verzeichnis besteht aus vier CFCs (Continuous Function Chart), drei PGs (Process Graphics), einem ST (Structure Text) und einer Konstante. Beschreibung:

- CFC Foerdertechnik – Die Logiken für die Fördertechnik-Steuerung
- CFC Safty – Diverse Sicherungseinrichtungen
- CFC Trenddaten – Alle Konnektoren (z.B. Drucksensoren, Thermometer usw.) müssen mit Trenddatenbausteine verbunden werden damit sie im Trendviewer angezeigt werden können)
- CFC WT – Steuerung des Wärmetauschers

- Konstante SandTES – Konstante Beschreibung (Erdbeschleunigung, Umgebungsdruck, usw.)
- PGFoerdertechnik – Die Prozessgrafik für die Fördertechnik-Steuerung
- PGSandTESUebersicht – Haupt-Prozessgrafik
- PGWaermetaucher – Wärmetauscher-Prozessgrafik
- ST_SandTESMain – im Struckture Text werden alle Variablen umgerechnet

2.3. Arol Runtime

Die Führung und Visualisierung der Anlage erfolgt über die Oberflächen des RUNTIME- und OPERATOR- Systems von APROL. Bei jedem Neustart ist ein Login erforderlich wobei jeder User vorgegebene Rechte für die unten aufgelisteten Applikationen hat.

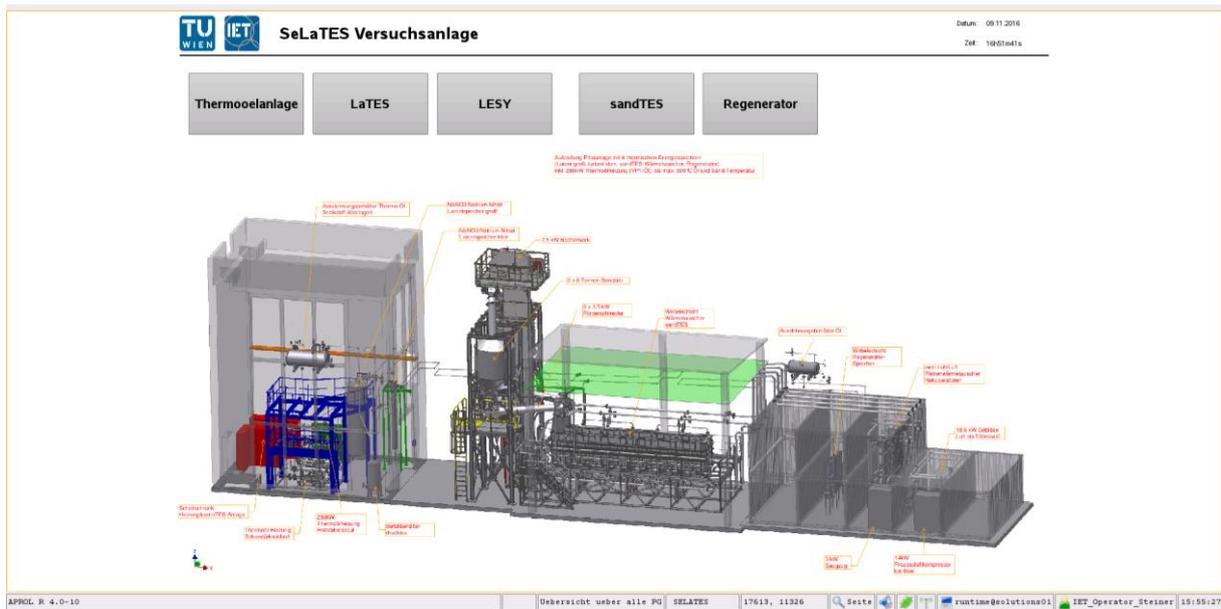
2.3.1. Operator Manager

Der Operator Manager dient der Verwaltung der Operatorgruppen und des Operators an sich. Im Operator Manager definiert man somit die Gruppen (eine Art Profil an Rechten) welche man dann den entsprechenden Operatoren (Bedienpersonal, Studenten, Praktikanten usw.) zuweisen kann³.

2.3.2. SandTES Display Center.

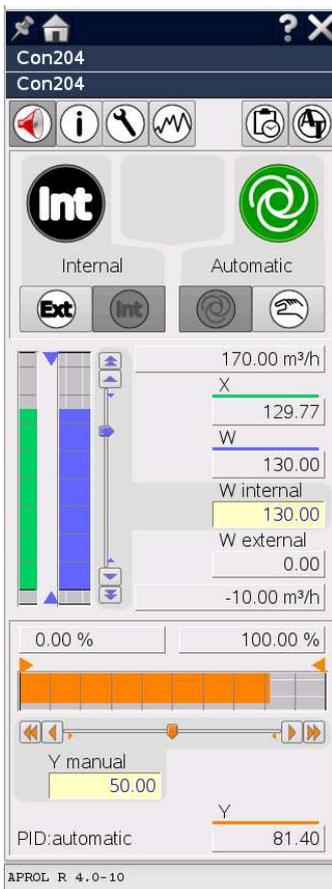
Der Display Center ist ein zentrales Tool zur Führung und Visualisierung der Anlage. Alle technischen Prozesse werden anhand von 5 grafischen Oberflächen bedient. Durch Anklicken wird eine weitere Grafische Oberfläche hergerufen in der die Steuerung und Parametereingabe erfolgt:

³ PDF APROL Operatorverwaltung TM812 2010, S. 7



5 Abb. Display Center

2.3.2.1. SandTES Luftregelung.



6 Abb. PID Regler

Der gesamte Luftvolumenstrom, der zur Fluidisierung des Sandes benötigt wird, wird mit einem 18,5 kW Drehkolbengebläse erzeugt, der auf die beiden Windboxen verteilt wird. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist der maximal erlaubte Druck nach dem Gebläse auf 500 mbar begrenzt (Die Logik des CFC Luft wird in Kap 2.4. erklärt). Die zwei Auslassventile A201 und A101 dienen als Regulator des Luftvolumenstroms wobei durch deren Anordnung ein gewisser Teil der Luft in die Umgebung ausgeblasen wird. Die Einstellung von den Auslassventilen erfolgt mit zwei von B&R vorgefertigten PID Regler. In Abb. 6 ist das Kontrollfenster zu sehen wobei die wichtigsten Parameter die folgenden sind: der Sollwert „W“, der in g/s eingegeben wird, „X“ der Istwert und der orangene Balken, der die Ventilposition anzeigt (genauere Erklärung der Berechnung des Istwerts ist in Kap. 2.2.4 zu sehen). Bei den PID Reglern besonders zu beachten sind die Verstärkung „K“, die Derivative und die

Integration der Zeit. Die Werte können direkt in der Prozessgrafik (Runtime) unter „Cofiguration overview“, „W configuration“, „Parameter configuration“, geändert werden. Die momentane Einstellung ist $K=0.6$, $T_n=1,6$, $T_v=0$, $T_f=0$. Der Verstärkungswert K ist sehr wichtig; wird er sehr hoch gewählt >1 , kommt es zu einer Schwankung um den Sollwert. Wird er zu niedrig gewählt, dann wird die Regelung zu langsam bzw. nach einer Änderung der Luftvolumenstrom wird der Istwert zu lange brauchen um den Sollwert zu erreichen. Vor jedem Versuch sollte die Überlegung gemacht werden, ob durch die Messphase Änderungen des Sollwerts erfolgen bzw. ob der stationäre Verlauf oder die Geschwindigkeit der Regler sinnvoll gewählt sind.

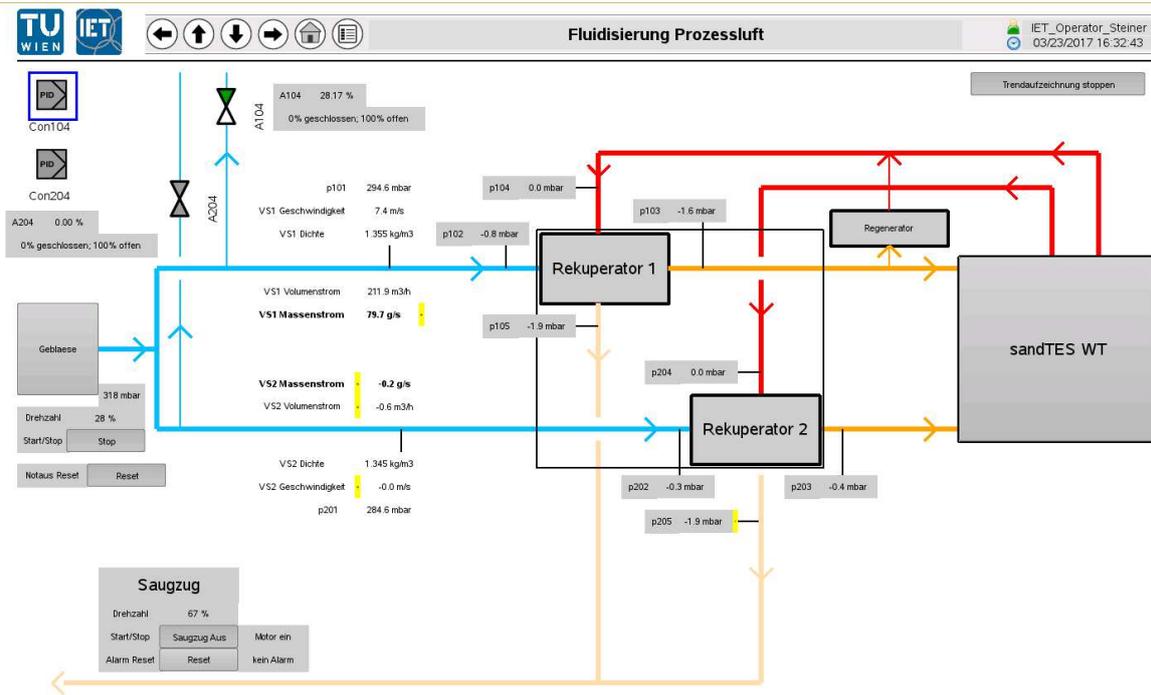
In Abb. 7 bezeichnen con204 und Con104 die Controll-Fenster von den Auslassventilen (bei anklicken wird das Fenster von Abb. 6 hergerufen), X ist der Ist Wert, W ist der Soll-Wert und Y ist der manuell einstellbare Wert: mit 0 ist es komplett zu und 100 komplett offen. Normalerweise wird keine manuelle Eingabe des Ventils vorgegeben, sondern der automatische Betrieb. Damit kann der erwünschten Wert von dem PID Regler bestimmt werden, und an das Ventil weitergegeben.

Der Saugzug AirJET DF4 II von Air-Fresh-Service kann bei verschiedenen Drehzahlen betrieben werden, angegeben vom Frequenzumrichter. Dieser kommuniziert mit dem Controll Computer über den Profi Bus mit einer Regelmöglichkeit von 0 bis 100% wobei 100 die maximale Leistung des Motors in der Höhe von 3kW bedeutet. Dies entspricht eine Luftmenge von 3000 m³/h.

Der Saugzug dient dazu, die Luft in die Abluftrohrleitungen zu saugen damit kein Überdruck im Becherwerk und in den Rekuperatoren aufkommen kann. Die Vermutung, dass große Mengen von Sand in dem Filterbehälter durch die hohe Drehzahl des Saugzuges verursacht war, war falsch. Der mitgerissene Sand in den Abluftrohrleitungen und Rekuperatoren hängt von der Luftkisten- Ventil-Einstellung und dem Fluidisierungsgrad bzw. dem Sandbettniveau ab. Am gefährlichsten sind die engen Querschnitte unter den Luftkistenventilen; dort ist Luftgeschwindigkeit sehr hoch. Der Saugzug darf auch nicht auf sehr niedrigen Drehzahlen betrieben werden da sich sonst ein Überdruck im Becherwerk aufbauen und es zu einem Schaden kommen könnte. Die optimale Einstellung des Saugzuges p503 soll idealerweise zwischen -1 und 1 mbar betragen.

Das Gebläse kann zwischen 0 bis 100% vom Betreiber eingestellt werden. Dies entspricht 20 bis 50 Hz für den Frequenzumrichter. Der maximale Ansaugvolumenstrom beträgt 672 m³/h, der Massenstrom 810 kg/h. Der Eintrittsdruck beträgt $p_1=1,013$ bar, der Austrittsdruck $p_2=1,513$ bar, wodurch sich eine Druckdifferenz Δp von 500 mbar ergibt. Der eingebaute Elektromotor besitzt eine Leistung von 18,5 kW bei einer Drehzahl von 2950 min⁻¹. Eine genauere Regelung des Luftvolumenstromes erfolgt über die Auslassventile A104 A204. Grundsätzlich reichen mit komplett geschlossenen Auslassventilen 50% Leistung des Gebläses um den maximale Luftmassenstrom zu erzeugen. Es ist zu beachten, dass durch das Schließen der Luftkissenventile weniger Sand gefördert wird, wodurch ein zusätzlicher Druckverlust verursacht wird. Somit kann das 500mbar Drucklimit überschritten werden. Darum ist es sinnvoll die Leistung des Gebläses immer mit einem kleinen Puffer zu wählen.

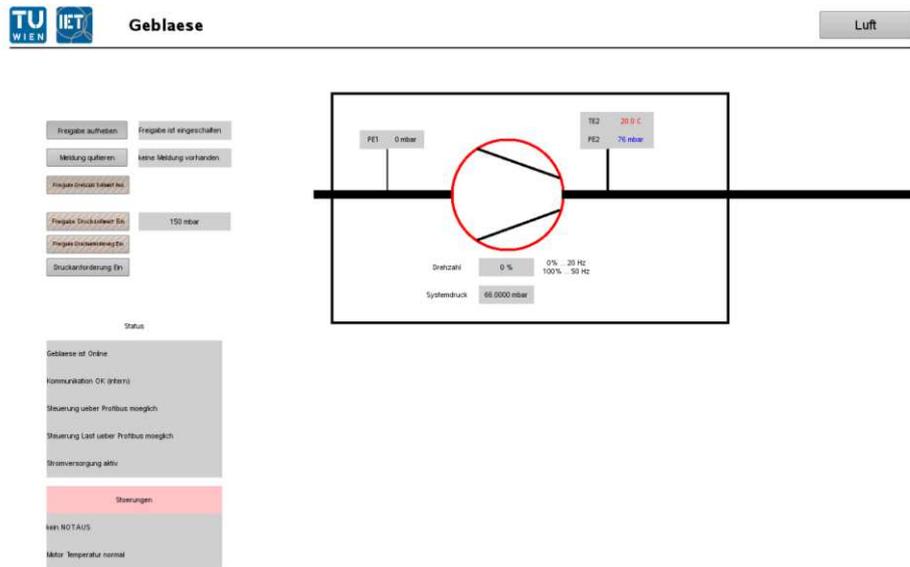
Abb. 7 zeigt die grafische Oberfläche der Fluidisierungsluft mit den wichtigsten Parametern und Variablen direkt übertragen.



7 Abb. Graphische Oberfläche – Luft

Durch Anklicken des Geblaese Buttons wird die folgende Graphische Oberfläche (Abb. 8) hergerufen. Hier können sowohl die Temperatur als auch der Druck der Luft nach dem Gebläse beobachtet werden. Zusätzlich werden

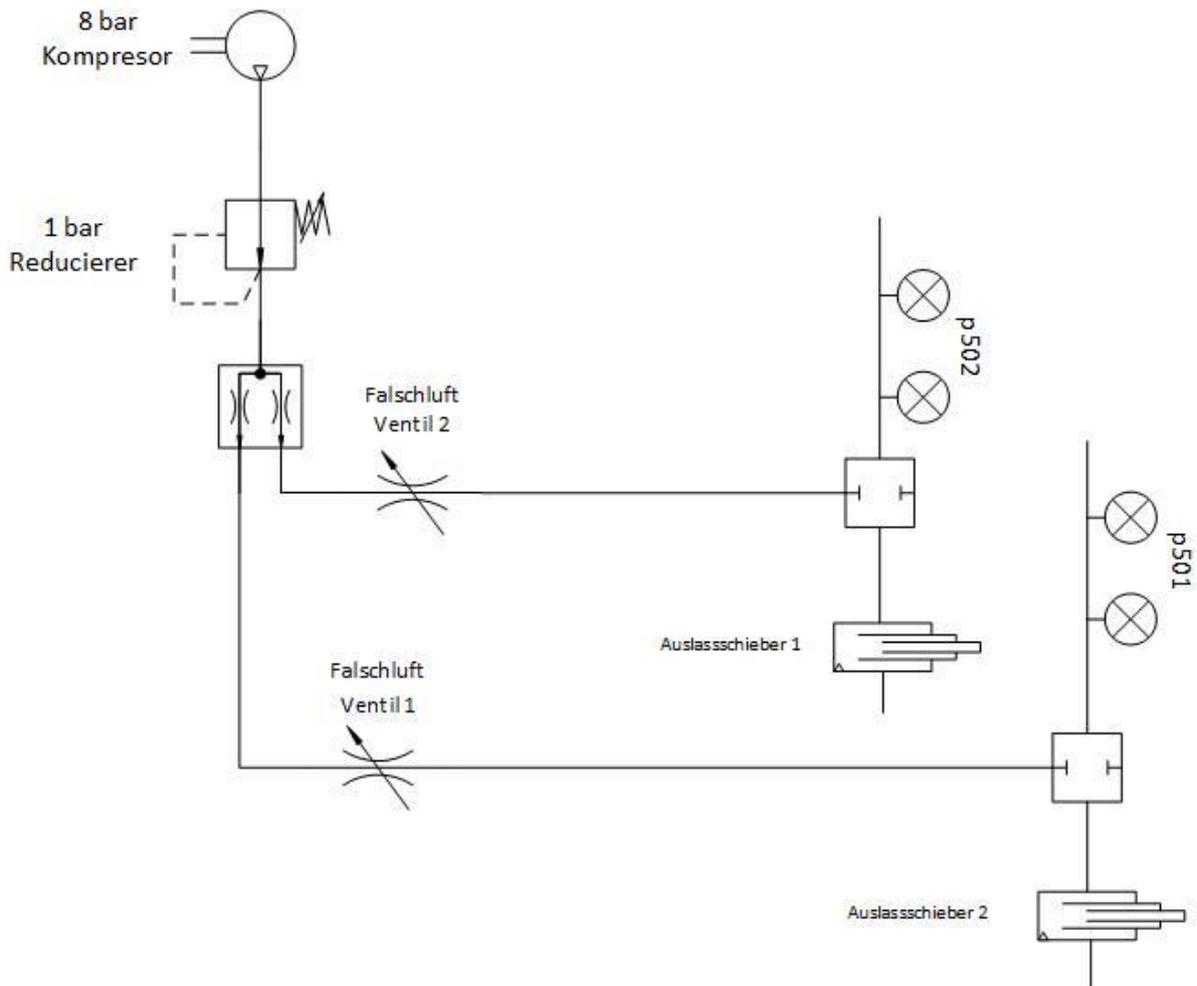
auch verschiedene Meldungen wie Fehlermeldungen, Motordrehzahl und Störungen angezeigt.



8 Abb. Gebläse Information

2.3.2.2. Falschlufteinblasen

Die verwendeten Schieber beim Ein- bzw. Auslass des Wärmetauschers sind in geschlossenem Zustand nicht absolut luftdicht. Um die gemessenen Druckverluste im letzten Segment nicht zu verfälschen, muss eine Lösung mithilfe einer Luftdruckkompensation eingesetzt werden.



9 Abb. Falschlufft Schema

Die Drucksensoren p501 und p 502 messen den relativen Druck zwischen zwei ca. 10 cm voneinander nebeneinander stehenden Messstellen. Wenn das Auslassrohr leer ist wird dort fast kein Druckunterschied mehr gemessen. Beim Fördern jedoch, kann aufgrund des aufgebauten Sandturms ein Luftmassenstrom durch den Schieber austreten. Anhand der 2 elektrisch geregelten Ventile kann man den Druckverlust dort kompensieren.

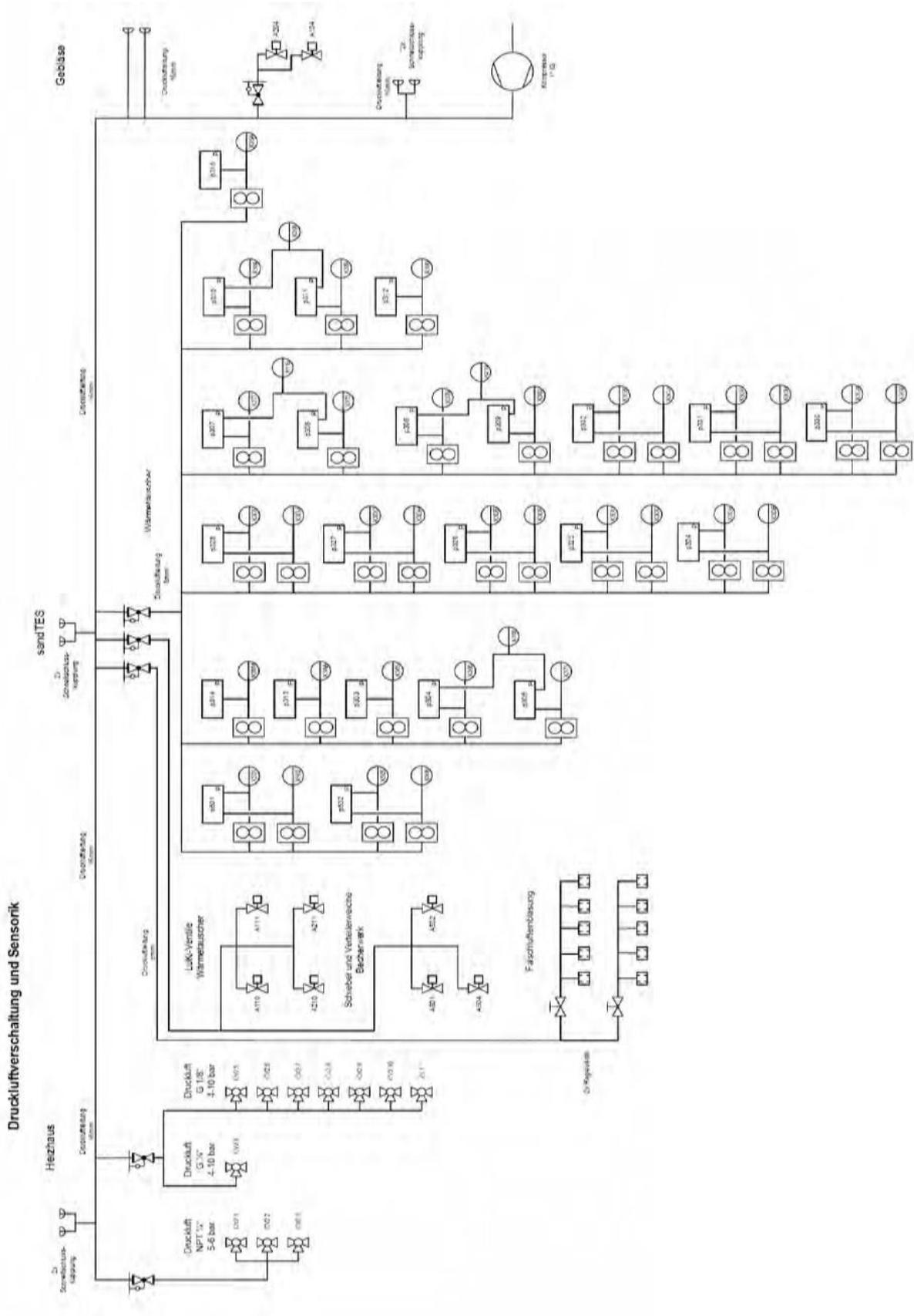
Momentan sind die Ventile noch nicht vom Aproz Controller regelbar da die maximale Ausgangsleistung der DO Karte nur 19W beträgt und das Ventil 21W Leistung benötigt. Eine äußere Stromversorgung ist nicht möglich da die Regelung auf der Pulsweitenmodulation basiert. Die Falschlufftkompensation verläuft zurzeit mit 2 in Serie geschalteten mechanisch gesteuerten luftreduzierenden Ventilen.

2.3.2.3. SandTES Wärmetauscher-Regelung

Der Wärmetauscher ist auf vier Segmente aufgeteilt. Entlang der drei Blechplatten kann der Sand nur nach unten fließen. Dies ermöglicht aber den Einsatz unter unterschiedlichen Druckniveaus bzw. unterschiedlichen Fluidisierungsgraden.

Die Drucksensoren p303 bis p312 messen an den x365 - x390 Stellen, ca. 109 cm über dem Wärmetauscherunterboden (Messtellenplan ist im Anhang vorhanden, vor dem Ausbau von dem Kälteversuche Segment). Wobei die Messstellen 303 und 312 den Absolutdruck und restliche Drucksensoren (p304 bis p311) den Relativdruck zwischen eine Stelle auf der Oberkante des Sandbettes und unten der Luftkistenventile messen; damit kann unabhängig vom Luftvolumenstrom in jedem Segment der Druckabfall gemessen werden. Die Betthöhe wird mit einer "Umrechnung" des Druck in Zentimeter geschätzt, wobei 1 mbar in guter Näherung 1 cm entspricht.

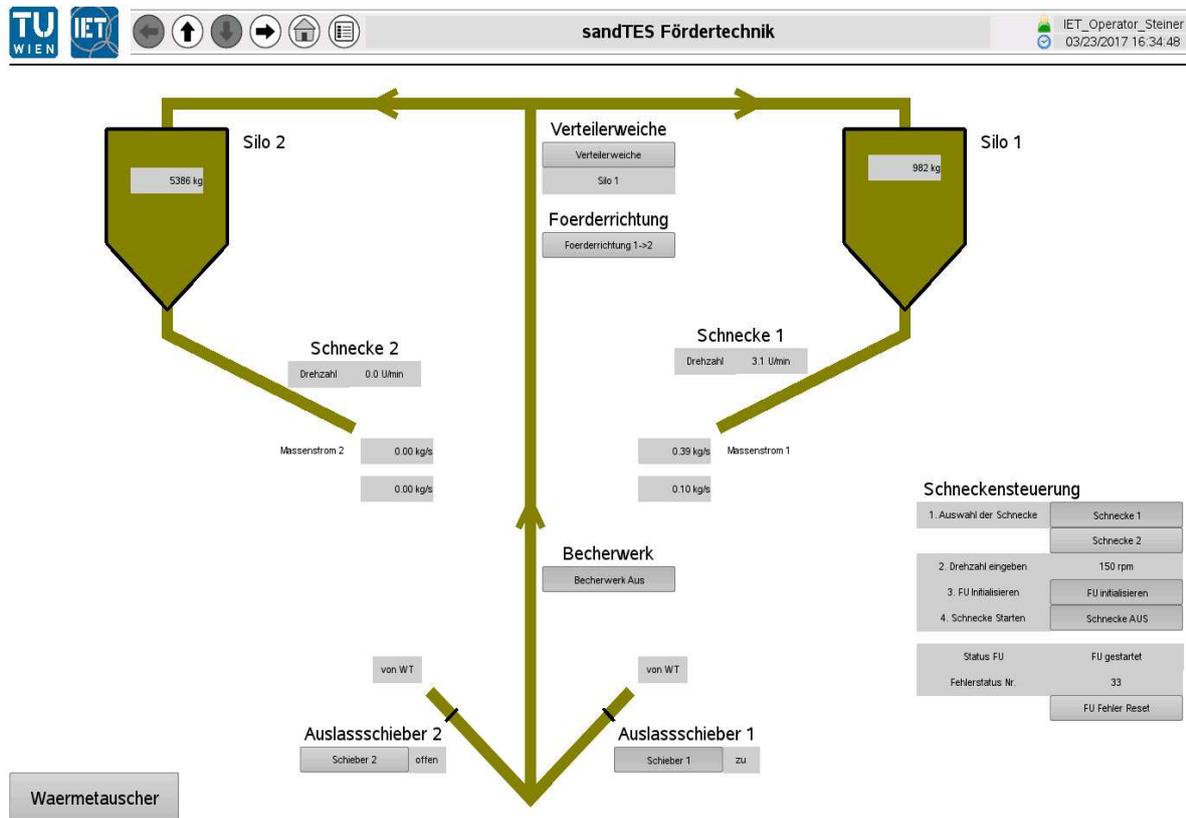
Die Sandbett-Niveau wird anhand von 4 elektrisch geregelten Luft Ventile (Luki 1-4) gesteuert, die durch eine Erhöhung oder Senkung des Luftvolumenstroms den Fluidisierungsgrad ändern. Die Luki Ventile dürfen nicht mehr als 50% geöffnet werden um eine Förderung von Sand in das Abluftsystem zu vermeiden. Die Regelung erfolgt folgendermaßen: Nach der Luftvolumenstrom-Einstellung wird das Bett fluidisiert, danach kann die Förderung des Sandes beginnen. Um das Sandbett zu senken müssen die Lukis im entsprechende Segment stufenweise eingestellt werden (Ventil A110 Drucksensoren p311/p310; A111-p309/p308; A211-p307/p306; A210-p305/p304). Wobei nach jeder neuen Werteingabe der Drucksensor beobachtet wird. Steigt z.B. der gezeigte Wert über 23mbar muss das Luki um 2% zugemacht werden, nach 10-15s wird der Wert wieder überprüft und weitere Einstellungen (+/- 2-5%) können gemacht werden. Es ist zu beachten dass die Segmente des WTs kommunizierende Gefäße sind und eine Änderung eines LuKi Ventils zu einer Änderung des Druckes im Becherwerk und anderen Segmenten führt. Werden die Lukis komplett geschlossen, wird bei großen Luftvolumenströme der Druck im Becherwerk steigen (Drucksensor p305 Direkt über dem Becherwerkeinlass). Dies kann zu einer Förderung von Sand in das Abluftsystem oder zu einem Schaden des Gehäuses führen.



10 Abb. Drucksensoren/Spülluft Schema

2.3.2.4. Fördertechnik – Sandeinführung

Mit der graphischen Oberfläche der Fördertechnik werden die Schnecken, das Becherwerk und die Verteilerweiche betätigt und gesteuert. In Abb. 11 ist die Prozessgrafik zu sehen:



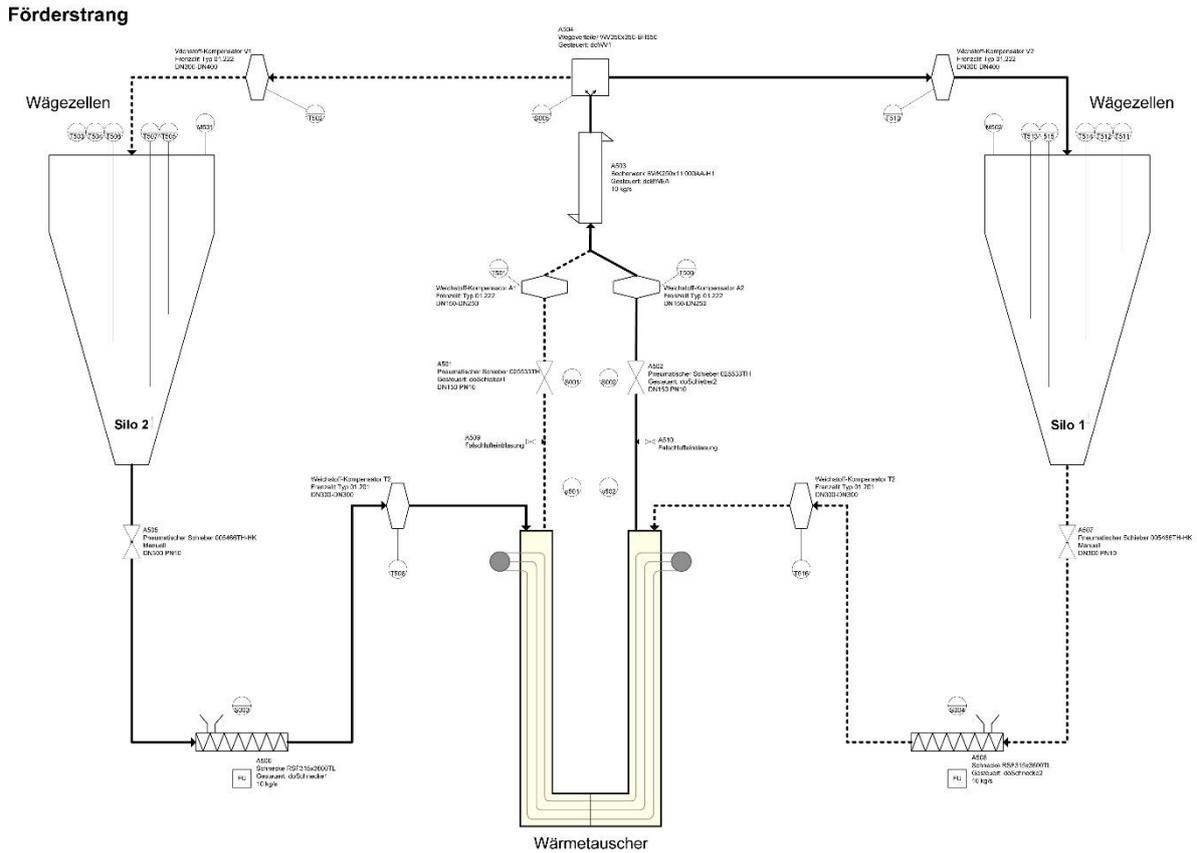
11 Abb. Graphische Oberfläche Fördertechnik

Das Fördern des Sandes erfolgt folgendermaßen: Zuerst muss die Fluidisierung des Bettes betätigt werden. Die Drucksensoren p304-p311 sollen positiv sein. Im Falle von zu wenig Sand im Wärmetauscher oder bei einem zu niedrigen Fluidisierungsgrad, können sie aber auch einen leichten Unterdruck anzeigen. Normalerweise ist bei p314 und p313 im Trendviewer zu beobachten, dass beim Hochfahren der Druck dort steigt, bis das Bett fluidisiert ist. Dann kommt es zu einem Knick in der Grafik (Trendviewer), nachdem der Druck dort konstant bleibt, unabhängig von einer Erhöhung des Luftmassenstromes. Wichtig ist, dass kein Sand gefördert wird, wenn am Eintritt des WT zu viel Sand liegt, p313 und p314 sind immer zu beobachten, die sollen im stationären Betrieb ca.140mbar zeigen (vor dem Ausbau der Kälteversuche-Segmenten).

Weiters soll das Becherwerk eingeschaltet werden. Bei diesem ist kein Zustandsanzeiger eingerichtet da es ohnehin ziemlich laut im Betrieb ist. Der Schieber, der bei der Förderseite ist, muss zugeschlossen bleiben, der andere wird geöffnet. Danach soll die gewünschte Schnecke ausgewählt werden (somit schaltet sich der Kühlmotor des Schneckenmotors ein). Der nächste Schritt ist die Auswahl der Umdrehungen pro min, die mit „FU Initialisieren“ des Frequenzumrichters (FU) angegeben werden können. Das Motor-Ein/Ausschalten verläuft mit dem Motor Ein-Button. Falls ein Fehler auftritt - z.B. wenn das Sandbettniveau zu hoch ist oder der Notausbutton gedrückt wurde, muss der „FU Fehler Reset“ gedrückt werden. Die Umrechnung der Motordrehzahl in Wellendrehzahl bzw. Sandmassenstrom werden in Kap. 3.1 beschrieben.

Mit dem Anklicken von dem Schieber 1 bzw. 2 Button werden die Pneumatischen Schieber A505 und A507 geöffnet, damit der Sand in das Becherwerk fließen kann. Daneben ist das Zustandsfenster, das die momentane Position der Schieber anzeigt (Rückmeldung des Signals von den Ventilen, die nicht an den Button in Aprotl angebunden sind).

Das Funktionsprinzip kann in Abb. 12 beobachtet werden:



12 Abb. Schaltplan Fördertechnik

2.4. Implementieren von Sensoren

Die angewandten Drucksensoren (Kapazitive Wandler) DS2 von Firma Kalinsky Sensor Elektronik GmbH haben einen positiven und einen negativen Eingang und messen immer den Relativdruck. Der eingeprägte Druck am positiven Eingang wird von dem Druck des negativen Eingangs (wenn keine Messstelle angeschlossen ist, der Umgebungsdruck) subtrahiert und wandelt die gemessene Größe in ein 4 bis 20 mA Signal um.

Alle Ausgangssignale der Drucksensoren sind mit den Controller Karten im Gruppe 3 Schaltschrank Flug Dach verbunden. Alle Karten kommunizieren mit dem Apröl CPU Controller über den Profi Bus. Das abgelesene Signal muss als eine Variable im CeaManager/CPU definiert werden. Dort werden alle angeschlossenen Karten angezeigt und deren Signale vom Programm erkannt. Vor weiteren Änderungen muss die CPU kompiliert werden. Dabei muss das gesamte Projekt zusammengebaut werden und neu auf das Target

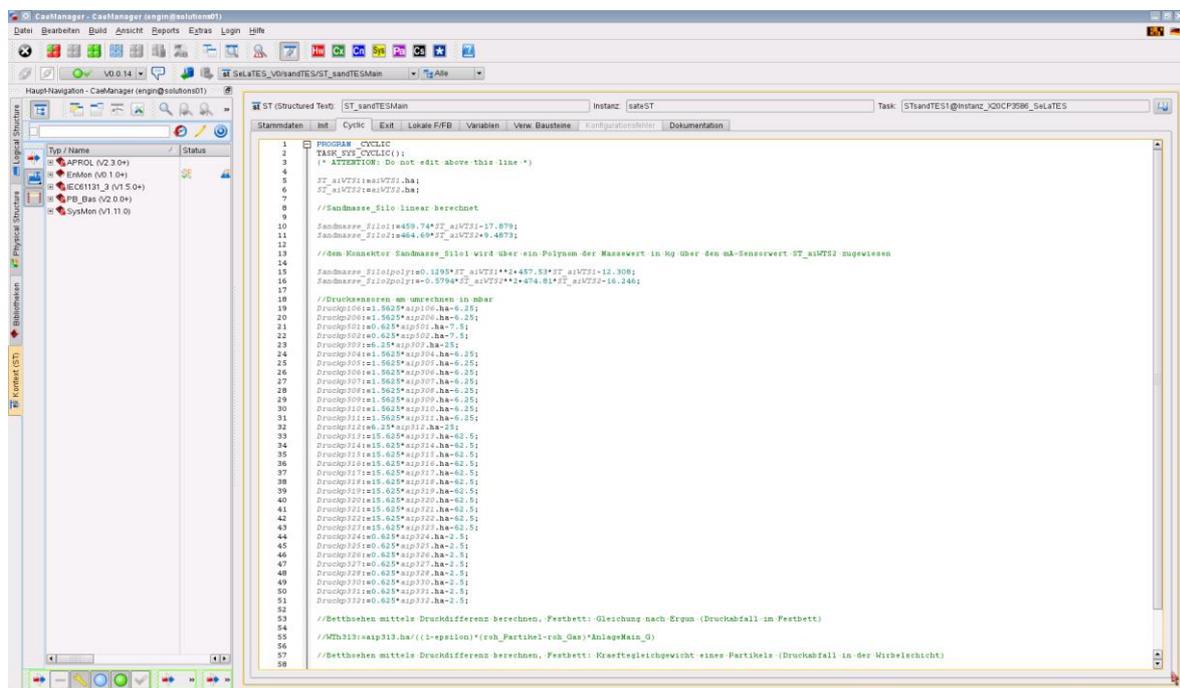
heruntergeladen werden, damit die Variable von dem Control-Computer erkannt wird. Erst dann kann sie mit einem Konnektor verbunden werden.

Instanz	Kanal	Signalart	Sign Bit	I	E	R	Projekt/Variable	MSR-Nr.	IEC-Typ	Ersatzwert	Resultierender Ersatzwert	A	AOS	B	U	S	MBA	MBE	Einheit	Beschreibung
1	ModuleOK	Status							BOOL											???
2	StaleData	Status							BOOL											???
3	SerialNumber	Status							UDINT											???
4	ModuleID	Status							UINT											???
5	HardwareVariant	Status							UINT											???
6	FirmwareVersion	Status							UINT											???
7	ConversionCycle	Status							BOOL											???
8	SyncStatus	Status							BOOL											???
9	Analoginput01	0mA,+20mA	16/16				aip332		REAL	0								0	20	???
10	Channe01 OK	Status							BOOL											???
11	Analoginput02	0mA,+20mA	16/16				aip503		REAL	0								0	20	Druck Abluft Becherwerk
12	Channe02 OK	Status							BOOL											???
13	Analoginput03	0mA,+20mA	16/16				aip35		REAL	0								0	20	???
14	Channe03 OK	Status							BOOL											???
15	Analoginput04	0mA,+20mA	16/16				aip36		REAL	0								0	20	???
16	Channe04 OK	Status							BOOL											???

13 Abb. Controller Karte im "Engine"

Im Abb. 13 ist eine X20AI4632 Karte (Aprl, Engine) zusehen, die 4 REAL Ausgang (DO) Anschlüsse hat. An 2 Anschlüssen sind die Drucksensoren p503 und p332 angeschlossen, wobei aip503 die Variable vom Drucksensor 503 ist.

Jeder Variable muss ein Konnektor zugeordnet werden. Das kann in CaeManager im StructureText erfolgen, z.B. wie folgt:



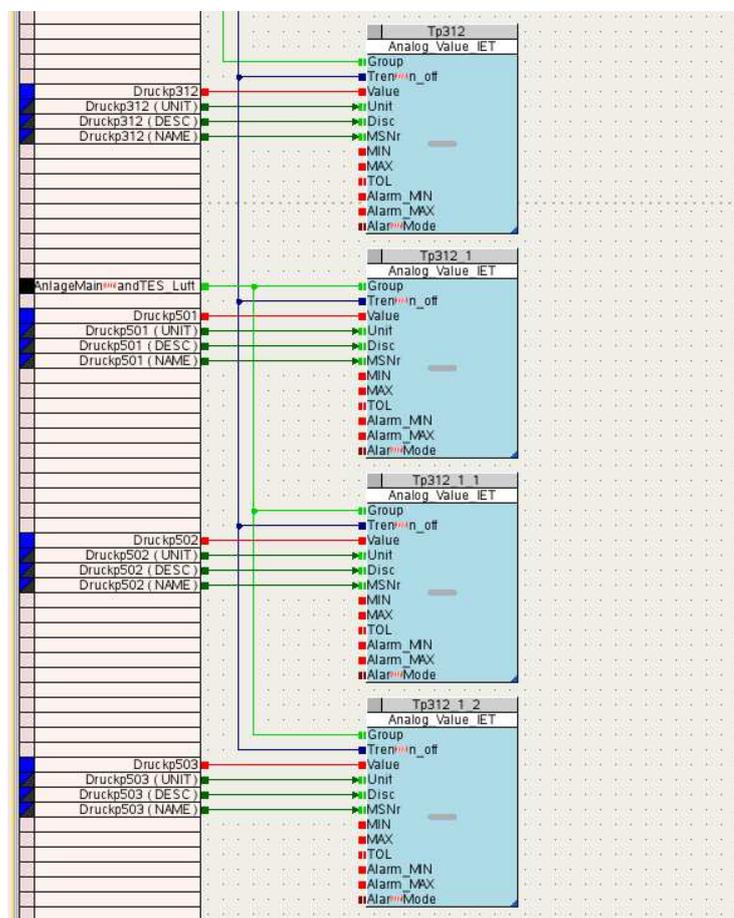
14 Abb. Structure Text Programmieren

$$\text{Druck503}:=1.5625*\text{aip503.ha}-6.25;$$

Der Koeffizient 1.5625 ist die Umrechnung der angelegten Stromstärke (4-20 mA) in mbar, die folgendermaßen berechnet wird: Der Drucksensor misst

zwischen 0-25mbar die auf 16mA aufgeteilt werden müssen, $25/16=1.5625$. Das „ha“ ist dazu da, damit der Text vor „ha“ als Variable bestimmt werden kann. Am Ende muss der Bereich zwischen 0-4mA abgezogen werden: $25\text{mbar}/4\text{mA}=6.25$. Die gleiche Berechnung kann auch in CFC mit logisch verbundenen Bausteine erfolgen.

Das Anlegen von einem Konnektor alleine reicht nicht aus um einen Wert auszulesen. Dieser muss entweder auch in eine Logik verbaut werden oder im Trendviewer aufgezeichnet werden. Alle Drucksensoren, Thermoelemente und aufgezeichnete Daten werden in CFC_Trenddaten folgendermaßen dargestellt:



15 Abb. CFC Trenddaten

Die Gruppenauswahl ist sehr wichtig damit später die gewünschte Variable leicht in Trendviewer zu finden ist. Das „UNIT“ Feld gibt die Einheit an, das spart Zeit, wenn mehrere Bausteine miteinander verbunden werden, weil sonst jeder Baustein mit der dementsprechenden Einheit versehen werden müsste. Das Feld „DESC“ gibt die Beschreibung an, z.B. der Messbereich des

Drucksensors von 0 bis 250 mbar, und „NAME“ zeigt den aufgezeichneten Namen der Variable an.

Eine weitere wichtige Einstellung (der Eigenschaften des dementsprechenden Bausteines) ist die Toleranz des Drucksensors. Diese bestimmt die minimale Änderung des Druckes, die aufgezeichnet werden kann. Man muss immer berücksichtigen, ob die eingegebene Toleranz nicht die Empfindlichkeit des Messensors überschreitet. Eine niedrige Toleranz hat den Vorteil einer größeren Genauigkeit der Messergebnisse, aber auch den Nachteil, dass die übertragenen Daten oft zu viel sind bzw. der Server zu schnell gefüllt wird und die Bearbeitung der Daten schwieriger wird. Es ist immer zu bestimmen welche Messdaten in welchem Bereich sinnvoll sind.

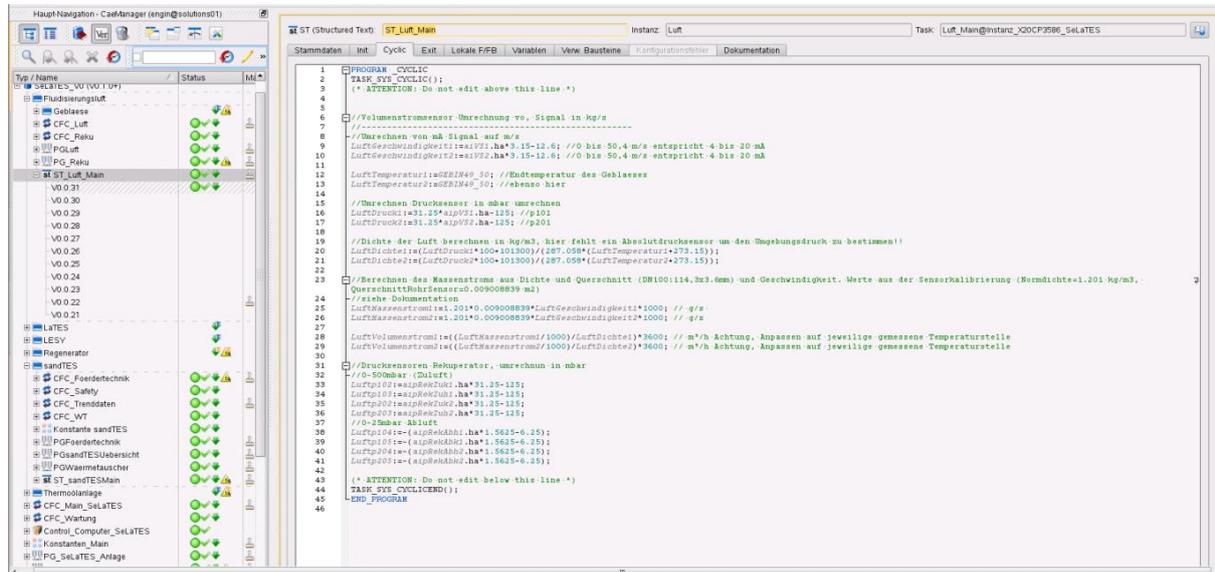
Die verwendeten Thermoelemente Type J: Fe-CuNi von B&R GmbH sind an den X20AT6402 Karten angeschlossen. Das abgelesene Signal wird direkt im April erkannt und muss nicht umgerechnet werden. Nach der Anordnung der Variable (atPT01 z.B.) muss wieder ein Konnektor verbunden. Wenn die Daten im Trendviewer angezeigt werden sollen oder in einer Logik verwendet werden sollen, wird der Konnektor mit dementsprechenden Bausteine verbunden. Der Messbereich liegt zwischen -210 bis 1200°C.

2.5. Berechnung von Messdaten

Wie schon erwähnt müssen die von den Messsensoren abgelesenen Daten (in mA) im Strukturrextext oder durch eine Logik in mbar, °C, kg, usw. umgerechnet werden. Eine wesentliche Größe für die SandTES Anlage ist der Luftvolumenstrom.

An den Messstellen x101 und x201 sind 2 Luftgeschwindigkeits-Umwandler von der Firma Höntzsch GmbH angeschlossen. Sie haben einen Messbereich von 0.2 bis 60 m/s aufgrund einer Sonderausführungsbauforn, die jedoch eine exakte Positionierung benötigt. Das Messgerät soll genau in der Mitte des Rohres, parallel zur Strömungsrichtung sein. Eine kleine Verdrehung verursacht ansonsten einen großen Messfehler. Deswegen ist es sinnvoll eine Kalibrierung zwischen jeder Versuchsgruppe zu machen. Das Messgerät hat eine 24 VDC \pm 5% Stromversorgung und ein 4 bis 20 mA Ausgangssignal. Die

Strömungsgeschwindigkeit der „ST_Luft_Main“ wird folgendermaßen berechnet:



16 Abb. Struckture Text Fluidisierungsluft

Die Formel für den Luftmassenstrom Berechnung ist:

$$\dot{m} = \rho_n * A_R * w_L$$

ρ_n – Luft Normdichte

A_R – Rohr Querschnitt

w_L – Gemessene Luftgeschwindigkeit

Berechnung von Luft Dichte:

$$\rho_{F(T)} = \frac{P_L * 100 + P_U}{R * T_L}$$

P_L –Luft Druck im Rohr in [mbar]

P_U –Umgebungsdruck in [Pas]

R – Allgemeine Gaskonstante Luft in $[\frac{J}{kgK}]$

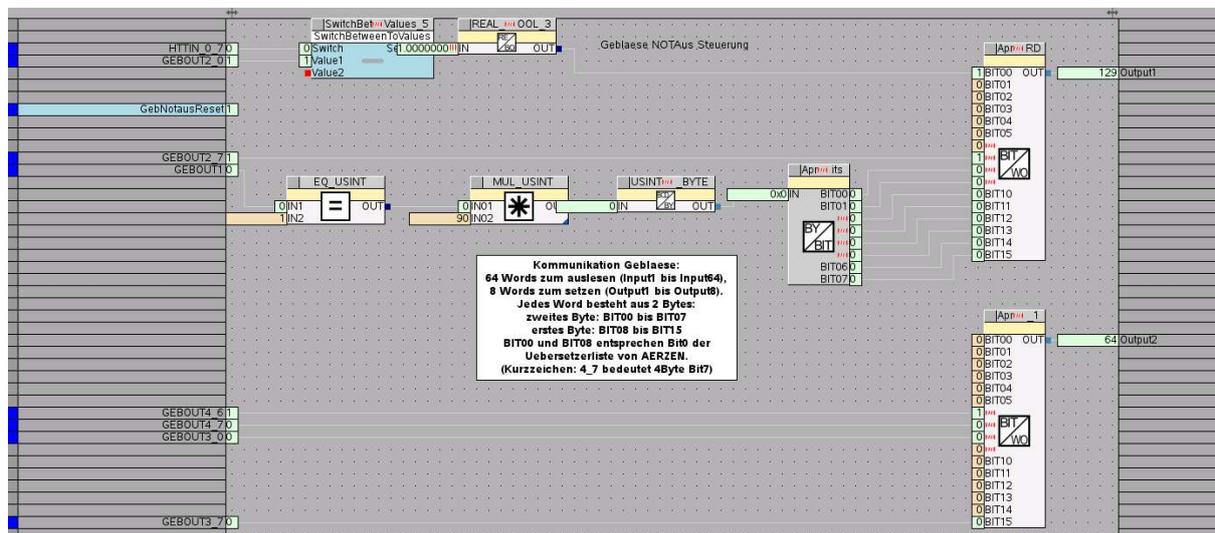
T_L – Temperatur Luft im Rohr in [K]

2.6. Alarme und Sicherheitseinrichtungen.

Die Alarmgenerierung ist ein eigenständiger Programmteil in der Software des Prozessleitsystems. Alarme dienen dazu, den Benutzer auf Störungen, Gefahr oder unerwünschten Zustand aufmerksam zu machen. Alarme teilen sich je nach Wichtigkeitsgrad auf in: quittier-pflichtige Alarme, die eine Bestätigung benötigen und nicht-quittier-pflichtige Alarme, die sich automatisch abschalten, wenn die betroffenen Werte zurück in den Normzustand gehen. Aus aktuellen und historischen Daten werden Kenngrößen abgeleitet und mit Vorgabewerten verglichen. (Müller, 2008)⁴

Die SandTES Anlage darf bestimmte Druckwerte nicht überschreiten. Falls diese doch überschritten werden, soll eine Warnung ausgegeben werden. Fast alle Anlagenprozesse sind mit Not-Aus Knöpfen gesichert, die die Stromversorgung aus dem Schaltschrank-Heizhaus direkt unterbrechen (nach der Betätigung des Not-aus Buttons, muss die Not-Aus Funktion resetet werden).

Das Gebläse ist momentan nicht an die haupt- Not-aus Sicherung des Systems angeschlossen. Das bedeutet, dass bei Betätigung des Not-aus Buttons das Gebläse und der Saugzug weiterarbeiten. Um Schaden und Verletzungen zu vermeiden ist in der CFC Safty eine Logik die in Abb. 17 zu sehen ist installiert.

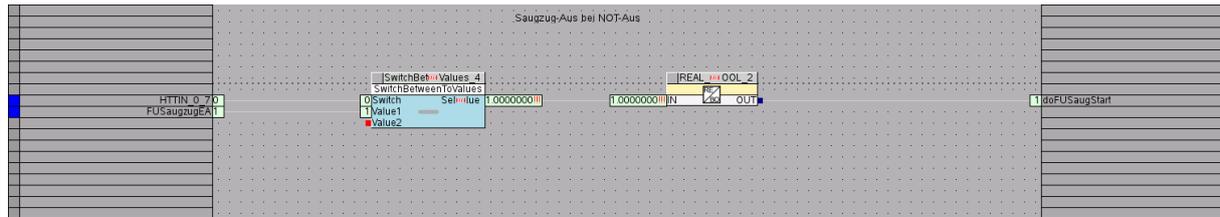


17 Abb. Gebläse Not-aus Logik

⁴ Prozessleittechnik, (Müller, 2008) S.197

Konnektor HTTPIN_07 (BOOL) gibt der Wert 1 wenn den Not-aus Button gedrückt wird, GEBOU2_0 ist der Konnektor der, der Wert 1 gibt wenn das Gebläse-Ein Button angeklickt ist. Switch Baustein gibt der Wert angelegt an Value 1 wenn an dem Eingang ein 0 Signal bekommt, sonst gibt der Wert der an Value 2 Eingang weiter. Weiter ist ein Real to Bool Baustein benötigt.

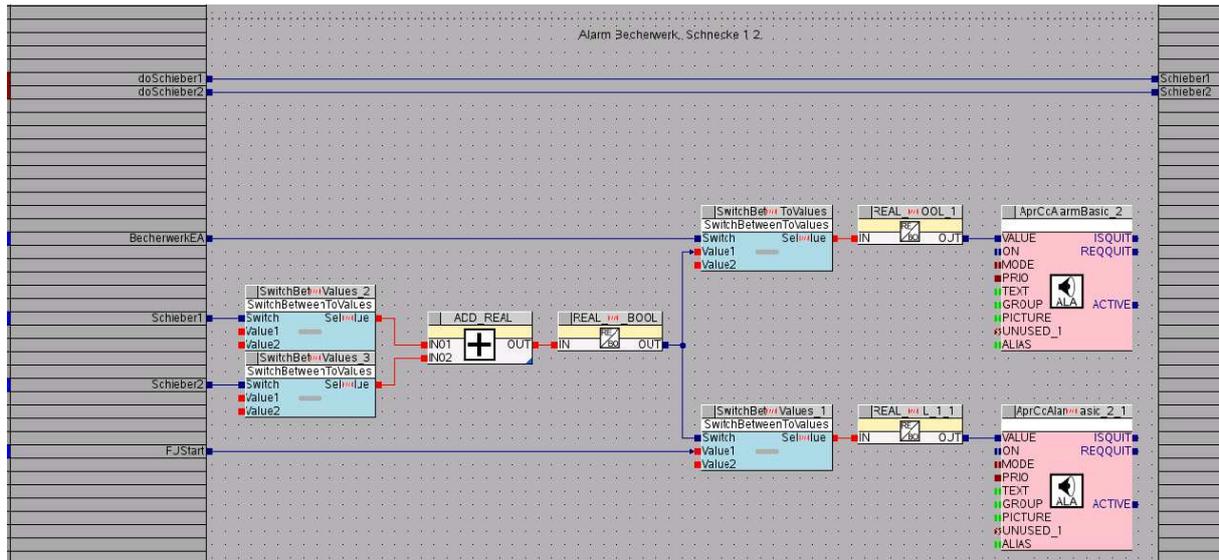
Es ist genau das gleiche Prinzip für den Saugzug angewendet:



18 Abb. Saugzug Not-aus Logik

Das Anbauen von ein Sand-Türm über den Schiebern kann schädlich für das Becherwerk oder die Schnecken sein. Um das zu vermeiden darf der Schieber nie geöffnet werden, wenn ein Sandsturm über ca. 170 cm über den Wärmetauscherboden liegt. Entscheidende Sensoren sind p314 und p313, wenn eine von denen zeigt mehr als 170 mbar wird das „doSchieber“ Signal immer 0 weitergeleitet bzw. die Schiebern werden sich nicht öffnen unabhängig von dem Zustand des Knopfes. Wobei um Sicherheitsgründen bei Stromausfall, 0 immer geschlossen bedeutet. Das ist eine Ventil Eigenschaft die noch bei Hersteller oder bei der Bestellung mitberücksichtigen ist. Falls ein Stromausfall, sollen beide Schieber geschlossen bleiben im Gegenteil von Auslassventile A104 A204.

Eine Einforderung von Sand in den Wärmetauscher ist möglich, damit das gesamt Niveau beim gleichen Fluidisierungsgrad erhöht wird. Sollte aber nur mit Acht gemacht werden, bzw. wird eine Meldung „Schieber offen“ angezeigt.

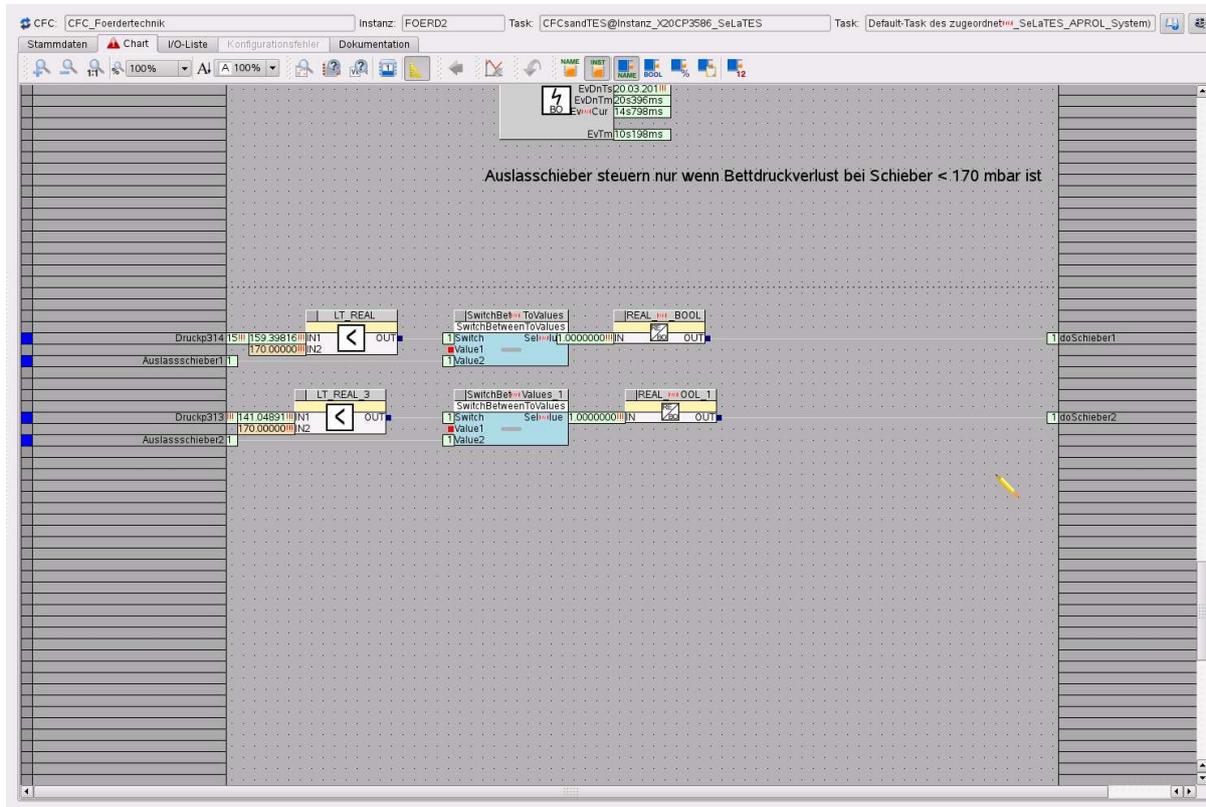


19 Abb. Becherwerk/Schnecken Alarm

In Abb. 19 ist die Logik von Bausteine zu sehen, die nach folgendem Prinzip arbeitet. Wenn ein Signal an die letzten Alarm-Bausteine anliegt, eine Meldung wird an Betreiber gezeichnet. Zunächst wird von links nach rechts die Logik erklärt: Zuerst müssen die beide Hardware I/Os Variable „doSchieber1/2“ als Konnektoren „Schieber1/2“ angelegt werden. Die Hardware I/Os sind die Knöpfe die in der Prozessgrafik angeklickt werden um die Schiebern „auf“ und „zu“ zu machen (wenn zu wird der Wert 1 gegeben). BecherwerkEA ist der Konnektor der zusammen verbunden mit Becherwerk Button ist und schaltet das Becherwerk ein (ein=1). FUStart ist der Konnektor der den Motor der Schnecke einschaltet. Die erste „Switch“ Bausteine haben 3 Eingänge und 1 Ausgang, wird in den Switch ein 0 eingegeben wird der Wert die bei Value 1 angelegt ist (in dem Fall=1) weitergeleitet. Wird ein 1 am Eingang dann der Wert von Value 2 (in dem Fall=0). Nächste Baustein Add Real macht Addition von Signalen und Real to BOOL umwandelt ein reales Signal (ein realzähliger Wert) in BOOL Signal (1 oder 0). Nächste zwei Switch Bausteine haben für Value 1/2 „0“, somit wenn der Konnektor BecherwerkEA ein 1 anliegt, wird immer Wert 0 an den Alarmbaustein weitergegeben (kein Alarm). An den Unteren Switch Baustein sind die Anschlüsse getauscht, somit wenn beide Schieber zu sind (ein 0 an Eingang) immer Wert bei Value 1 weitergeleitet bzw. wenn FUStart (Schnecke einschalten) ein 0 gibt wird kein Alarm.

Weiteres darf der Schieber bei der Förderseite nicht geöffnet werden da sich dort ein Sandsturm aufgebaut hat. Um das zu vermeiden ist eine Sicherung-

Logik gebaut die ein Überdruck von mehr als 170m bar über Drucksensoren p313/p314 nicht der Schieber öffnen Ist. In Abb. 20 ist die Logik zu sehen:



20 Abb. Auslassschieber Sicherung

Kommt es zu einer Verstopfung in Becherwerkeinlass werden die beide Drucksensoren p313 und p314 mehr als 170mbar steigen bzw. keine von beiden Schieber geöffnet werden können. Die Verstopfung soll zuerst aufgelöst werden durch maximale Öffnung die Luftkistenventile, somit wird der Sand in Richtung niedrige Druck gezogen, erst dann wenn den Überdruck unter 170mbar liegt kann eine von beide Schiebern geöffnet werden. Weitere Information über Druckverhältnisse in Wärmetauscher können in Kap. 3.3.1 „Ausgeglichene Sandbettniveau“ gelesen werden.

3. Durchgeführte Versuche.

Vorweg möchte ich sagen, dass hinter jedem Versuch viele Tage Vorbereitung stehen; mit vielen Stunden eines stationären Betriebes der Anlage damit jeder Parameter bestimmt zu werden kann. Das Nicht-Vorhandensein einer Betriebsanleitung macht die Aufgaben noch schwieriger, da es nicht bekannt war woher die Probleme stammen, bzw. wie sie gelöst werden können.

Der Sandpartikel Wirbelschichtreaktor kann als Gegenstrom- oder Gleichstrom-Wärmetauscher betreiben werden. Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Wärmetauschern ist, dass bei diesem Wärmetauscher drei statt wie sonst nur zwei Stoffströme vorhanden sind. Das Thermoöl, das als heizendes/kühlendes Medium wirkt; der Sandpartikel Massenstrom, das eigentliche Speichermedium; und der Luftmassenstrom welches das Fluidisierungsmedium ist. Das Ziel der Kälteversuche ist die Erforschung der Zusammenhänge zwischen der Luft und dem Sandmassenstrom zu untersuchen. Es wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Kennlinien der Schnecken
- Blendenabweichung
- Rückstau
- Luftverteilung
- Segregation
- Stabilität Blenden
- Stabilität Sinter
- Dispersion

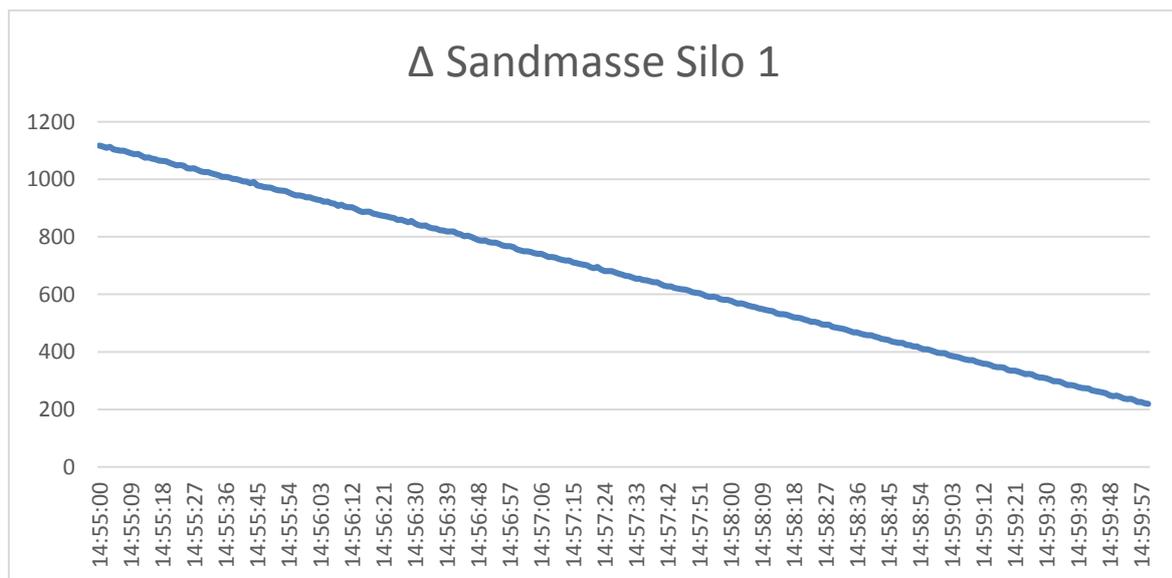
Für die ersten Kälteversuche ist ein Segment (obere Teil der WT) ohne Thermoöl Rohbündel verbaut. Nach dem Ausbau des 2ten Segments werden alle Versuche wiederholt. In dieser Diplomarbeit wird nur ein Teil der Versuche beschrieben.

In den weiteren Berechnungen wurden folgenden Annahmen gemacht. Der Umgebungsdruck wird mit 101300 Pa und 0° C mit 273.15° K angenommen. Der Druckverlust in einem 20m lang geraden Rohr mit 0.14m Durchmesser durch welches die Luft mit einer Geschwindigkeit von $60 \frac{m}{s}$ bei Normzustand (20°C, 101300 Pa) fließt, ergibt sich zu 1.511 Pa. Wobei dieser Verlust sehr klein für eine

Anlage dieser Größe ist und somit vernachlässigt werden kann. Die wesentlichen Druckverluste in dem Fluidisierungsluft-System werden aufgrund des Druckunterschieds zwischen zwei Messstellen berechnet.

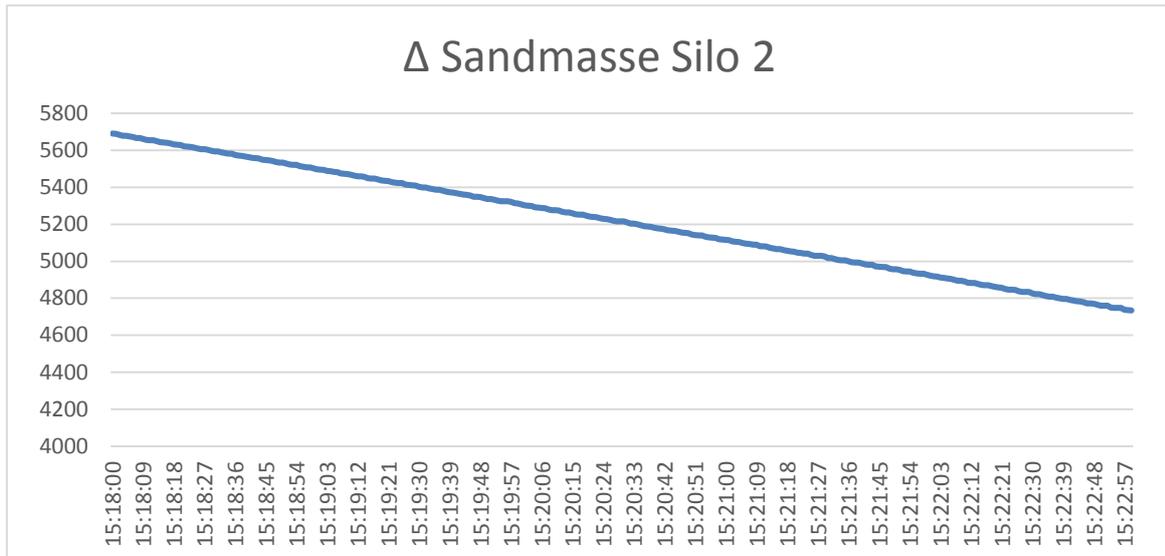
3.1. Sandmassenstrom.

Das Wärmespeichermedium (fluidisierter Quarzsand) wird durch eine Höhendifferenz vom Ein- zum Austritt des Wärmetauschers transportiert. Der Massenstrom ist eine Funktion des geförderten Quarzsandes und des Fluidisierungsgrades. Der stationäre Verlauf des Massenstroms wird mit der Drehzahl der Elektromotor kontrolliert. Die Werte liegen zwischen 250 und 1455 U/min und entsprechen 5.1 bis 17.9 U/min der Schnecke. Das Ziel dieser Versuche ist es, den maximalen und den minimalen Sandmassenstrom, den die Schnecke fördern kann, zu bestimmen. Deswegen wird die Anlage im sogenannten „kurzer Kurzschluss“ gefahren, wobei der Sand nicht durch den Wärmetauscher gefördert wird, sondern direkt ins Becherwerk transportiert wird. Der Schieber, der unter der Schnecke liegt, wird offengehalten. Die Schneckenmotordrehzahl wird variiert und jeder Versuch soll 10 min dauern. In den folgenden Diagrammen ist die stationäre Änderung des Sandbestandes mit verschiedenen Motordrehzahlen der Schnecke im Silo zu sehen:



21 Abb. Sandmassenstrom VID 0019 bei 1450 U/min

Der mittlere Sandmassenstrom ist: 3kg/s.



22 Abb. Sandmassenstrom VID 0021 bei 1450 U/min

Der mittlere Sandmassenstrom ist: 3,19 kg/s.

Die Kurven in Abb. 21 und 22 schauen gerade aus, weil der Sandbestand in den Silos linear absinkt und der Massenstrom mit dem gegebenen Anfangswert – Endwert durch die Zeit gemittelt werden kann. In der folgenden Tabelle 1 sind die dementsprechenden Massenströme zu sehen:

Schnecke 1

Schnecke 2

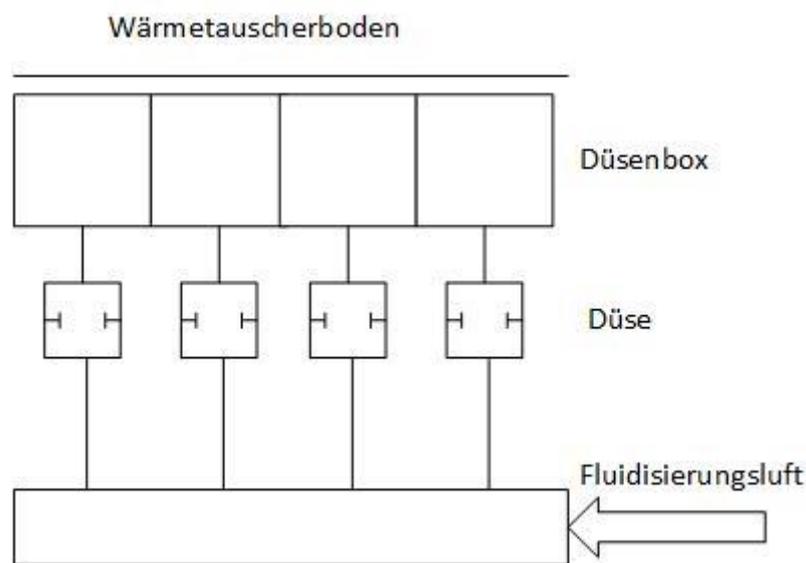
Nenndrehzahl (U/min)	Massenstrom (kg/s)	Nenndrehzahl (U/min)	Massenstrom (kg/s)
250	1,048	250	1,039
300	1,224	300	1,267
350	1,490	350	1,490
400	1,753	400	1,699
450	1,932	450	1,901
500	2,130	500	2,107
550	2,361	550	2,351
600	2,592	600	2,543
650	2,816	650	2,746
700	3,005	700	2,958
750	3,268	750	3,202
800	3,463	800	3,441
850	3,687	850	3,594
900	3,905	900	3,914
950	4,117	950	4,077
1000	4,258	1000	4,333
1050	4,572	1050	4,493
1100	4,767	1100	4,697
1150	4,986	1150	4,970
1200	5,198	1200	5,111
1250	5,396	1250	5,397
1300	5,689	1300	5,602
1350	5,881	1350	5,814
1400	6,097	1400	6,042
1450	6,295	1450	6,266

1 Tabelle Schnecken Sandmassenstrom

In Tabelle 1 sind die gemessenen gemittelten Sandmassenströme aufgelistet. Die gemessenen Unterschiede zwischen Schnecke 1 und 2 können sowohl an technischen Ungleichmäßigkeiten als auch an unbekanntem systematischen Messfehler liegen. Da es sich nur um einen kleinen Unterschied handelt können die Daten weiter genutzt werden.

3.2. Blendenabweichung

In Abb. 23 ist ein Prinzip-Plan einer Düsenwanne zu sehen. Da die Düsen in Serienschaltung entlang der Wärmetauscher verbaut sind, muss sichergestellt werden, dass sich der Luftvolumenstrom durch jede Blende und am Wärmetauscher-Unterbecken gleichmäßig verteilt. Die gleichmäßige Luftverteilung ist ein wesentlicher Punkt, denn wenn der Sand an manchen Stellen weniger fluidisiert wird, kann dies zum Zusammenbruch des Fluidisierungsbettes oder zu ungleichmäßigen Wärmeübergangskoeffizienten im Wärmetauscher führen.



23 Abb. Düsenwanne mit 4 Düsen

Messaufbau:

Die Fluidisierungsluft wird über 13 Düsenwannen verteilt. Jede Düsenwanne hat 4 Düsenboxen, jede Düse hat eine 4.1mm Bohrung (GID 001 bis GID 024 dannach 5.1mm). Die Luft wird von zwei Windboxen durch die 52 Düsen eingeblasen. Um eine gleichmäßige Fluidisierung des Sandes zu erhalten, muss der gleiche Druck nach jeder Düse vorhanden sein. In Messreihe 003 werden bei konstantem Luftmassenstrom (siehe Kap. 2.3.2.1), die Drucksensoren p316-p322 an jeder Messstelle (x314-x363) für 10 min gemessen. Wobei die Drucksensoren p316 und p323 als Referenzpunkte ausgewählt werden. Die Drucksensoren messen den Druckunterschied zwischen der Windbox und der dementsprechenden Messstelle. Ventilaufstellung, Drucksensor Positionen:

Drucksensoren					
S.-Nr.	Pos. A	Pos. B	S.-Nr.	Pos. A	Pos. B
p101	X102		p324	X3DA	X3DB
p102	X104	(X114)	p325	X3DC	X3DD
p103	X105		p326	X3DE	X3DF
p104	X113		p327	X3DG	X3DH
p105	X114		p328	X3DI	X3DJ
p106	X111		p330	X3GA	X3GB
p201	X202		p331	X3GG	X3GH
p202	X204	(X214)	p332	X3GK	X3GJ
p203	X205		p501	X501	X502
p204	X213		p502	X505	X506
p205	X214				
p206	X211				

2 Tabelle, Drucksensoren Position

Von Tabelle 2 kann die Position jedes Drucksensors abgelesen werden und auch ob der Drucksensor den absoluten oder relativen Druck misst. Da die Installation und Behandlung von viele Sensoren sehr zeit- und geldaufwendig ist, werden immer dieselben 6 Drucksensoren an verschiedenen Messstellen angebracht. Wobei angenommen wird, dass bei jedem Hochfahren der Anlage die gleichen Bedingungen für die Fluidisierungsluft erfüllt werden. In Tabelle 3 sind die Nummern der Messstellen aufgelistet und im Anhang kann die genauere Position gefunden.

Position Variation:

Drucksensor	VID0051		VID0052	VID0053	VID0054	VID0055	VID0056	VID0057	VID0058	VID0059
	Pos. A	Pos. B	Pos.A							
p317	X326	X304	x321	x320	x319	x318	x317	x316	x315	x314
p318	X335	X304	x330	x329	x328	x327	x325	x324	x323	x322
p319	X338	X304	x337	x335	x334	x333	x332	x331	x331	x331
p320	X339	X310	x340	x341	x343	x344	x345	x346	x346	x346
p321	X342	X310	x347	x348	x349	x350	x352	x353	x354	x355
p322	X351	X310	x356	x357	x358	x359	x360	x361	x362	x363

3 Tabelle, Drucksensoren Rotation

Messergebnisse:

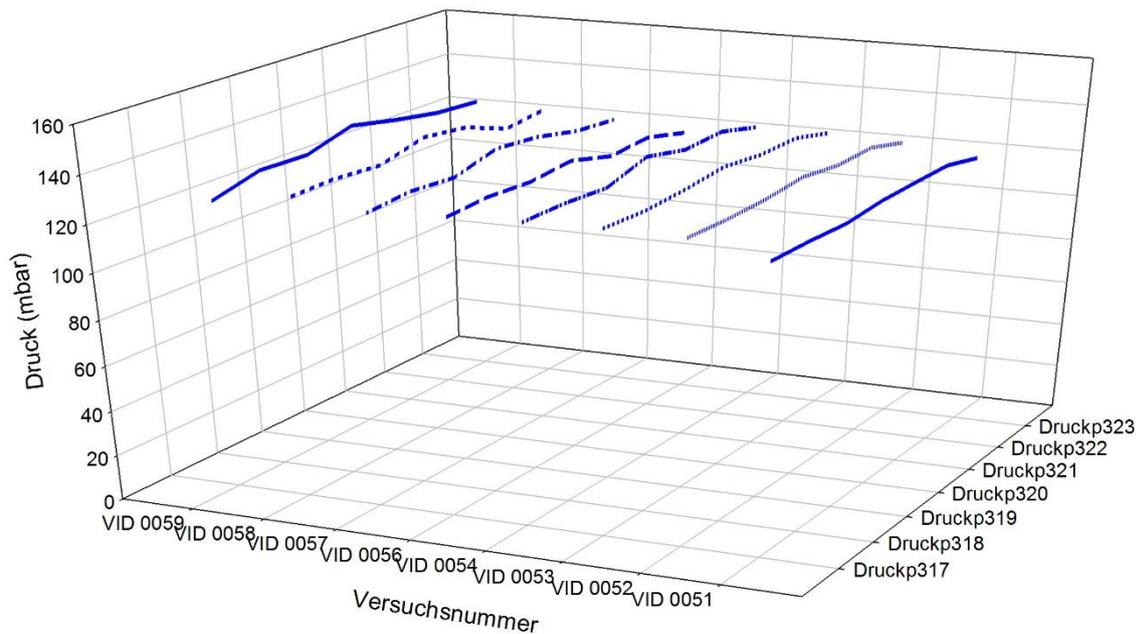
Bei dieser Versuchsgruppe ist ein grober Messfehler passiert, weshalb die abgelesenen Daten von Drucksensor p 316, nicht berücksichtigt werden können. Weiter ist die Regelung von der Fluidisierungsluft mit Volumenstrom als Istwert angenommen, deswegen können keine Zusammenhänge zwischen den gemessenen Druckabfällen und dem Luftvolumenstrom gemacht werden.

In Tabelle 4 sind die gemessene gemittelte Werte aufgelistet. Die Drucksensoren p317 bis p323 sind wesentlich:

	Druckp 317	Druckp 318	Druckp 319	Druckp 320	Druckp 321	Druckp 322	Druckp 323	Druckp 501	Druckp 502	Luft Druck1	Luft Druck2
VID 0051	124,14	123,93	123,06	124,67	124,90	124,88	120,97	-0,46	4,10	281,24	280,77
VID 0052	129,68	129,17	129,63	131,31	128,99	129,51	124,75	2,56	0,69	283,03	285,48
VID 0053	130,17	129,45	130,60	132,56	130,54	130,71	126,20	2,56	1,57	284,36	285,43
VID 0054	129,26	129,35	128,16	133,82	129,74	130,65	126,01	2,56	2,58	284,18	284,44
VID 0055	117,85	119,29	118,72	123,80	121,36	120,69	115,99	2,56	2,58	274,08	273,49
VID 0056	127,24	128,57	127,48	129,20	124,13	125,44	120,73	2,56	2,58	279,05	282,80
VID 0057	126,08	127,85	126,43	131,52	129,61	125,43	123,85	2,56	2,58	282,25	282,59
VID 0058	129,37	129,97	128,47	133,36	130,97	123,73	125,89	2,56	2,58	284,26	284,59
VID 0059	125,23	130,59	129,97	135,60	131,43	128,03	126,63	2,56	3,70	284,78	285,19

4 Tabelle, Druckabfall in den Düsenboxen

Aus den gemessenen Daten kann bestimmt werden, dass sich der Druck in den Düsenboxen gleichmäßig verteilt. Bei dieser Versuchsgruppe ist mit 2 getrennten Luftsträngen durchgeführt worden. Deshalb ist der Druck in beiden Seiten der Wärmetauscher ein wenig unterschiedlich. Das hat keine Auswirkung auf die durchgeführten Versuche. Der Druck p323 ist bei jedem Versuch niedriger. Dies liegt daran, weil es über der Messstelle keine Thermoöl-Rohleitung gibt, somit ist der Druckverlust geringer.



24 Abb. Blendenabweichung

Idealerweise sollen die Kurven in Abb. 24 gerade sein und parallel zu der VID-Achse. Die Drucksensoren sind entlang der Düsenwannen verschoben worden. An den verschiedenen Messstellen wurden nur kleine Druckunterschiede gemessen. Da es sich um maximal 5,3 mbar handelt kann bestätigt werden, dass sich die Luft gleichmäßig verteilt.

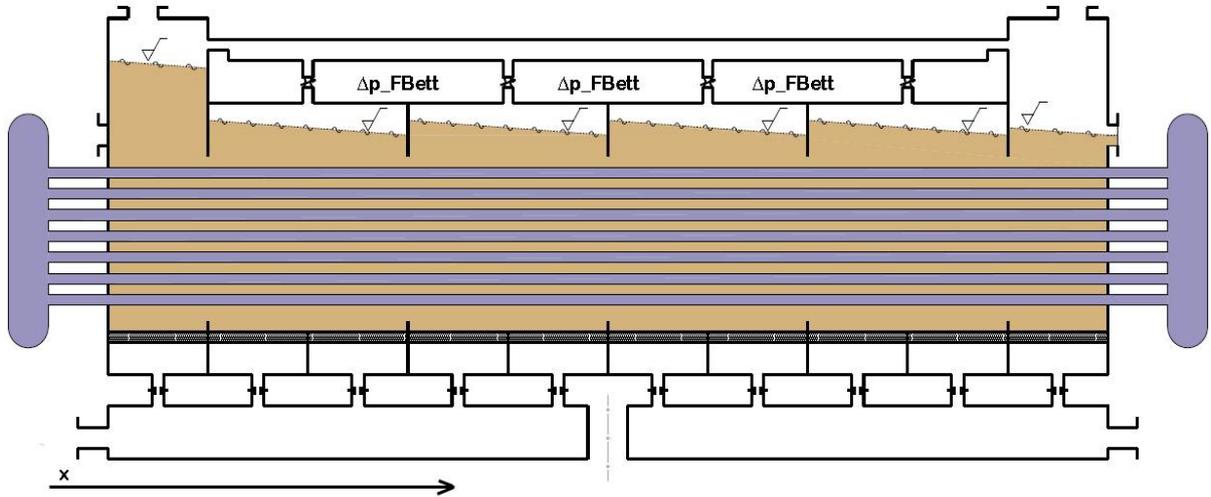
3.3. Rückstau

Der Sand wird in dem Wärmetauscher durch die Betthöhendifferenz transportiert. Das Ziel dieser Versuchsgruppe ist, dass ein Zusammenhang zwischen Luftmassenstrom und Sandmassenstrom bestimmt zu werden kann. Laut einer Theorie in der Dissertation von Dipl.-Ing. Karl Benedikt Schwaiger lässt sich der Druckgradient entlang des Wärmetauschers (x) mit folgender Formel bestimmen (Schwaiger):

$$\frac{\partial p_{FBett}(x)}{\partial x} = \frac{\partial \Delta p_{FBett}}{\partial x}$$

Um diese Zusammenhänge zu bestimmen werden ceteris paribus Experimente durchgeführt, wobei der Luftmassenstrom konstant gehalten wird und nach der Bestimmung des minimalen und maximalen Sandmassenstroms 4 Versuche mit unterschiedlichen Sandmassenströmen gemacht werden. In Abb.

25 ist ein Funktionsprinzip-Schema zu sehen, wobei „x“ die Fließrichtung und Δp_{FBett} der Druckgradient in jedem Segment ist, der sich aufgrund des Höhenunterschieds aufgebaut hat.



25 Abb. Wärmetauscher Rückstau (Schwaiger)

Jeder Versuch soll in einem stationären Betrieb 10 min dauern. Der momentane Bestand an Sand pro Silo ist ca. 6900kg bis max. 8000kg. Die Anpassung der Luftkisten Ventile dauert unterschiedlich lange. Mit einem 3 kg/s Sandmassenstrom ist das Silo in ca. 36min geleert. Um eine ausgeglichene konstante Betthöhe für die gesamte Versuchsgruppe zu erreichen, wird zuerst im sogenannten langen Kurzschluss gefördert (dabei wird Sand durch den Wärmetauscher in den gleichen Silo transportiert). Das Becherwerk fördert durch die Verteilerweiche z.B. zu Silo 1, der Schneckenförderer 1 wird mit konstanter Drehzahl eingeschaltet und der Schieber 2 offengelassen. Erst wenn die Betthöhe entlang des Wärmetauschers konstant bleibt, wird von Silo 1 nach Silo 2 gefördert um den Massenstrom zu bestimmen.

Die Lukis Position ist so gewählt, dass in jedem Segment der letzte Drucksensor in Förderrichtung zwischen 0.5 und 1 mbar anzeigt. Die Aussagen basieren auf dem Druckunterschied zwischen, in Förderrichtung gesehen, dem hinteren Drucksensor minus dem Vorderen.

GID 016 - Förderrichtung Silo 1 nach 2.

Bei dieser Versuchsgruppe werden insgesamt 3 Messreihen gemacht, wobei von den drei verschiedenen Luftmassenströme nur die Schneckenmotordrehzahl variiert wird: 250 – 850 rpm mit 200 Schritt.

Luftmassenstrom: $70-130 \frac{g}{s}$ ($35-65 \frac{g}{s}$ pro Strang)

Die Ventileinstellungen sind:

- A201 – 20mm Durchgebohrte Scheibe.
- A101 – 20mm Durchgebohrte Scheibe.
- A105 – Geschlossen.
- A106/A206 – Auf (Rekuperator Bypass).
- A107/A207 – Geschlossen.
- A002 - Blindscheibe.
- A003 - Blindscheibe.
- 52 Düsen – 4.1mm Bohrung.

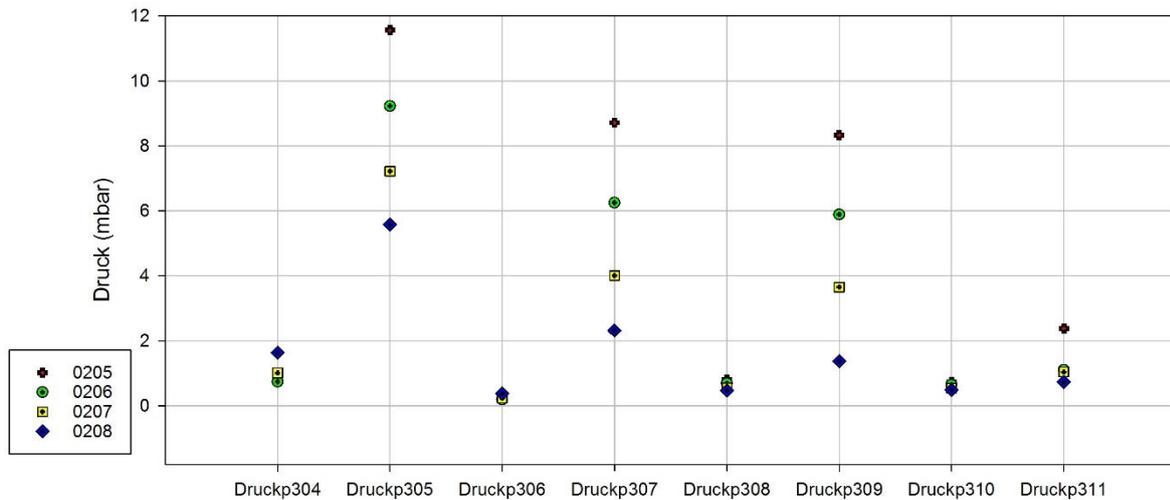
Die Werte in der folgenden Tabelle basieren auf dem mittleren Wert jeder Variable. Der Sandmassenstrom wird berechnet über: Anfang minus Endwert des Bestandes an Sand, dividiert durch die gemessene Zeit.

VID	Sandmassenstrom (kg/s)	Luftmassenstrom (g/s)	Avr. ΔP p305-p304	Avr. ΔP p307-p306	Avr. ΔP p309-p308	Avr. ΔP p311-p310	Avr. ΔP p314-p313
197	3,554	50,0	11,46	10,59	8,89	8,10	60,29
198	2,711	50,0	10,14	7,64	5,78	2,61	49,11
199	1,880	50,0	8,41	5,73	3,56	0,57	39,04
200	1,029	50,0	4,53	2,44	1,22	0,26	26,13
205	3,604	65,0	10,66	8,41	7,54	1,64	55,79
206	2,724	65,0	8,48	6,05	5,20	0,46	46,50
207	1,881	65,0	6,21	3,77	3,09	0,49	34,91
208	1,032	65,0	3,94	1,94	0,90	0,24	21,14
213	1,883	35,00	8,60	12,87	9,12	9,87	56,64
214	1,048	35,00	6,50	5,57	4,48	1,39	36,99

5 Tabelle GID 16 Rückstau Silo1 nach Silo2

Von Tabelle 5 können folgende Zusammenhänge abgelesen werden. Bei großen Luftmassenströmen ($130g/s$) ist das Gefälle in jedem Segment deutlich kleiner als jenes bei kleinen Luftmassenströmen. Als weiterer Zusammenhang kann beobachtet werden, dass das Gefälle in dem letzten Segment, in

Fließrichtung kleiner ist als das im Ersten. Zur besseren Anschaulichkeit sind die Werte von Messreihe 2 in Abb. 26 in einem Diagramm gezeichnet.



26 Abb. Rückstau in den Segmenten des WT

Es ist deutlich zu sehen wie das Gefälle bei größeren Partikelmassenströme steigt. Die beiden Segmente in der Mitte des WT weisen das gleiche ΔP bei jedem Versuch auf. Bei VID0208 beträgt die Summe alle ΔP in den Segmenten (304 -311) 7,02mbar und steigt mit gleichen Schritten (ca. 7mbar) linear.

GID 017

Messreihe 1 – Förderrichtung Silo 2 nach 1.

Luftmassenstrom: $70-130 \frac{g}{s}$ ($35-65 \frac{g}{s}$ pro Strang)

Variierter Parameter: Schneckenmotordrehzahl 250 – 850 rpm.

Die Ventileinstellungen sind:

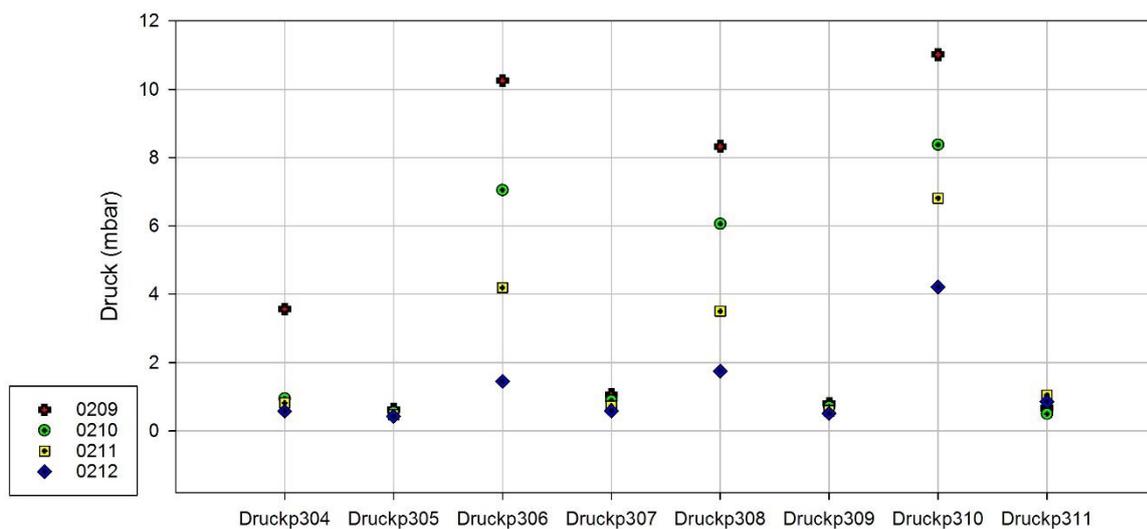
- A201 – 20mm Durchgebohrte Scheibe.
- A101 – 20mm Durchgebohrte Scheibe.
- A105 – Geschlossen.
- A106/A206 – Auf (Rekuperator Bypass).
- A107/A207 – Geschlossen.
- A002 - Blindscheibe.
- A003 - Blindscheibe.
- 52 Düsen – 5mm Bohrung.

Durchgeführte Versuche.

VID	Sandmassenstrom (kg/s)	Luftmassenstrom (g/s)	Avr. ΔP p304-p305	Avr. ΔP p306-p307	Avr. ΔP p308-p309	Avr. ΔP p310-p311	Avr. ΔP p313-p314
0201	3,627	50	5,80	9,71	8,77	10,36	55,25
0202	2,778	50	2,18	6,59	6,35	9,11	44,42
0203	1,916	50	0,23	3,83	3,73	6,40	33,39
0204	1,068	50	0,17	1,90	1,32	3,71	20,21
0209	3,634	65	2,93	9,20	7,53	10,36	50,83
0210	2,781	65	0,40	6,16	5,36	7,88	41,46
0211	1,919	65	0,35	3,47	2,91	5,77	31,22
0212	1,153	65	0,15	0,86	1,24	3,37	17,25
0215	1,153	35	10,07	7,39	9,43	9,50	50,34
0216	1,062	35	6,73	3,94	3,68	5,34	31,62

6 Tabelle GID 17 Rückstau Silo2 nach Silo1

Von Tabelle 6 können die gemessenen Daten mit Tabelle 5 verglichen werden (andere Fließrichtung). Es sind fast keine Unterschiede bei dem Sand- und Luftmassenstrom zu erkennen. Die kleine Abweichung bei den Druckdifferenzen p313 und p314 kann an einen unbekanntem systematischen Fehler liegen. Da der Unterschied bei jedem Versuch ca. 5mbar beträgt, kann angenommen werden, dass das Rückstaugefälle in jeder Richtung gleich ist.



27 Abb. Druckdifferenz in den Segmenten des WTS

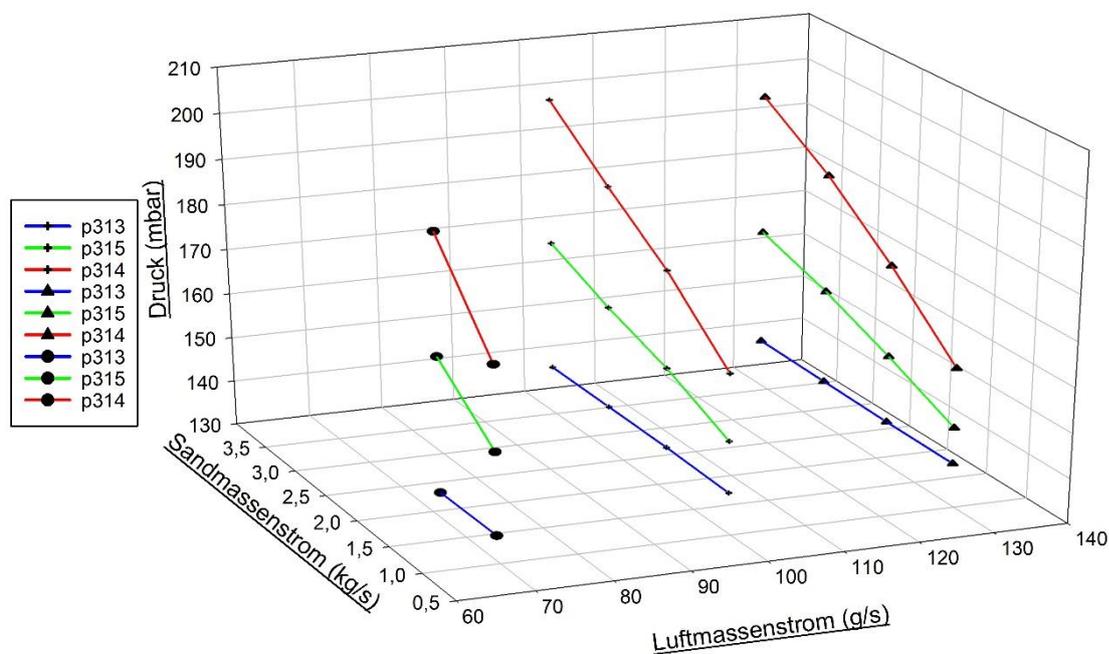
In Abb. 27 können die gleichen Zusammenhänge beobachtet werden, bei steigendem Sandmassenstrom steigt das Gefälle zuerst in dem letzten Segment und zuletzt in dem Ersten an. Die Druckdifferenz Δp 306-307 ist etwas größer als die gemessene in Messreihe 2, GID 016 wird aber von Δp 310-311 kompensiert.

Zusammenfassung der Rückstau Versuchsgruppe:

Um den Rückstau zu bestimmen, wurden insgesamt 7 Versuchsgruppen durchgeführt. Aufgrund eines systematischen Messfehlers werden nur die GID 017, 018 mit 2 getrennten Luftrohleitungen und die GID 021, 022 mit einer Luftrohleitung, herangezogen. Trotzdem sind bei allen Versuchen folgende Zusammenhänge zu beobachten gewesen:

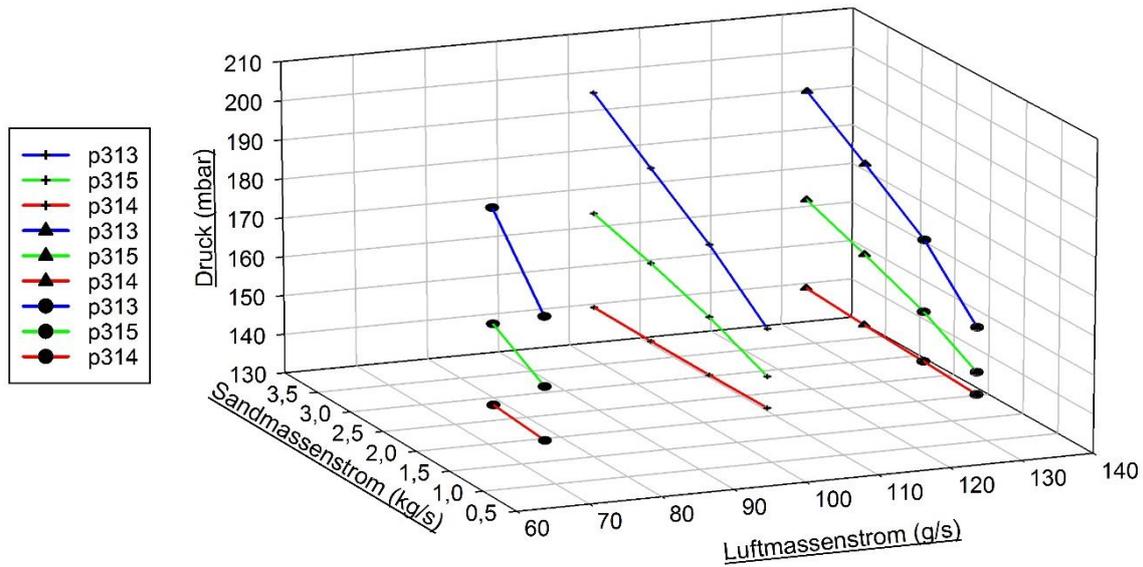
Je größer der Fluidisierungsgrad desto größer ist der Sandmassenstrom durch den Wärmetauscher. Das Sand-Luft Fluid verhält sich wie eine dichte Flüssigkeit. Das Gefälle in dem ersten Segment ist sehr klein – auch bei größerem Fluidisierungsgrad. Das absolute Niveau (p303/p312) ist höher als jenes am Austritt. Bei kleinen Luftmassenströmen ist ein Gefälle entgegen der Strömungsrichtung zu beobachten. Der Grund dafür ist, dass die Schnecke undicht ist und es kein Ventil über dem Wärmetauscher-Eintritt gibt. Deshalb wird ein Teil der Luft umgelenkt und einen Druckabfall gemessen.

Es ist zu beobachten, dass mit sinkendem Sandmassenstrom, auch der Druckabfall in den Windboxen mit einem Gefälle gegen die Sandmassenstrom-Fließrichtung sinkt.



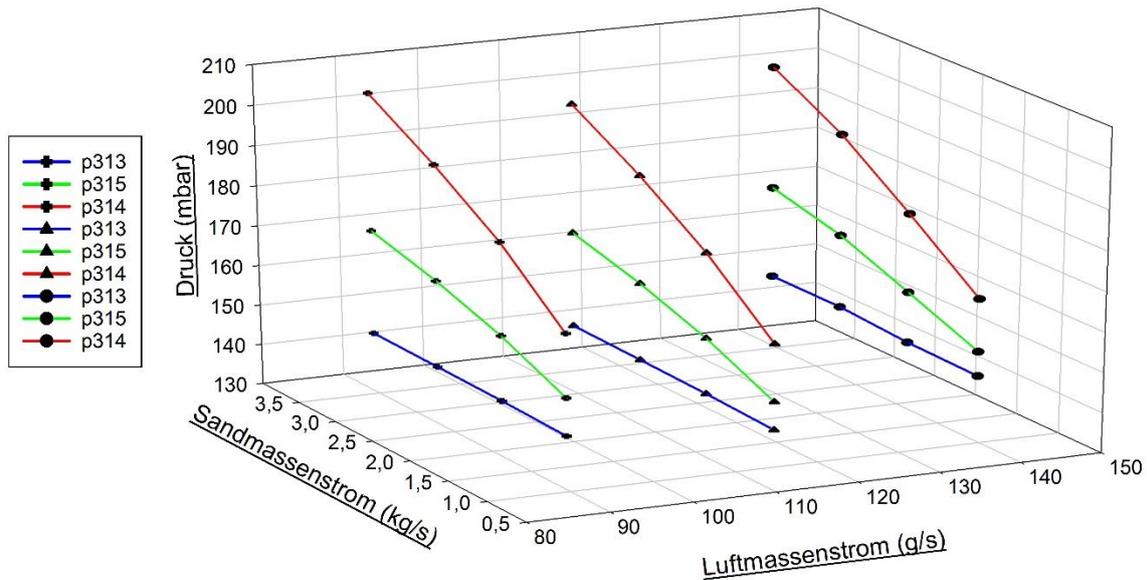
28 Abb. 3D Diagramm Messergebnisse GID 016

In Abb. 29 sind die gemessenen Werte von Versuchsgruppe 016 in einem 3D Diagramm aufgezeichnet, da der maximale Sandmassenstrom bei 70 $\left(\frac{g}{s}\right)$ Luftmassenstrom ca. 2 $\left(\frac{kg}{s}\right)$ beträgt und nur 2 Werte eingezeichnet sind. Trotzdem ist zu sehen, dass das Sandniveau am Austritt (p313) ziemlich konstant bleibt, und am Austritt (p314) fast linear mit steigendem Sandmassenstrom ansteigt.



29 Abb. 3D Diagramm Messergebnisse GID 017

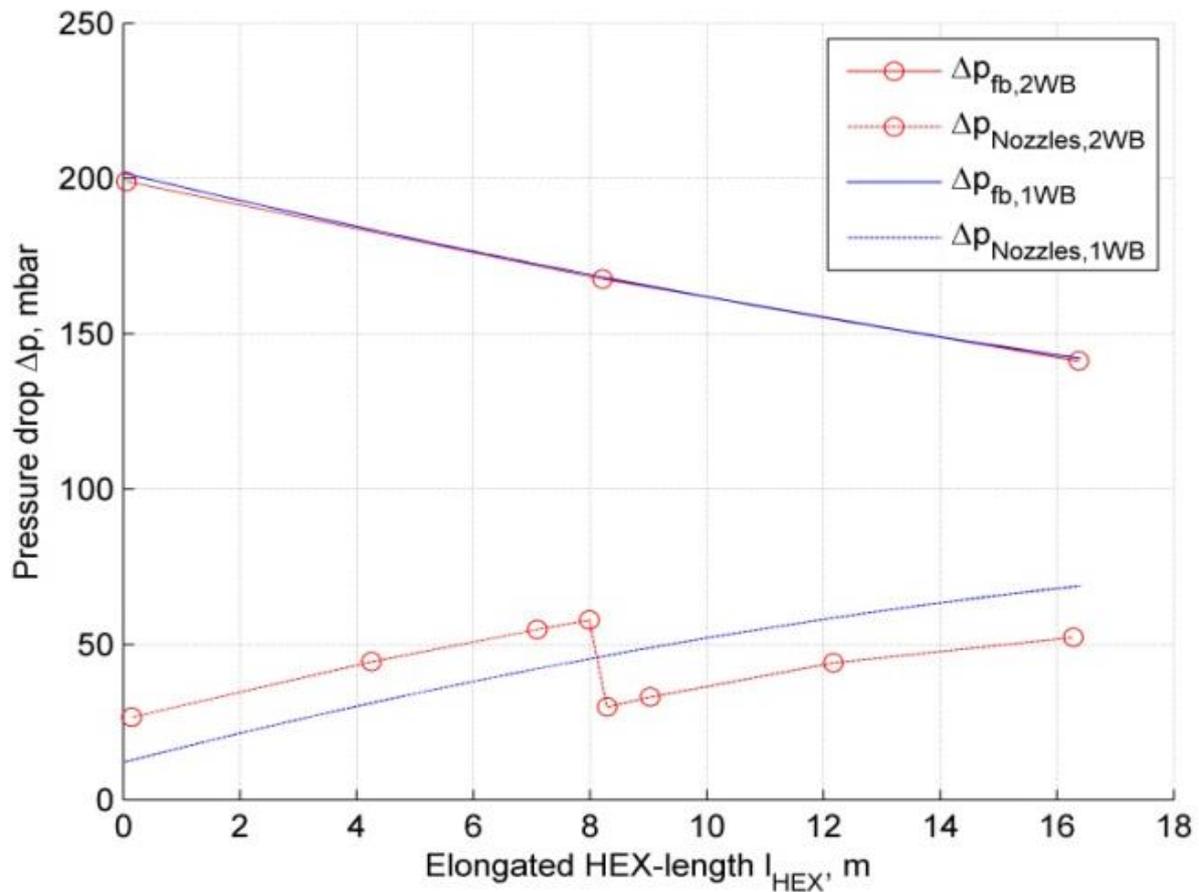
Es kann noch ein weiterer Zusammenhang beobachtet werden. Je kleiner der Luftvolumenstrom, desto größer wird das Gefälle zwischen Ein- und Ausgang. Dies kann über die größere Dichte des weniger fluidisierten Sandes erklärt werden.



30 Abb. 3D Diagramm Messergebnisse GID 022

Die Daten von den GID 022 sind in Abb. 30 zu sehen. Diese Versuchsgruppe wurde mit einem Luftstrang durchgeführt und mit einem größerem Luftmassenstrom (90, 110, 140g/s). Deshalb konnte ein größerer Sandmassenstrom erzielt werden.

In Abb. 31 ist anschaulich zu sehen, dass der Druckabfall in den Windboxen auf dem unterschiedlichen Sandbestand entlang dem WT Boden basiert. Die beiden Kurven des Druckabfalls in den Windboxen weisen ein Gegengefälle zum Sandmassenstrom auf. Der Knick in der Kurve der Abbildung (31) bei 8 m ist zurückzuführen auf das Trennblech zwischen den 2 mittleren Segmenten bei 2 Luftsträngen (Index 2 WB). Grundsätzlich ist die Luftverteilung durch 2 Luftstränge besser; dies ist ersichtlich aufgrund des geringeren maximalen und minimalen Druckverlustes. Mehrere Gebläse und getrennte Luftrohleitungen sorgen für einen niedrigen Druckverlust bzw. weniger erforderlicher Leistung des Gebläses.



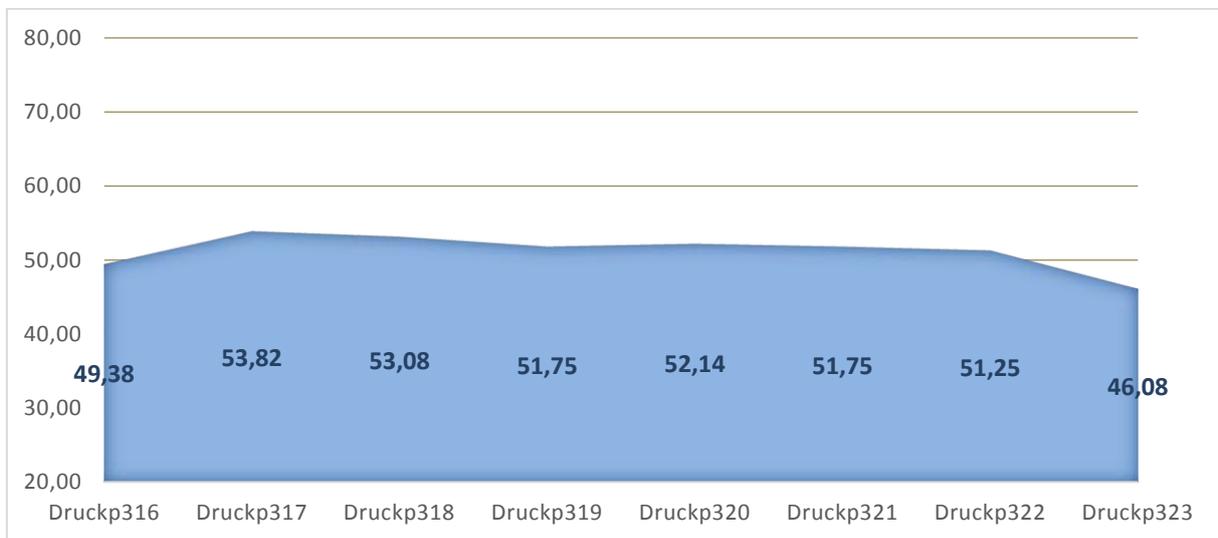
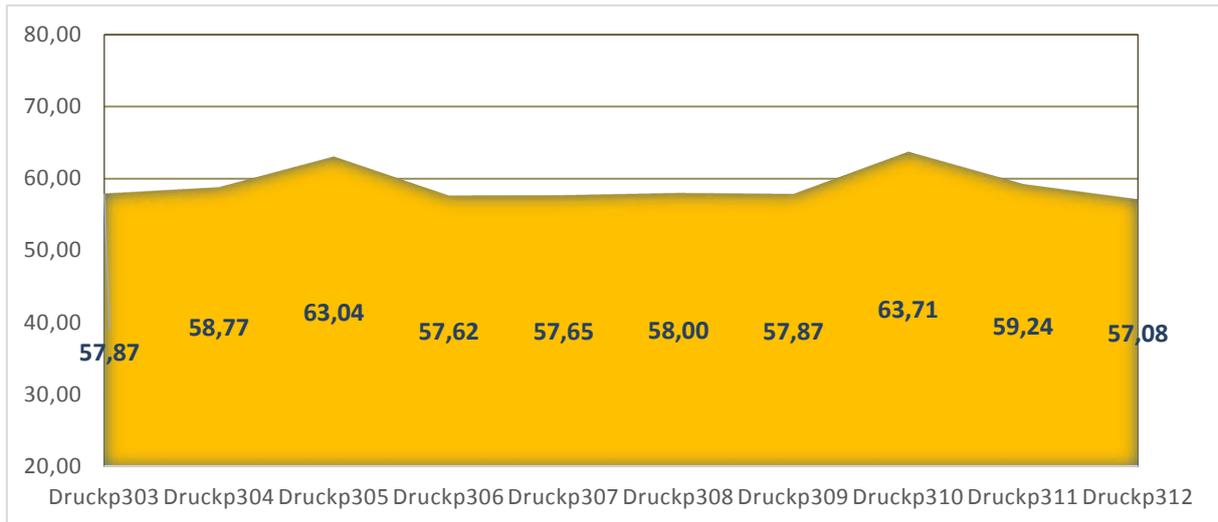
31 Abb. Druckabfall entlang des WTs (Steiner, 2017)

3.3.1. Ausgeglichenes Sandbettniveau

Dieser Versuch soll die Gleichmäßigkeit im Wärmetauscher bestätigen. Beide Auslasventile A104 und A204 sind komplett geschlossen, A002, A003, A004 – werden mit Blindscheiben versperrt. Somit sind die Luftmassenströme in beiden Rohleitungen voneinander unabhängig.

Die Ergebnisse basieren auf den gemessenen mittleren Werten, wobei aus Anschaulichkeitsgründen in Abb. 32 der gemessene Wert von p303 zu dem von p304-p311 addiert wird, weil die Drucksensoren auf gleichem Niveau messen.

Durchgeführte Versuche.



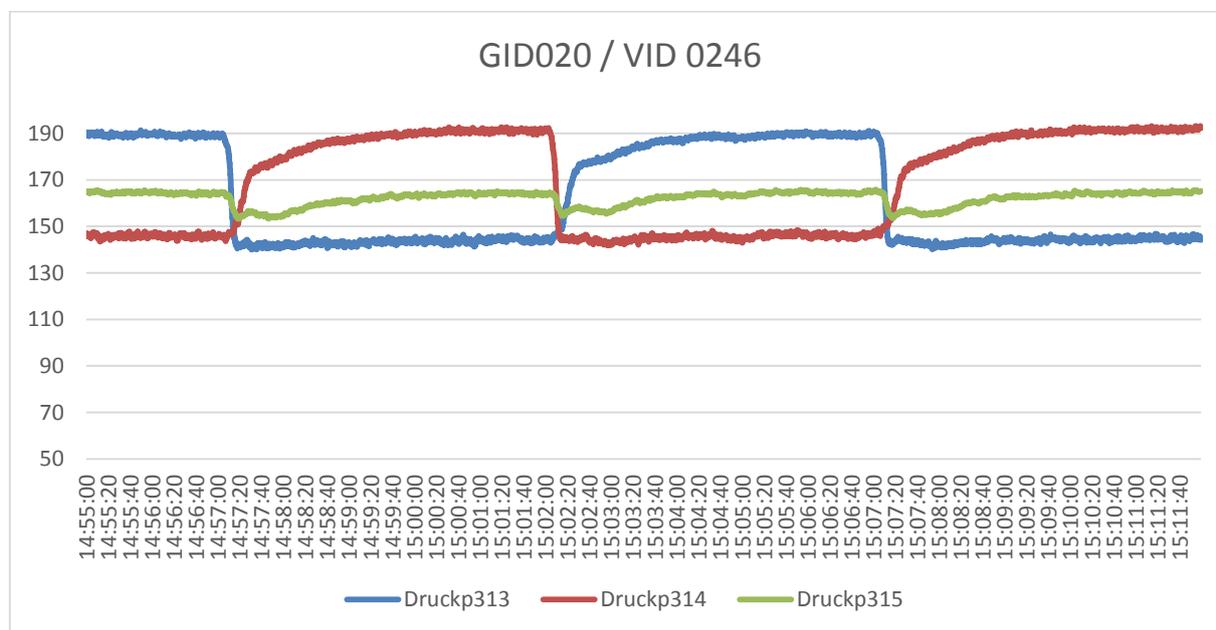
32 Abb. Sandbettniveau (Oben), Windboxen Druckabfall (Unten)

Die kleine Ungenauigkeit bei Druckp323 kann darauf zurückzuführen sein, weil sich über dem Schieber 2 (Andere Seite des Wärmetauschers) mehr Sand aufgetürmt hat, was zu einem größeren Druckverlust führt. Bei diesem Versuch wurden die Falschluffventile nicht eingestellt.

3.4. Dynamische Bettwechselung

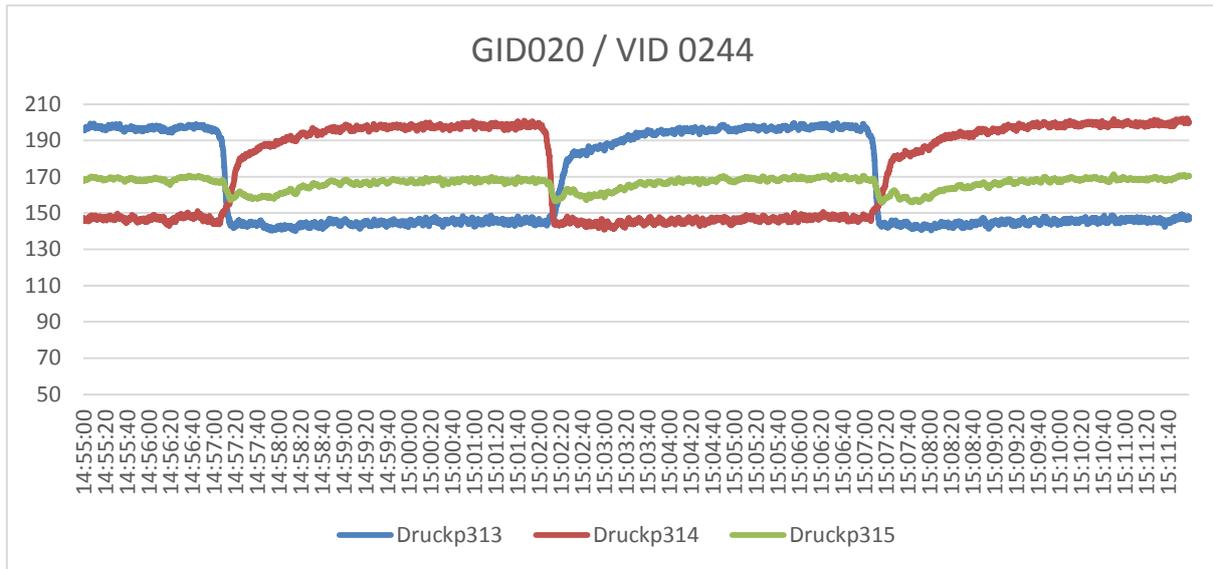
Das Ziel dieser Versuchsgruppe ist die Ermittlung der Zeit, die der Sandmassenstrom braucht um seine Fließrichtung zu ändern. Beziehungsweise um von einem Ladebetrieb zum Entladebetrieb zu kommen.

Dazu wird nach einem 2 minütigen stationären Betrieb die fördernde Schnecke ausgeschaltet, die Verteilerweiche umgeschwenkt, die Schieber an der Austrittseite zugemacht und die anderen aufgemacht. Dann wird die andere Schnecke mit der gleichen Drehzahl eingeschaltet. Nach 5 min wird diese Prozedur 2-mal wiederholt, womit sich eine Versuchsdauer von insgesamt 17 min ergibt.



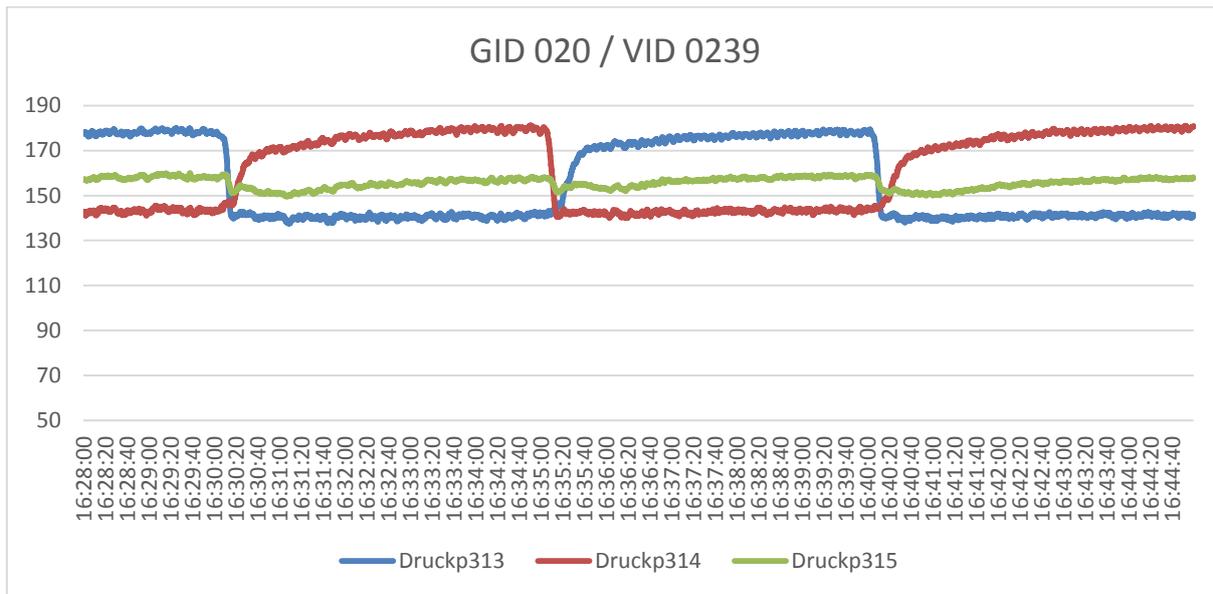
33 Abb. 110g/s Luftmassenstrom 650 rpm der Schnecke

Es kann kein ganz genauer Zeitpunkt ermittelt werden an dem das Sandpartikelbett seine Fließrichtung ändert, weil es keine Beobachtungsmöglichkeit der Partikel gibt. Von Abb. 34 können aber folgende Zusammenhänge abgelesen werden: mit einem Sandmassenstrom von 2.8 kg/s dauert es in beiden Richtungen ca. 3min bis sich der Sandturm am Eintritt des WT's wieder aufgebaut hat. Genau so viel Zeit braucht der p315 (in der Mitte des WT's) bis sich dort ein stationärer Druck einstellt.



34 Abb. 130g/s Luftmassenstrom 850 rpm der Schnecke

Mit einem größeren Sand- Luftmassenstrom dauert es offensichtlich kürzer bis sich der Sandturm wieder aufbaut.



35 Abb. 90g/s Luftmassenstrom 450 rpm der Schnecke

In Abb. 35 ist deutlich zu sehen, dass die Zeit, die der Strömungsrichtungswechsel dauert, fast verdoppelt hat. Eine detailliertere Beschreibung dieser Versuchsgruppe wird in der Diplomarbeit von B.Sc. Josef Gatterer beschrieben.

3.5. Stabilität Düsenboden

Die Düsen nach den beiden Windboxen verursachen einen Druckverlust, der optimalerweise möglichst geringgehalten werden soll. Die Bohrung der 52 Düsen war am Anfang mit einem Durchmesser von 4.1mm versehen. Später wurden sie auf 5mm erweitert um einen größeren Luftvolumenstrom zu ermöglichen. Nach der Wiederholung der Versuche wurde festgestellt, dass die Düsengröße nur sehr geringe Auswirkungen auf den Druckverlust über die Düsen haben und somit keinen nennenswerten Auswirkungen auf den Luft- Sandmassenstrom haben.

Bei dieser Versuchsgruppe werden auf einem niedrigen Luftmassenstrom (insgesamt 110g/s) und einen höheren Sandmassenstrom, zwei nebeneinander Düsen mit einem 10mm Schlauch verbunden. Bei jedem nachfolgenden Versuch wird eine Düsenbox mit der darauffolgenden Düsenbox verbunden, bis das Bett zusammenbricht. Das gleiche wird in beiden Richtungen und verschiedenen Stellen wiederholt. Es zeigt sich, dass insgesamt 9 Düsenboxen miteinander verbunden werden können bis eine Störung des Sandmassenstroms bemerkt wird. Darum kann festgehalten werden, dass auch mit weniger Düsenboxen der gleiche Betrieb der Anlage möglich ist.

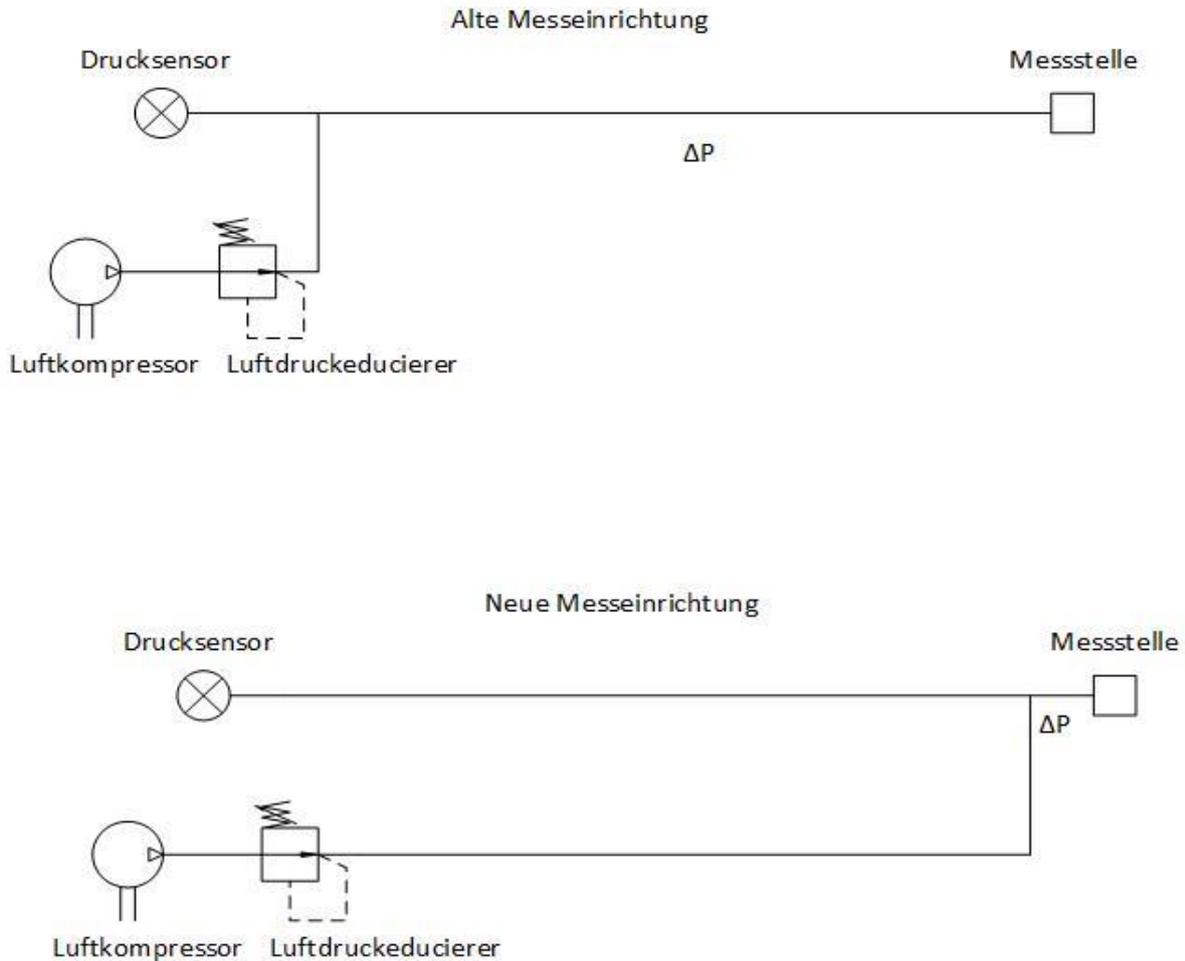
4. Optimierung Vorschläge, Kurzfristige Lösungen.

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten als auch Optimierungsvorschläge beschrieben. Wie bei jedem Projekt werden auch bei der SandTES Anlage niedrige Kosten angestrebt, z.B. durch Ausgabekürzungen etc.

4.1. Messstellen.

Alle Messstellen die unter dem Sandbettniveau liegen, sind von Spülluft umgeben, damit die Messstellen nicht von Sand verstopft werden können. Das Prinzip basiert auf einer konstanten Luftströmung, damit nur die Druckänderung an der Messstelle gemessen wird.

Die Rotameter und die Drucksensoren liegen in den Schaltkästen. Bei der alten Aufstellung waren diese T-Stück-Verbindungen auch in den Kästen und nur durch ein Rohr mit der Messstelle verbunden. Durch die Strömungsgeschwindigkeit wird im Rohr ein Druckverlust verursacht, der die Messergebnisse verfälscht.



36 Abb. Drucksensor Schaltplan

Bei der neuen Aufstellung werden die T-Stück Verbindungen direkt neben der Messstelle angebracht um den Druckverlust zu minimieren. Idealerweise soll der Drucksensor an dem lotrechten Anschluss der T-Stück-Verbindung angeschlossen werden, damit er nur minimal von der Luftströmung beeinflusst wird.

Ein weiteres Problem haben die Sonden mit den Sieben verursacht, wodurch ein Teil von den Messergebnissen verfälscht wurde und somit nicht genutzt werden konnte.



37 Abb. Messsonde

In Abb. 37 ist die verwendete Sonde mit dem Sieb zu sehen, wobei alle Messstellen die unter dem Sandbettniveau liegen mit solchen Sonden ausgerüstet sind und mit Spülluft umströmt werden. Das Problem dieser Ausführung ist, dass bei einer vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit das Sieb selbst einen Druckverlust verursacht. Auch wenn die Spülluft eingeschaltet wird, werden die Messergebnisse verfälscht. Es darf folglich nur entweder die Spülluft ohne Sieb verwendet werden oder nur die Sonde ohne die Spülluft.

4.2. Transport von Sand in den Abluftrohrleitungen.

Ein nicht zu vernachlässigendes Problem ist die Ablagerung von Sand in den Rekuperatoren und Abluftrohrleitungen. Dies verursacht einen zusätzlichen Druckverlust und Ungleichmäßigkeiten des Sandbettniveaus. Die Abluft über der Wirbelschicht ist ein ideales Gemisch von Sand und Luft. Die mitgerissenen Sandpartikel im Rohr werden mittransportiert sobald der Rohrquerschnitt klein genug ist damit die Schwebegeschwindigkeit erreicht werden kann. Bei größeren Querschnittstellen sinkt die Strömungsgeschwindigkeit und die Partikel lagern sich als feste Häufchen im Rekuperator und der Rohleitung über dem Messcontainer ab. Es bieten sich verschiedene Lösungen für dieses Problem an. Das Einbauen eines Behälters mit einem großen Volumen vor dem Rekuperator würde die Luftgeschwindigkeit absinken lassen, sodass sich der Sand dort ablagern würde. Das Problem dabei ist, dass nach einer gewissen Zeit der Sand in dem Wärmetauscher zurückgebracht werden muss. Dies verursacht einen

Zeitverlust für den Betreiber. Ein anderer, aber teurerer Vorschlag ist, die 12 Auslassrohre über dem Wärmetauscher durch andere Rohe mit einem größeren Querschnitt zu ersetzen. Dadurch würde die Luftgeschwindigkeit im Rohr sinken. Somit sollte der überspringende Sand der Sandblasen nicht in die Abluftrohre gelangen.

In Abb. 38 sieht man das Luft/Sand Gemisch, das aus einem ausgebauten Rohr vor dem Rekuperator ausströmt, wenn die Luftkissenventile komplett offen sind oder ein sehr hohes Sandbettniveau vorliegt.



38 Abb. Mitgerissene Sand in der Abluftrohleitung

Eine Möglichkeit, damit der mitgerissene Sand nicht in die Abluftrohleitungen transportiert wird, ist die Montage von Sieben unter den Luftkistenventilen und an den Abluftrohleitungen des Becherwerks. Diese Idee ist tatsächlich ausgeführt worden. Dies hat zu einem sehr hohen Druckverlust und einem nicht-stationären Verlauf geführt, weil die Siebe unterschiedlich stark mit Sand bedeckt waren. Ein weiteres Problem war, dass die Anlage nicht mit Drucksensoren für diese Überdrücke ausgerüstet war.

Ein dritter Vorschlag wäre das Einbauen eines Siebes, das gleich ist wie jenes der Unterbodenkonstruktion, nur auf dem oberen Teil des Wärmetauschers. Die Idee ist, dass die größere Oberfläche zu viel weniger Druckverlust führen wird. Es wäre sinnvoll zuerst einen Versuch mit einem Model zu machen, da die Kosten eines solchen Umbaus sehr hoch sind.

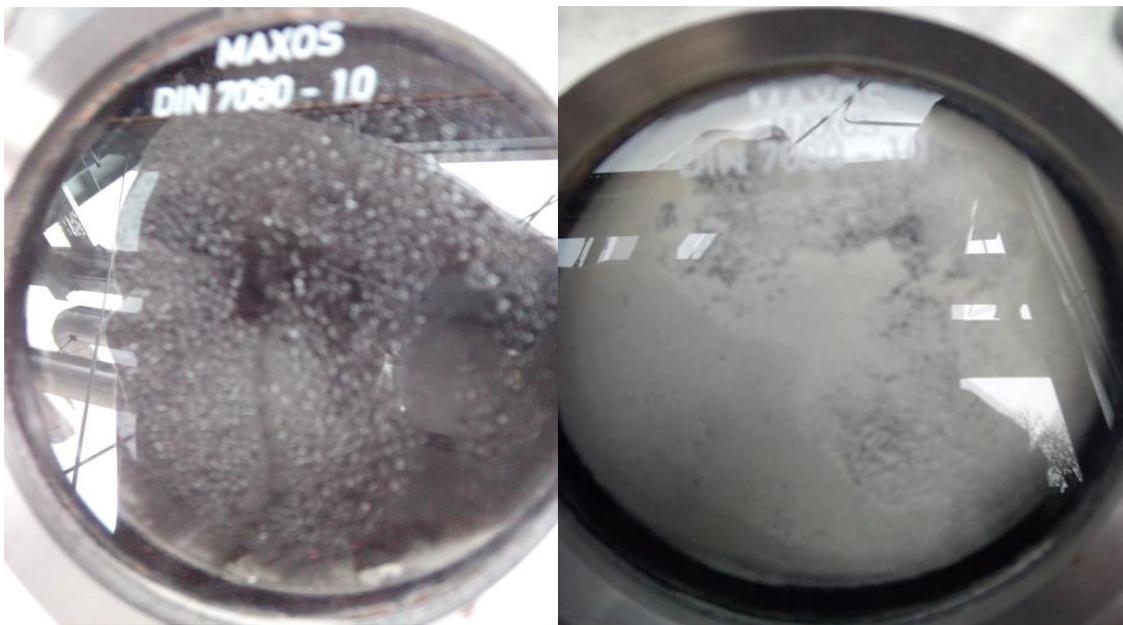
Ein weiteres Problem sind die unausgerüsteten Messstellen des Wärmetauschers, die unter dem Sandbettniveau liegen, da sie ohne Barriere

oder Sperre gegenüber des Sandes montiert sind, sodass ein Umtausch der Sonde ohne vorherige Entfernung des Sandes nicht möglich ist.

4.3. Feuchtigkeit, Abtrocknen von Sand in dem Silo.

Feuchtigkeit ist ein großes Problem bei der Fluidisierung von Sand. Wird der Sand nass, kommt es zu Verstopfungen im Wärmetauscher-Ein- und Auslass und der Sand kann nicht mehr gleichmäßig fluidisiert werden, weil sich kleine Kanäle bilden durch die die Luft strömt.

Eine Vermutung warum die Feuchtigkeit in der Anlage steigt, ist die unterschiedliche Temperatur von Tag und Nacht. Angesaugte, warme Luft mit einer hohen Luftfeuchtigkeit z.B. bei regnerischem Wetter, kann am Abend bei sinkenden Temperaturen an den inneren Seiten des Wärmetauschers kondensieren. Ein Beweis dafür ist das Kondensat am Schauglass in Abb. 39 zu sehen.



39 Abb. Nasser Sand beim Schauglass

Eine zweite Vermutung ist die Undichtheit des Becherwerks der nicht unter einem Dach steht und bei Regnen komplett nass wird. Die Dichtungen zwischen den Bauelementen sind aus Stoff und staubdicht aber nicht wasserdicht. Idealerweise sollte die Anlage unter einem Dach in einem geschlossenen Raum gebaut werden, womit viele zusätzliche Kosten gespart werden könnten. Zum

Beispiel bei der Begleitheizung für die HTT-Anlage, den Heizelementen für die Zuluft in den Wärmetauscher, dem Blechschutz über den Isolierungen, dem Flug Dach usw.

Eine Möglichkeit den Sand in dem Wärmetauscher und in den Silos zu entfeuchten ist dauerhaft komprimierte Luft einzublasen. Dafür sind 5 Polyurethan Schläuche mit einem Innendurchmesser von 6mm mit 5 Rotameter eingerichtet. Zwei davon sind auf Silo 1 und 2 angebracht; in 5 Stellen pro Silo. Zwei sind in den beiden Windboxen angeschlossen und das letzte Rotameter ist über dem Wärmetauschen an dem Luftauslassrohr montiert. Es soll kein großer Luftvolumenstrom vorherrschen, da der Kompressor kein Gebläse ist. Bei einem größeren Druckabfall wird er sich oft einschalten, was zu höheren Wartungs- oder Reparaturkosten führen kann.

Um ein oft vorkommendes Problem zu lösen würde ich vorschlagen, dass der Becherwerkseinlauf auf einem höheren Niveau eingebaut wird. Der Bereich zwischen dem Einlauf und den Bechern begünstigt den Aufbau eines Sandturms sowie eine Verstopfung des Becherwerkeinlaufs. Einerseits ist dieses Problem auf die höhere Feuchtigkeit am Becherwerktrumboden zurückzuführen, andererseits kann der Sandbestand selbst eine Verstopfung bewirken. Diese kann durch ein Anklopfen auf das Becherwerk-Eintrittsrohr gelöst werden kann.

Da die Abluftrohrlösungen über dem Wärmetauscher manchmal mit Sand verstopft werden und es keine Untersuchungsmöglichkeit dafür gibt, würde ich die Montage von drei $\frac{1}{2}$ Zoll Anschlussverschraubungen auf der unteren Seite des Rohres vorschlagen. Dadurch könnte leicht beobachtet werden ob dort Sand liegt und durch ein Einblasen von Luft könnte der dort abgelagerte Sand ohne ein Ausbauen von Rohren abtransportiert werden.

5. Schlusswort

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme und den durchgeführten Kälteversuchen kann festgehalten werden, dass fluidisierter Sand in großen Mengen (für diesen Querschnitt des WTs) mit bis zu $4 \frac{kg}{s}$ von einem niedrigen Luftmassenstrom (unter $100 \frac{g}{s}$) transportiert werden kann. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit dem SandTES Anlage, deshalb werden alle Daten in der gemessenen Einheit aufgelistet. Um das Prinzip auch in anderen Anlagen zu verwenden ist es sinnvoller, dass die Daten normiert zu werden. Zum Beispiel wird die Fluidisierungsluft nicht in g/s sondern einheitslos als Fluidisierungsgrad berechnet. Der Sandmassenstrom wird von $\left[\frac{kg}{s}\right]$ in $\left[\frac{kg}{m^2s}\right]$ umgerechnet mit $\dot{m}_{Ns} = \frac{\dot{m}}{A_{WT}}$, wobei A_{WT} der Querschnitt des Wärmetauschers ist.

Die wichtigste Eigenschaft eines WTs ist der abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}(\alpha, A, \Delta T)$. Der Wärmeübergangskoeffizient (α) kann nicht berechnet werden da weder die genauere Geschwindigkeit noch der spec. Wärmekapazität des Sand-Luftgemisches bekannt sind. Deswegen α kann nur empirisch mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A * (T_{aus} - T_{ein})}$$

\dot{Q} – Zugeführte Wärmestrom;

A – Oberfläche Rohbündel;

Wobei die Temperatur der Luft und des Sandes am Austritt des WTs als gleich angenommen werden kann.

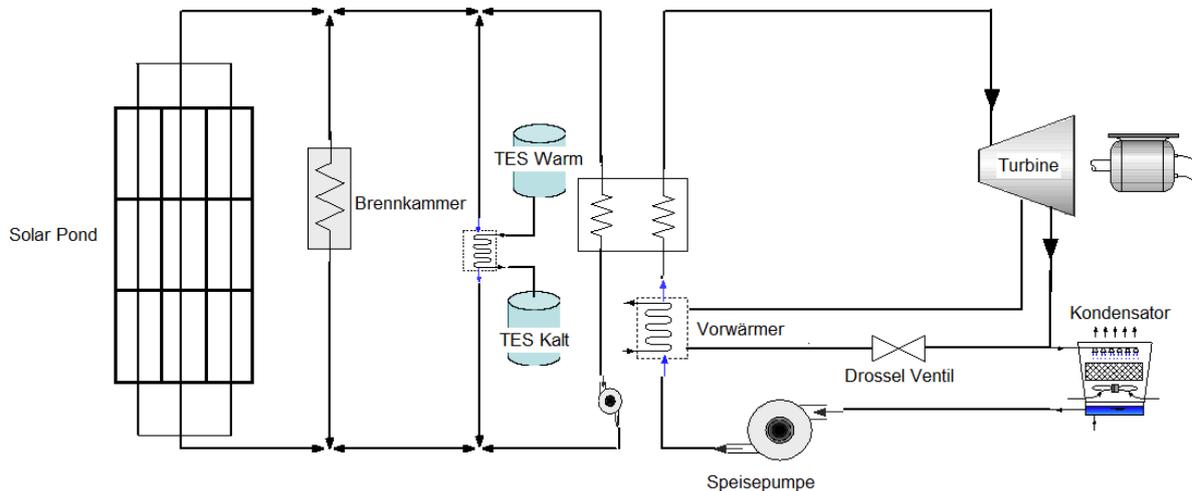
Nachdem die Isolierungen des Wärmetauschers, der Silos und der Luftrohleitungen angebracht wurden, wurden die Wärme-Versuche wie folgt durchgeführt:

- Globale Wärmeübergangskoeffizient
- Lokale Wärmeübergangskoeffizient
- Temperaturverteilung

- Luftverteilung
- Porosität

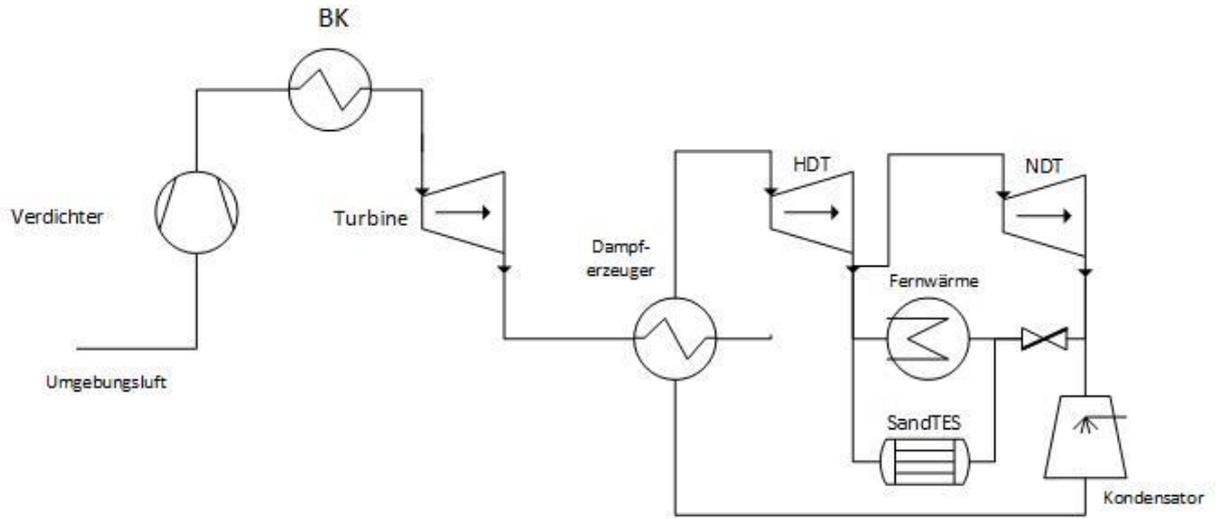
Nach Bestimmung dieser Werte kann eine Exergie Analyse der einzelnen Bauelemente gemacht werden und weiters der Wirkungsgrad berechnet werden.

Die SandTES Anlage kann für viele Anwendungen in der Produktion und in der Energietechnik sinnvoll sein. In Abb. 40 ist eine Muster Schema eines Solarkraftwerks mit dem sandTES als langfristigen Energiespeicher. Die gespeicherte Energie kann kurzfristig für das Tag/Nacht Sonnenlicht-Kompensation genutzt werden. Oder als langfristiger Energiespeicher um die saisonale Energienachfrage zu decken.



40 Abb. Solarkraftwerk

Die alle möglichen Anwendungen des fluidisierten Sand Prinzipes werden weiter am Institut der Thermodynamik und Energietechnik weiter geforscht. Noch eine mögliche Anwendung der SandTES Anlage ist in Abb. 41 zu sehen. Die überschüssige im Sommer Energie kann langfristig gespeichert werden und für die Fernwärme im Winter genutzt. Weiters kann das Abgas nach der Turbine zur Fluidisierung des Sandes genutzt werden, dadurch wird der thermischen Wirkungsgrad der Anlage erhöht.



41 Abb. GuD Anlage mit SandTES als langfristigen TES

6. Abbildungsverzeichnis

1 Abb. Thermoölkreislauf	7
2 Abb. Signalübertragung Schema.....	11
3 Abb. Control Computer	13
4 Abb. CPU Controller	14
5 Abb. Display Center	16
6 Abb. PID Regler	16
7 Abb. Graphische Oberfläche – Luft.....	18
8 Abb. Gebläse Information	19
9 Abb. Falschluff Schema	20
10 Abb. Drucksensoren/Spülluft Schema	22
11 Abb. Graphische Oberfläche Fördertechnik.....	23
12 Abb. Schaltplan Fördertechnik	25
13 Abb. Controller Karte im "Engine"	26
14 Abb. Struckture Text Programmieren	26
15 Abb. CFC Trenddaten.....	27
16 Abb. Struckture Text Fluidisierungsluft.....	29
17 Abb. Gebläse Not-aus Logik.....	30
18 Abb. Saugzug Not-aus Logik	31
19 Abb. Becherwerk/Schnecken Alarm	32
20 Abb. Auslassschieber Sicherung	33
21 Abb. Sandmassenstrom VID 0019 bei 1450 U/min	35
22 Abb. Sandmassenstrom VID 0021 bei 1450 U/min	36
23 Abb. Düsenwanne mit 4 Düsen	38
24 Abb. Blendenabweichung.....	41
25 Abb. Wärmetauscher Rückstau (Schwaiger).....	42
26 Abb. Rückstau in den Segmenten des WTs.....	44
27 Abb. Druckdifferenz in den Segmenten des WTS.....	45
28 Abb. 3D Diagramm Messergebnisse GID 016	46
29 Abb. 3D Diagramm Messergebnisse GID 017	47
30 Abb. 3D Diagramm Messergebnisse GID 022	48
31 Abb. Druckabfall entlang des WTs (Steiner, 2017).....	49
32 Abb. Sandbettniveau (Oben), Windboxen Druckabfall (Unten)	50
33 Abb. 110g/s Luftmassenstrom 650 rpm der Schnecke.....	51

34 Abb. 130g/s Luftmassenstrom 850 rpm der Schnecke.....	52
35 Abb. 90g/s Luftmassenstrom 450 rpm der Schnecke.....	52
36 Abb. Ducksensor Schaltplan	54
37 Abb. Messsonde	55
38 Abb. Mitgerissene Sand in der Abluftrohleitung.....	56
39 Abb. Nasser Sand beim Schauglass.....	57
40 Abb. Solarkraftwerk.....	60
41 Abb. GuD Anlage mit SandTES als langfristigen TES.....	61

7. Tabellenverzeichnis

1 Tabelle Schnecken Sandmassenstrom.....	37
2 Tabelle, Drucksensoren Position	39
3 Tabelle, Drucksensoren Rotation.....	39
4 Tabelle, Druckabfall in den Düsenboxen	40
5 Tabelle GID 16 Rückstau Silo1 nach Silo2	43
6 Tabelle GID 17 Rückstau Silo2 nach Silo1	45

8. Literatur

br-automation. (kein Datum). Von <https://www.br-automation.com/de-at/unternehmen/presse/aprol-gewahrleistet-hochverfuegbarkeit-auf-allen-ebenen/> abgerufen

Gmbh, B. (2010). PDF APROL Operatorverwaltung TM812.

Letcher, T. (2016). *Soring Energy*.

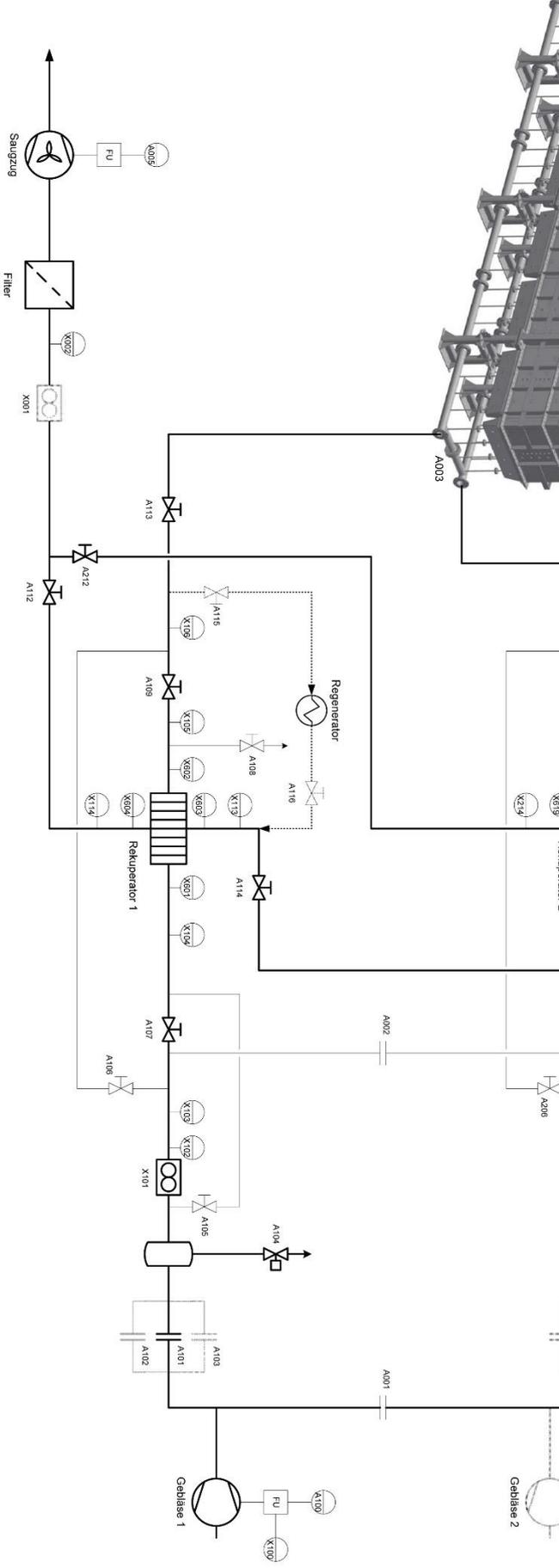
Müller, W. (2008). *Prozessleittechnik*.

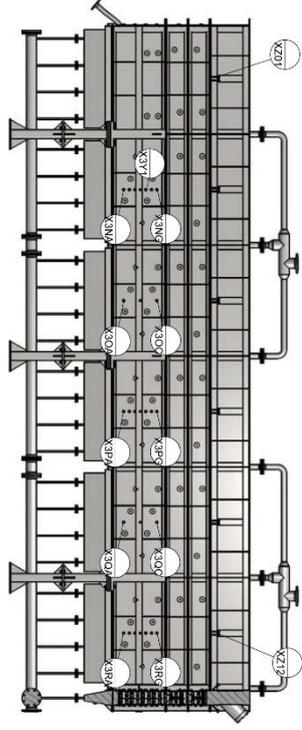
Schwaiger, D.-I. K. (n.d.). *Development of a Novel Particle Reactor/Heat-Exchanger Technology for Thermal energy Storages*. TU Wien.

Steiner, P. (2017). *Experimental Investigations on a 280 kWth Fluidized Bed Heat Exchanger*. Wien.

TASK, F. E. (February 2013).

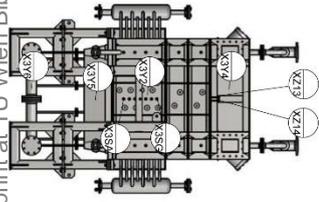
http://www.eurel.org/home/TaskForces/Documents/EUREL-PV2040-Short_Version_Web.pdf.



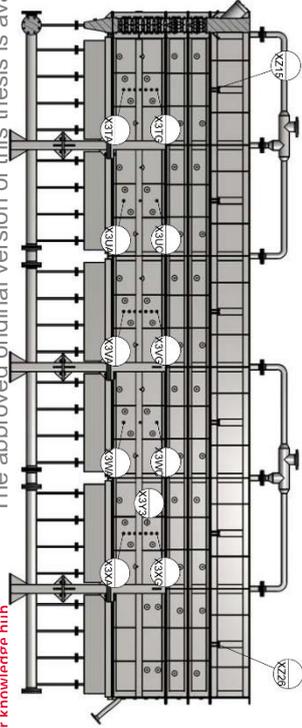


Linke Seite

Abwicklung Innen



Rechte Seite



- X301
- X302
- X303
- X304
- X305
- X306
- X307
- X308
- X309
- X310
- X311
- X312
- X313
- X314
- X315
- X316
- X317
- X318
- X319
- X320
- X321
- X322
- X323
- X324
- X325
- X326
- X327
- X328
- X329
- X330
- X331
- X332
- X333
- X334
- X335
- X336
- X337
- X338
- X339
- X340
- X341
- X342
- X343
- X344
- X345
- X346
- X347
- X348
- X349
- X350
- X351
- X352
- X353
- X354
- X355
- X356
- X357
- X358
- X359
- X360
- X361
- X362
- X363
- X364
- X365
- X366
- X367
- X368
- X369
- X370
- X371
- X372
- X373
- X374
- X375
- X376
- X377
- X378
- X379
- X380
- X381
- X382
- X383
- X384
- X385
- X386
- X387
- X388
- X389
- X390
- X391
- X392
- X393
- X394
- X395
- X396
- X397
- X398
- X399
- X400
- X401
- X402
- X403
- X404
- X405
- X406
- X407
- X408
- X409
- X410
- X411
- X412
- X413
- X414
- X415
- X416
- X417
- X418
- X419
- X420
- X421
- X422
- X423
- X424
- X425
- X426
- X427
- X428
- X429
- X430
- X431
- X432
- X433
- X434
- X435
- X436
- X437
- X438
- X439
- X440
- X441
- X442
- X443
- X444
- X445
- X446
- X447
- X448
- X449
- X450
- X451
- X452
- X453
- X454
- X455
- X456
- X457
- X458
- X459
- X460
- X461
- X462
- X463
- X464
- X465
- X466
- X467
- X468
- X469
- X470
- X471
- X472
- X473
- X474
- X475
- X476
- X477
- X478
- X479
- X480
- X481
- X482
- X483
- X484
- X485
- X486
- X487
- X488
- X489
- X490
- X491
- X492
- X493
- X494
- X495
- X496
- X497
- X498
- X499
- X500