Diplomarbeit

Direkt holzstaubgefeuerte Gasturbine: Optimierung des Brennstofffördersystems für unterschiedliche Brennstoffarten

ausgeführt am Institut für Thermodynamik und Energiewandlung der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard WILLINGER und Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz WINGELHOFER

> durch Dunach Lagalante, Marc Matr.Nr.: 0527884 Simmeringer Hauptstraße 143/325/2 A - 1110 Wien

Wien, im Oktober 2006

Vorwort

Ich möchte mich bei Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz WINGELHOFER für die Betreuung bei der Durchführung dieser Diplomarbeit herzlich bedanken. Aufgrund seiner bisherigen Forschungsarbeiten an der direkt holzstaubgefeuerten Gasturbinenanlage konnte er mich ausgezeichnet beraten und leiten.

Danken möchte ich auch meiner Schwester, meinen Freunden und Studienkollegen, da Sie mich immer motiviert haben, mein Studium zu beenden.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern Oriol DUNACH und Elena LAGALANTE, die mir mein Studium finanziell erst ermöglichten und mich immer wieder unterstützt haben.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung des Brennstofffördersystems der direkt holzstaubgefeuerten Gasturbinenanlage des Institutes für Thermodynamik und Energiewandlung der Technischen Universität Wien. Das Brennstofffördersystem muss den Brennstoffmassenstrom mit möglichst hoher Gleichmäßigkeit und geringen Schwankungen über die Förderleitung der Brennkammer zuführen.

Die Förderschnecke dient zur Dosierung des mittleren Brennstoffmassenstroms. Um einen gleichmäßigen Brennstoffmassenstrom zu erreichen, arbeitet kurz nach der Förderschnecke eine Schwingrinne, die die Schwankungen ausreichend reduziert.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die Förderschnecke und die Schwingrinne, die den Brennstoffmassenstrom dosieren und vergleichmäßigen, durch Vorgabe von verschiedenen Drehzahlen beziehungsweise Widerständen untersucht. Um die bestmögliche Abstimmung von Förderschnecke und Schwingrinne zu erhalten, wurde die Amplitude der Schwingrinne durch Vorgabe eines Widerstandes bei unterschiedlichen Drehzahlen der Förderschnecke variiert. Jene Amplitude der Schwingrinne, bei der der Brennstoffmassenstrom am gleichmäßigsten von der Schwingrinne fällt – ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten –, wird dabei als optimal angesehen. Die Drehzahlen umfassen den Bereich von 5 bis 20 U/min (5, 10, 15 und 20 U/min).

Im zweiten Teil wird die Fördergrenze (maximale Beladung) für verschiedene Drücke im Zyklon (1, 1.5, 2 und 2.5 bar) ermittelt. Die Beladung ist das Verhältnis des Brennstoffmassenstroms zum Förderluftmassenstrom. Je höher der Druck im Zyklon desto niedriger die maximale Beladung, die der Fördergrenze entspricht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	1.1 Holzstaub	1
	1.1.1 Definition von Biomasse	1
	1.1.2 Umwandlungsmethoden der Biomasse zu Energie	1
	1.1.3 Biomasse als Energiequelle	2
	1.1.4 Vorteile der Biomasse als Energiequelle	3
	1.2 Direkt holzstaubgefeuerte Gasturbine	4
	1.3 Bestimmung der Korngöße	9
2	Kalibrierung der Schwingrinne und der Förderschnecke	10
	2.1 Versuchsablauf	10
	2.2 Kalibrierung bei 10 U/min	13
	2.3 Zusammenfassung der Messdaten für Buche	17
	2.4 Zusammenfassung der Messdaten für Fichte	21
3	Förderbetrieb	25
	3.1 Versuchsablauf	25
	3.2 Förderung bei 1.5 bar	28
	3.3 Zusammenfassung der Messdaten	31
4	Zusammenfassung	34
5	Literaturverzeichnis	35
6	Beilage	36

Abbildungsverzeichnis

1.2.1 Anlagenschaltbild	5
1.2.2 Brennstofffördersystem (I)	6
1.2.3 Brennstofffördersystem (II)	6
1.2.3 Brennstofffördersystem (III)	7
1.3.1 Durchgangssummenkurve der Holzsorten Buche und Fichte	9
2.1.1 Versuch bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	12
2.2.1 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 0 \text{ k}\Omega$	13
2.2.2 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 10 \text{ k}\Omega$	13
2.2.3 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 20 \text{ k}\Omega$	14
2.2.4 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 25 \text{ k}\Omega$	15
2.2.5 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 30 \text{ k}\Omega$	15
2.2.6 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 35 \text{ k}\Omega$	15
2.2.7 Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 40 \text{ k}\Omega$	16
2.3.1 Variationskoeffizient V abhängig vom Widerstand R_{S4} für Drehzahlen von	
5, 10, 15 und 20 U/min	18
2.3.2 Kennlinie der Förderschnecke	19
2.3.3 Widerstand R_{S4} und Variationskoeffizient V abhängig vom mittleren	
Brennstoffmassenstrom μ_B	20
2.4.1 Variationskoeffizient V abhängig vom Widerstand R_{S4} für Drehzahlen von	
5, 10, 15 und 20 U/min	21
2.4.2 Kennlinie der Förderschnecke	22
2.4.3 Widerstand R_{S4} und Variationskoeffizient V abhängig vom mittleren	
Brennstoffmassenstrom $\mu_{B_{\dots}}$.	23
3.1.1 Regelventil für die Förderluft	26
3.1.2 LabVIEW bei Förderbetrieb (I), Brennstoffförderanlage	27
3.1.3 LabVIEW bei Förderbetrieb (II), Gesamtanlage	27
3.2.1 Beladung B abhängig von Zeit	29
3.2.2 Druck im Zyklon P_Z abhängig von Zeit	29
3.2.3 Druck im Sendebehälter P_{SI} abhängig von Zeit	30
3.3.1 Maximale Beladung <i>B</i> abhängig vom Druck im Zyklon P_Z	31
3.3.2 Förderleitung	32

Buche:

A.1 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	36
A.2 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	36
A.3 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	37
A.4 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	37
A.5 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	38
A.6 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	38
A.7 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	39
A.8 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	40
A.9 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	40
A.10 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	41
A.11 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	41
A.12 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	42
A.13 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	42
A.14 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	43
A.15 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	44
A.16 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	44
A.17 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	45
A.18 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	45
A.19 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	46
A.20 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	46
A.21 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	47

Fichte:

B.1 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	48
B.2 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	48
B.3 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	49
B.4 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	49
B.5 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	50
B.6 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	50
B.7 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	51
B.8 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	52
B.9 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	52
B.10 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	53
B.11 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	53

B.12 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	54
B.13 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	54
B.14 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	55
B.15 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	56
B.16 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	56
B.17 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	57
B.18 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	57
B.19 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	58
B.20 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	58
B.21 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	59
B.22 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω	60
B.23 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω	60
B.24 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω	61
B.25 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω	61
B.26 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω	62
B.27 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω	62
B.28 Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω	63

Tabellenverzeichnis

1.3.1 Siebanalyse der Holzsorten Buche und Fichte	8
2.2.1 Messwerte bei 10 U/min	13
2.3.1 Mittelwert des Variationskoeffizienten bei 5, 10, 15 und 20 U/min (Buche)	16
2.3.2 Mittelwert des Brennstoffmassenstroms μ_B beim minimalen Variationskoeffizienten (Buche)	16
2.4.1 Mittelwert des Variationskoeffizienten bei 5, 10, 15 und 20 U/min (Fichte)	20
2.4.2 Mittelwert des Brennstoffmassenstroms μ_B beim minimalen Variationskoeffizienten (Fichte)	20
3.1.1 Ansteuerung der Schwingrinne	25
3.2.1 Brennstoffmassenstrom und Beladung bei 1.5 bar im Zyklon	27
3.3.1 Fördergrenze der Förderversuche bei 1, 1.5, 2 und 2.5 bar	30

Buche:

A.1 Messwerte bei 5 U/min	39
A.2 Messwerte bei 15 U/min	43
A.3 Messwerte bei 20 U/min	47

Fichte:

B.1 Messwerte bei 5 U/min	51
B.2 Messwerte bei 10 U/min	55
B.3 Messwerte bei 15 U/min	59
B.4 Messwerte bei 20 U/min	63

Formelzeichen

\dot{m}_B	[kg/h]	Brennstoffmassenstrom
$\dot{m}_{B,\max}$	[kg/h]	maximaler Brennstoffmassenstrom
V	[%]	Variationskoeffizient
\overline{V}	[%]	mittlerer Variationskoeffizient
$\mu_{\scriptscriptstyle B}$	[kg/h]	mittlerer Brennstoffmassenstrom
$\sigma_{\scriptscriptstyle B}$	[kg/h]	Standardabweichung des Brennstoffmassenstroms
n_{S3}	[U/min]	Drehzahl der Förderschnecke
R_{S4}	$[k\Omega]$	Widerstand der Schwingrinne
В	[-]	Beladung
$B_{\rm max}$	[-]	maximale Beladung
\dot{m}_{FL}	[kg/h]	Förderluftmassenstrom
\dot{V}_{FL}	[m ³ /h]	Förderluftvolumenstrom
W_{FL}	[m/s]	Geschwindigkeit der Förderluft
$ ho_{\scriptscriptstyle FL}$	$[kg/m^3]$	Dichte der Förderluft
$p_{\scriptscriptstyle FL}$	[bar]	Druck der Förderluft
T_{FL}	[K]	Temperatur der Förderluft
A_{FL}	[m ²]	Querschnittsfläche der Förderleitung
R	[J/kg·K]	Gaskonstante
p_Z	[bar]	Druck im Zyklon
p_{S1}	[bar]	Druck im Sendebehälter
t	[s]	Zeit

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Holzstaub

Vor seiner Benutzung als Brennstoff muss Holz ein Teil seiner Feuchtigkeit entzogen werden. Dieser Anteil hängt im Wesentlichen von seinem Einsatz ab. Das Trocknen ist ein grundlegender Arbeitsgang, der nicht nur hinsichtlich des Energieaufwandes, sondern auch in Hinsicht auf die verlangte erzielbare Qualität, der Schnelligkeit und der Umweltbelastung optimiert sein muss. Holz ist eine Biomasse, die reich an Kohlenwasserstoffen ist, und zu den Quellen der erneuerbaren Energien gehört. Seine Energieumwandlung kann nicht nur durch die direkte Verbrennung, sondern auch durch die Produktion gasförmiger Brennstoffe erfolgen. Mit Hilfe von Gasturbinen oder Gasmotoren kann aus diesen gasförmigen Brennstoffen elektrischer Strom erzeugt werden.

1.1.1 Definition von Biomasse

Biomasse ist ein fester oder flüssiger organischer Stoff sowie dessen Umwandlungsprodukte, die zur Gewinnung von Strom geeignet sind und nachfolgend als Bioenergieträger bezeichnet werden.

1.1.2 Umwandlungsmethoden der Biomasse zu Energie [5] [6]

Thermochemische Methoden:

Allen thermochemischen Methoden eigen ist das Auftreten hoher Temperaturen. Typische Beispiele sind die energetische Nutzung von Stroh und Holz.

* **Die Verbrennung**, Oxidation der Biomasse durch den Sauerstoff der Luft, entlässt einfach nur Wasser und CO₂, und wird in Heizungsanlagen genutzt. Bei der Verbrennung wird die in den organischen (brennbaren) Bestandteilen des Brennstoffes gebundene chemische Energie durch Oxidation mit Sauerstoff in Wärme umgewandelt. Die anorganischen (nicht brennbaren) Bestandteile des Brennstoffes finden sich in Form von Asche wieder. * **Die Pyrolyse**, unvollendete Verbrennung der Biomasse in Abwesenheit von Sauerstoff, wird seit Jahren für die Produktion der Holzkohle verwendet. Die Pyrolyse entlässt außerdem ein Gas, das einen geringen Heizwert hat. Es besteht aus einer Mischung von CO, CO₂, Wasserstoff und Kohlenwasserstoff und wird deswegen in Gasmotoren zur Stromproduktion genutzt.

Biologische Methoden:

* Die alkoholische Fermentation, die seit langem bei Zucker angewendet wird, kann auch mit Zellulose und Stärke durch eine vorhergehende Hydrolyse genutzt werden. Die Destillation, die fast reinen Ethylalkohol ergibt, braucht eine große Menge Energie. Unter diesen Bedingungen hat die Umwandlung von Biomasse zu Ethanol und die spätere Nutzung dieses Alkohols in Benzinmotoren eine zweifelhafte Gesamtenergiebilanz. Länder wie Brasilien oder die Vereinigten Staaten von Amerika betreiben trotzdem wichtige Forschungsprojekte zur Ethanolproduktion aus Biomasse für die Verwendung in Fahrzeugen.

* Die **methanische Fermentation** ist die anaerobe Verdauung der Biomasse durch Bakterien. Sie ist für die Umwandlung der feuchten Biomasse mit mehr als 75% relativer Feuchtigkeit gut geeignet.

1.1.3 Biomasse als Energiequelle [4]

Biomasse ist die älteste Energiequelle der Menschheit. Seit vielen tausend Jahren nutzt die Menschheit Biomasse als Energieträger. In Form von Holz war sie lange Zeit das wichtigste Material zum Heizen und Kochen, bis Kohle, Erdöl und Erdgas sie ersetzten. Weltweit ist die Biomasse der wichtigste erneuerbare Energieträger. Noch heute werden in Asien durchschnittlich sieben Prozent des Primärenergieverbrauchs durch Brennholz gedeckt, in Lateinamerika zehn Prozent und in Afrika schätzungsweise 40 Prozent, was allerdings teilweise fatale Folgen für die Waldbestände und Böden der betreffenden Länder hat.

Ganz im Gegensatz zu der Energie, die aus Kohle und Erdöl stammt, ist die von der Biomasse erhaltene Energie erneuerbar. Sie ist auch speicherbar (Gegenteil zu Wind- und Sonnenenergie), besitzt einen hohen Wirkungsgrad und ist immer dann verfügbar, wenn sie benötigt wird.

1.1.4 Vorteile der Biomasse als Energiequelle

Die Verwendung von Biomasse bietet mehrere Vorteile:

* CO₂-neutral. Bei der Verbrennung von Biomasse wird nur jene Menge CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt, die zuvor von der Pflanze aus der Atmosphäre entnommen wurde.

* Keine Stickstoff- und Schwefelschadstoffe werden in die Atmosphäre freigesetzt.

* Ein Teil der Biomasse, die mit Energiezweck genutzt wird, stammt von Abfallprodukten. So wird ein Abfallprodukt zur Energieressource umgewandelt.

* Die vermehrte Nutzung einheimischer Energieträger wie Holz vermindert die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und verschafft Bewegungsfreiheit bei Energiekrisen und Preissteigerungen.

* Sie birgt keine unkontrollierbaren Risiken wie die Atomenergie.

* Land- und Forstwirte stellen oftmals nicht nur den Energieträger Biomasse bereit. Sie treten auch als Betreiber von Biomasse-Heizwerken auf. Hier und durch den vermehrten Absatz für bislang ungenutzte Reststoffe der Holzindustrie entstehen neue Beschäftigungsfelder und Einkommensquellen. Dies hilft Arbeitsplätze zu erhalten und stärkt die ländliche Struktur. [7]

1.2 Direkt holzstaubgefeuerte Gasturbinenanlage [3]

Das Institut für Thermodynamik und Energiewandlung der Technischen Universität Wien arbeitet seit mehreren Jahren an einem Prototyp einer direkt holzstaubgefeuerten Gasturbinenanlage. Eine Kleingasturbine mit einer Nominalleistung von 80 kW, soll mit Holzstaub oder feinen Holzspänen betriebt werden (Abbildung 1.2.1).

Bei der Entwicklung des Fördersystems für den Brennstoff Holz ist dabei auf folgende Punkte insbesonders geachtet worden:

* Förderungsmöglichkeit von möglichst allen Holzsorten unterschiedlicher Größe - vom feinsten Holzstaub bis hin zu feinen Sägespänen -, wobei der Wassergehalt des Brennstoffes Holz einen überaus wichtigen Einfluss hat.

* Möglichst genaue Dosierbarkeit der Brennstoffmenge, da sonst ein Synchronisieren des von der Gasturbine angetriebenen Generators mit dem Stromnetz erschwert bzw. sogar unmöglich ist.

* Möglichst gleichmäßige Brennstoffförderung für eine gleichmäßige thermische und mechanische Belastung besonders der heißgasführenden Anlagenteile (Brennkammer, Axialzyklon, Heißgasleitung und Turbine).

* Möglichst geringer Förderluftmassenstrom, um die Energieumsetzung des Brennstoffes in der Brennkammer so wenig wie möglich zu stören und um die Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht zu beeinträchtigen.



Abbildung 1.2.1: Anlagenschaltbild

Das Brennstofffördersystem (Abbildungen 1.2.2 und 1.2.3) besteht im wesentlichen aus einem druckaufgeladenen Sendebehälter, der auch als Vorratsbehälter dient und aus dem der Brennstoff entnommen wird, einer Förderschnecke zur genauen Dosierung der Brennstoffmenge, einer Schwingrinne zur Vergleichmäßigung des Brennstoffmassenstroms, die die auftretenden Schwankungen bedeutend verringert, und einem Injektor. Im Injektor wird die Förderluft gleichmäßig mit Brennstoff beladen, wodurch der Brennstoff in die druckaufgeladene Brennkammer gefördert werden kann. [1] [2]





Abbildung 1.2.3: Brennstofffördersystem (II)



Abbildung 1.2.4: Brennstofffördersystem (III)

Durch das Rührwerk am Boden des Sendebehälters wird der Schneckenabzug am Behälterauslass gleichmäßig mit Material gefüllt. Der Brennstoffmassenstrom wird über die Drehzahl der Dosierschnecke eingestellt. Eine Schwingrinne wird verwendet, um Massenstromschwankungen der Förderschnecke zu dämpfen. Der von der Schwingrinne abgeworfene Brennstoff fällt durch ein Fallrohr in den Trichter des Injektors. Primärluft beschleunigt den Feststoff in die Förderleitung zur Brennkammer. Die Sekundärluft, die am Boden der Schwingrinne zugeführt wird, unterstützt die Strömung des Brennstoffes im Fallrohr und Injektor. Nachdem der Brennstoff aus dem Behälter aufgebraucht worden ist, wird die Anlage zur neuerlichen Befüllung drucklos gemacht.

In der druckaufgeladenen Brennkammer wird der Brennstoff Holz in zwei Schritten verbrannt. In der ersten Stufe, der so genannten Primärbrennkammer, wird der Brennstoff unter Luftmangel autotherm, d.h. ohne Wärmezufuhr von außen, in einer Drallbrennkammer vergast. Drallbrennkammern weisen eine hohe spezifische Wärmefreisetzung auf, wodurch

das Brennkammervolumen klein gehalten werden kann. Da größere Brennstoffteilchen im Vergleich zu kleineren Brennstoffteilchen länger in der Drallbrennkammer bleiben, können sowohl feine als auch grobe Holzteilchen (Holzstaub beziehungsweise feine Sägespäne) vollständig ausgasen. Das entstandene Produktgas wird in der zweiten Stufe, der so genannten Sekundärbrennkammer, zunächst mit Luft vermischt und anschließend unter Luftüberschuss verbrannt. Um die zulässigen Temperaturen der heißgasführenden Anlagenteile nicht zu überschreiten, wird am Austritt der druckaufgeladenen Brennkammer noch 'kühle' Luft mit etwa 400 K zugemischt. Durch die gestufte Verbrennung des Brennstoffes Holz kann sowohl die Bildung von NO_x weitestgehend vermieden als auch ein vollständiger Ausbrand (unverbrannte HC, CO) realisiert werden. Um Asche und Verunreinigungen aus dem Heißgas zu entfernen, wurde ein Axialzyklon für die speziellen Bedürfnisse dieser Anlage - die Temperatur des Heißgases beträgt aus Rücksicht auf die Heißgasleitung und Mikrogasturbine etwa 1120 K - ausgelegt. Im Vergleich zu Radialzyklone verursachen Axialzyklone einen geringeren Druckverlust.

Mit dem mit LabVIEW entwickelten Steuerungs- und Messdatenerfassungsprogramm, das von Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Wingelhofer entwickelt worden ist, ist es möglich, die gesamte Anlage vom PC aus zu überwachen und zu bedienen. Es werden im Sekundenabstand etwa 115 verschiedene Messwerte erfasst, verarbeitet, dargestellt und für spätere Auswertungen mitgeschrieben. Die Steuerung und Regelung der Gesamtanlage erfolgt mit mehr als 15 Ausgangssignalen, die in den angesteuerten Geräten entsprechend umgesetzt werden (z.B. Drehzahl der Förderschnecke, Amplitude der Schwingrinne, Position von Regelventilen). Sämtliche Eingaben und Warnhinweise werden laufend mitgeschrieben.

1.3 Bestimmung der Korngröße

Zur Bestimmung der Korngröße ist eine Korngrößeanalyse, d.h. eine Siebanalyse nach *DIN* 66165, gemacht worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1.3.1 und in Abbildung 1.3.1 dargestellt.

	Durchgangssumme [%] der Holzsorte		
Maschenweite [mm]	Buche	Fichte	
0,063	0,00	0,00	
0,125	0,00	0,32	
0,25	0,01	0,87	
0,5	0,76	11,73	
0,71	3,93	35,10	
1,0	13,15	98,07	
1,4	49,49	100,00	
2,0	92,43	100,00	
4,0	100,00	100,00	

Tabelle 1.3.1: Siebanalyse der Holzsorten Buche und Fichte



Abbildung 1.3.1: Durchgangssummenkurve der Holzsorten Buche und Fichte

Kapitel 2

Kalibrierung der Schwingrinne und der Förderschnecke

2.1 Versuchsablauf

Mit dem Steuerungs- und Messdatenerfassungsprogramm ist es möglich, verschiedene Größen vorzugeben und andere zu messen. Bei der Kalibrierung der Schwingrinne und der Förderschnecke werden die Schneckendrehzahl n_{S3} [U/min] und der Widerstand der Schwingrinne R_{S4} [k Ω] vorgegeben, um den Brennstoffmassenstrom \dot{m}_B zu ermitteln und daraus den Variationskoeffizienten V zu berechnen. Der Variationskoeffizient V ist der Quotient aus Standardabweichung σ_B und Mittelwert μ_B :

$$V = \frac{\sigma_B}{\mu_B} \quad [100\%].$$

Der Mittelwert μ_B und die Standardabweichung σ_B einer Messreihe mit n Messungen (i = 1....n) werden aus den Istwerten der Brennstoffmassenströme \dot{m}_i berechnet:

$$\mu_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{m}_i$$

und

$$\sigma_{B} = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\dot{m}_{i} - \mu_{B})^{2}}$$
.

Zur Bestimmung der Istwerte der Brennstoffmassentröme \dot{m}_i werden die in den Zeitintervallen Δt_i dosierten Mengen Δm_i gemessen:

$$\dot{m}_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}$$

Bei diesen Versuchen werden der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B und der Variationskoeffizient *V* des Brennstoffmassenstroms nach der Schwingrinne untersucht. Die Waage des Typs KC-600 der Firma *Mettler Toledo*, die auf dem Messprinzip der

elektromagnetischen Kraftkompensation beruht, wird unterhalb des Austritts der Schwingrinne positioniert. Der geförderte Brennstoffmassenstrom wird in einem auf der Waage platzierten Behälter mit einem Volumen von 0,1 m³ aufgenommen.

Bei jedem Versuch wird zunächst die Schneckendrehzahl (5, 10, 15 und 20 U/min) vorgegeben. Danach wird der Widerstand der Schwingrinne auf 0 k Ω gesetzt. Durch LabVIEW wird der ganze Versuch online ausgewertet. Man beendet die Messung, wenn der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B für ungefähr 2 Minuten konstant war. Danach wird der Widerstand der Schwingrinne auf 10 k Ω erhöht und weiter gefördert. Bei jeder Drehzahl wird mit 7 verschiedenen Widerstandswerten (0, 10, 20, 25, 30, 35 und 40 k Ω) gearbeitet. Alle Messdaten werden von LabVIEW mitgeschrieben, um sie später auszuwerten und grafisch darzustellen.

Am Ende der Versuche werden alle Messdaten grafisch dargestellt, indem man für jede Schneckendrehzahl und jeden Widerstand der Schwingrinne den Variationskoeffizient V in Abhängigkeit der Zeit [s] darstellt. Um es möglichst exakt und gleichmäßig zu machen, wird bei jeder Schneckendrehzahl und jedem Widerstand mit den Messdaten einer Minute gearbeitet. Von dieser Minute werden der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B und der mittlere Variationskoeffizient \overline{V} berechnet. Am Ende liegen also für jede Schneckendrehzahl der mittlere Brennstoffmassenstrom und der mittlere Variationskoeffizient für 7 verschiedene Widerstände der Schwingrinne vor.

Wird der mittlere Brennstoffmassenstrom über der Schneckendrehzahl dargestellt, so erhält man die Kennlinie der Förderschnecke. Diese Kennlinie ist linear, d.h. der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B ist proportional zur Schneckendrehzahl n_{S3} (Abbildung 2.3.2).

Für jede Schneckendrehzahl wird der Variationskoeffizient abhängig vom Widerstand der Schwingrinne grafisch dargestellt. Auf diese Weise kann man überprüfen, mit welchem Widerstand die niedrigsten Schwankungen erhalten werden (Abbildung 2.3.1).

Die Schneckendrehzahl wird durch einen P-Regler geregelt, die Schwingrinne nur gesteuert.



Abbildung 2.1.1: Versuch bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω

Abbildung 2.1.1 stellt beispielhaft den Versuch bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω dar. Es sind der Mittel- und der Istwert des Brennstoffmassenstroms sowie der Ist- und der Sollwert der Schneckendrehzahl grafisch dargestellt. Gut erkennbar ist die durch die Schwingrinne verursachte Totzeit Δt als zeitlicher Verzug zwischen der Ist- Schneckendrehzahl und dem Ist-Brennstoffmassenstrom. Diese beträgt etwa 10÷15 Sekunden.

2.2 Kalibrierung bei 10 U/min

Stellvertretend für alle anderen Versuche zur Kalibrierung der Förderschnecke und der Schwingrinne werden die Versuche für den Brennstoff Buche bei einer Schneckendrehzahl von 10 U/min gezeigt. Der Widerstand R_{S4} wird von 0 bis 40 k Ω variiert. (Abbildungen 2.2.1 bis 2.2.7):



Abbildung 2.2.1: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 0 k\Omega$



Abbildung 2.2.2: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 10 \ k\Omega$



Abbildung 2.2.3: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 20 \ k\Omega$



Abbildung 2.2.4: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 25 \ k\Omega$



Abbildung 2.2.5: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 30 \ k\Omega$



Abbildung 2.2.6: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 35 k\Omega$



Abbildung 2.2.7: Variationskoeffizient über der Zeit bei $R_{S4} = 40 \ k\Omega$

Die in den Diagrammen dargestellten Pfeile bezeichnen die Minute, in der die Messwerte ausgewertet werden. Die Minute wurde dabei so gewählt, dass bereits ein stationärer Betrieb vorliegt.

Mit den Werten dieses Versuches erhält man Tabelle 2.2.1.

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>₩</i> [%]	maximales V [%]	minimales \dot{m}_{B} [kg/h]	μ _в [kg/h]	maximales \dot{m}_{B} [kg/h]
0	33,88	37,23	40,94	105,43	108,74	111,04
10	28,53	31,55	34,77	106,36	108,86	110,41
20	22,42	26,05	28,66	106,36	109,04	111,53
25	23,38	26,98	30,21	105,32	108,57	110,20
30	20,76	22,85	25,64	105,06	107,89	109,96
35	17,89	23,28	27,61	105,43	108,09	109,83
40	24,08	28,11	32,24	105,62	107,91	109,63

Tabelle 2.2.1: Messwerte bei 10 U/min

2.3 Zusammenfassung der Messdaten für Buche

Nach der gleichen Methode, die in Kapitel 2.2 benutzt wurde, werden auch die Messwerte der restlichen Schneckendrehzahlen (5, 15 und 20 U/min) ausgewertet. Man erhält Tabelle 2.3.1.

<i>R_{s4}</i> [kΩ]	\overline{V} [%] [5 U/min]	\overline{V} [%] [10 U/min]	\overline{V} [%] [15 U/min]	\overline{V} [%] [20 U/min]
0	44,22	37,23	25,34	25,74
10	44,88	31,55	28,94	22,73
20	37,72	26,05	25,82	22,93
25	38,10	26,98	22,60	22,87
30	32,04	22,85	14,41	21,07
35	25,60	23,28	22,77	24,59
40	25,98	28,11	24,58	20,50

Tabelle 2.3.1: Mittelwert des Variationskoeffizienten bei 5, 10, 15 und 20 U/min (Buche)

Die Schwingrinne wird zur Vergleichmäßigung des Brennstoffmassenstroms verwendet. Sie verringert bedeutend die auftretenden Schwankungen, sofern die Amplitude auf die Brennstoffmenge aufgepasst ist. Trägt man für jede Drehzahl den mittleren Variationskoeffizient über dem Widerstand der Schwingrinne auf, so erhält man Abbildung 2.3.1. Der Variationskoeffizient nimmt bei gleichem Widerstand mit zunehmender Schneckendrehzahl stark ab. Bei einem Widerstand von beispielsweise 10 k Ω beträgt dieser bei einer Schneckendrehzahl von 5 U/min beachtliche 45%, bei 20 U/min jedoch nur mehr 23%. Der optimale Widerstand für eine Schneckendrehzahl von 5 U/min liegt bei 35 k Ω , für 10 und 15 U/min bei 30 k Ω und für 20 U/min 40k Ω .



Abbildung 2.3.1: Variationskoeffizient V abhängig vom Widerstand R_{S4} für Drehzahlen von 5, 10, 15 und 20 U/min

Wie in Tabelle 2.3.2 ersichtlich, ist der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B ungefähr 11 Mal proportional zur Schneckendrehzahl, d.h. mit einer Drehzahl von 5 U/min werden 55 kg/h Brennstoff gefördert. Dieses Verhältnis ist unabhängig vom Widerstand R_{S4} der Schwingrinne. Wichtig ist es anzumerken, dass je größer die Drehzahl der Förderschnecke desto niedriger ist der Variationskoeffizient. Die optimale Amplitude der Schwingrinne, bei der der Variationskoeffizient V minimal ist, ist vom mittleren Massenstrom μ_B abhängig. Bei einer geringeren oder größeren Amplitude steigen die Massenstromschwankungen an.

<i>п</i> _{S3} [U/min]	<i>R</i> _{S4} [kΩ]	<i>₩</i> [%]	μ _B [kg/h]
0	35	0	0
5	35	25,60	55,26
10	30	22,85	107,89
15	30	14,41	156,91
20	40	15,55	204,12

Tabelle 2.3.2: Mittelwert des Brennstoffmassenstroms μ_B beim minimalenVariationskoeffizienten (Buche)



Abbildung 2.3.2: Kennlinie der Förderschnecke

Abbildung 2.3.2 zeigt die Kennlinie der Förderschnecke. Die wird durch die Abhängigkeit des mittleren Massenstromes μ_B von der Schneckendrehzahl n_{S3} definiert. Die Linearität der Kennlinie zeigt, dass der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B proportional zur Schneckendrehzahl n_{S3} ist. Dieser Proportionalitätsfaktor beträgt

$$10.388 \frac{(kg/h)}{(U/\min)}$$

beziehungsweise

$$10.388 \frac{\left(\frac{kg}{h}\right)}{\left(\frac{U}{\min}\right) \cdot 60\left(\frac{\min}{h}\right)} = 0.173(kg/U) \,.$$

Die beiden Pfeile in Abbilung 2.3.2 zeigen die Berechnung des Vorgabewertes für die Schneckendrehzahl bei festgelegtem mittlerem Brennstoffmassenstrom.

Das Messdatenerfassungs- und Steuerungsprogramm verlangt einen Zusammenhang zwischen Widerstand R_{S4} und Brennstoffmassenstrom. Aus diesem Grund werden die Widerstände, bei denen die kleinsten Schwankungen auftreten und die mittleren Brennstoffmassenströme gegeneinander aufgetragen (Abbildung 2.3.3).



Abbildung 2.3.3: Widerstand R_{S4} und Variationskoeffizient V abhängig vom mittleren Brennstoffmassenstrom μ_B

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	\overline{V} [%] [5 U/min]	\overline{V} [%] [10 U/min]	<i>ୖ</i> ୕୕୕୕ୄୄୗ [%] [15 U/min]	<i>॑</i>
0	71,39	46,54	33,22	33,98
10	65,68	38,77	37,45	35,41
20	58,14	39,28	36,41	34,69
25	50,25	39,86	35,25	36,65
30	47,03	39,12	35,58	35,32
35	41,97	40,26	35,22	35,38
40	43,76	35,78	36,93	35,94

2.4 Zusammenfassung der Messdaten für Fichte

Tabelle 2.4.1: Mittelwert des Variationskoeffizienten bei 5, 10, 15 und 20 U/min (Fichte)



Abbildung 2.4.1: Variationskoeffizient V abhängig vom Widerstand R_{S4} für Drehzahlen von 5, 10, 15 und 20 U/min

n _{s3} [U/min]	<i>R</i> _{S4} [kΩ]	<i>V</i> [%]	μ _B [kg/h]
0	35	0	0
5	35	41,97	47,17
10	40	35,78	94,86
15	0	33,22	137,51
20	0	33,98	180,97

Tabelle 2.4.2: Mittelwert des Brennstoffmassenstroms μ_B beim minimalenVariationskoeffizienten (Fichte)



Abbildung 2.4.2: Kennlinie der Förderschnecke

Abbildung 2.4.2 zeigt die Kennlinie der Förderschnecke für den Brennstoff Fichte. Die wird durch die Abhängigkeit der Schneckendrehzahl n_{S3} vom mittleren Massenstromes μ_B definiert. Die Linearität der Kennlinie beweist, dass der mittlere Brennstoffmassenstrom μ_B auch bei der Fichte proportional zur Schneckendrehzahl n_{S3} ist. Dieser Proportionalitätsfaktor beträgt

$$9.155 \frac{(kg/h)}{(U/\min)}$$

beziehungsweise

$$9.155 \frac{\left(\frac{kg}{h}\right)}{\left(\frac{U}{\min}\right) \cdot 60\left(\frac{\min}{h}\right)} = 0.152(kg/U) \,.$$



Abbildung 2.4.3: Widerstand R_{S4} und Variationskoeffizient V abhängig vom mittleren Brennstoffmassenstrom μ_B

Im Gegensatz zur Förderung des Brennstoffes Buche ist der Variationskoeffizient bei der Förderung von Fichte fast unabhängig vom Widerstand der Schwingrinne R_{S4} . Wie in Abbildung 2.4.3 zu sehen ist, ist der minimale Mittelwert des Variationskoeffizienten auch bei 0 k Ω möglich. Es ist auch auszumerken, dass der Variationskoeffizient weniger stark als bei den Versuchen mit der Buche schwankt. Ab 100 kg/h steht der minimale mittlere Variationskoeffizient zwischen 32.5 und 35.

Kapitel 3

Förderbetrieb

3.1 Versuchsablauf

Die Beladung *B* wird als das Verhältnis des Brennstoffmassenstromes \dot{m}_B zum Förderluftmassenstrom \dot{m}_{FL} definiert:

$$B = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_{FL}}$$

Der geförderte Brennstoff kommt bei diesen Versuchen im Empfangsbehälter an, der am Ende der Förderleitung steht. Diese Förderleitung ist durch einen Bogen mit der Schwingrinne verbunden, so dass der von der Schwingrinne abgegebene Brennstoffmassenstrom durch den Bogen und dann durch die Förderleitung zum Empfangsbehälter kommt.

Bei diesen Versuchen wird der Druck durch ein Druckhalteventil, das nach dem Abscheidezyklon am Ende der Förderleitung angeordnet ist, aufgeprägt. Im Zyklon wird der Feststoff von der Förderluft getrennt und vom Empfangsbehälter aufgenommen. LabVIEW regelt den Luftmassenstrom \dot{m}_{FL} .

Der Brennstoffmassenstrom wird in kleinen Schritten vergrößert, bis man die Fördergrenze erreicht. Die Fördergrenze wird erreicht, wenn der Druck im Sendebehälter P_{S1} , der durch LabVIEW grafisch dargestellt wird, plötzlich ansteigt. Tritt das ein, so ist der Rohrbogen zwischen dem Druckbehälter der Schwingrinne und der Förderleitung verstopft.

Aufgrund von Problemen mit dem oberhalb des Empfangsbehälters angeordneten Abscheidezyklon beim Brennstoff Fichte, werden diese Versuche nur mit dem Brennstoff Buche durchgeführt. Die Messdaten von Kapitel 2 werden hier verwendet, indem die Ansteuerung der Schwingrinne mit den Daten von Kapitel 2 erfolgt.

<i>п</i> _{S3} [U/min]	<i>R</i> _{S4} [kΩ]
0	0
5	40
10	35
15	30
20	40

Tabelle 3.1.1: Ansteuerung der Schwingrinne

Es wird mit 4 verschiedenen Drücken im Zyklon gearbeitet: Umgebungsdruck (ungefähr 1 bar), 1.5, 2 und 2.5 bar. Der Wert des Förderluftmassenstroms \dot{m}_{FL} bleibt während der ganzen Versuche gleich, d.h. nur der Brennstoffmassenstrom wird durch LabVIEW manuell erhöht. Bei jedem Druck wird das erste Mal die Beladung in Schritten von 1 Maßeinheit gesteigert. Das zweite Mal wird die Beladung nochmals in Schritten von 1 Maßeinheit bis in die Nähe der Fördergrenze erhöht. Danach wird mit kleineren Schritten des Brennstoffmassenstroms (5 kg/h) weiter gefördert, um die Fördergrenze genau zu erreichen.



Abbildung 3.1.1: Regelventil für die Förderluft



Abbildung 3.1.2: LabVIEW bei Förderbetrieb (I), Brenstoffförderanlage



Abbildung 3.1.3: LabVIEW bei Förderbetrieb (II), Gesamtanlage
3.2 Förderung bei 1.5 bar

Beispielhaft wird hier die Ermittlung der Fördergrenze bei 1.5 bar gezeigt. Die gleiche Methode wird auch bei den 3 anderen Drücken im Zyklon verwendet. Zunächst wird der Förderluftmassenstrom \dot{m}_{FL} auf 22 kg/h fixiert. Dieser Massenstrom ergibt sich aus der Forderung nach einer minimalen Geschwindigkeit der Förderluft in der Förderleitung von 18 m/s. Dann wird mit dem Druckhalteventil der Druck im Zyklon P_Z auf etwa 1.5 bar eingestellt. Die Temperaturen im Sendebehälter, im Zyklon usw. bleiben konstant.

Tabelle 3.2.1 zeigt den eingestellten Brennstoffmassenstrom und die daraus resultierende Beladung. Die Beladung konnte ohne Probleme hinsichtlich der Förderung bis auf 6.25 erhöht werden. Erst bei einer Beladung von 6.50 bricht die Brennstoffförderung zusammen.

Brennstoffmassenstrom	Beladung
[kg/h]	[-]
22	1.00
44	2.00
66	3.00
88	4.00
95	4.34
102	4.67
110	5.00
117	5.34
124	5.67
132	6.00
137	6.25
144	6.50

Tabelle 3.2.1: Brennstoffmassenstrom und Beladung bei 1.5 bar im Zyklon



Abbildung 3.2.1: Beladung B abhängig von Zeit



Abbildung 3.2.2: Druck im Zyklon Pz abhängig von Zeit



Abbildung 3.2.3: Druck im Sendebehälter P_{S1} abhängig von Zeit

Abbildung 3.2.1 zeigt die Beladung, Abbildung 3.2.2 den Druck im Zyklon und Abbildung 3.2.3 den Druck im Sendebehälter aufgetragen über der Zeit.

Während der Druck im Sendebehälter mit zunehmender Beladung ansteigt, bleibt er im Zyklon nahezu gleich. Bis zu einer Beladung von 6.25 erfolgt die Förderung problemlos. Erst bei einer Beladung von 6.50 und nach etwa 120 Sekunden bricht die Förderung schlagartig zusammen: Der Druck im Sendebehälter steigt an, der im Zyklon sinkt ab. Die Ursache für den plötzlichen Druckanstieg liegt am verstopften Rohrbogen, wodurch die Förderluft nicht mehr über die Förderleitung entweichen kann, sondern in den Sendebehälter strömt.

3.3 Zusammenfassung der Messdaten

Tabelle 3.3.1 stellt die Fördergrenze der Versuche mit 1, 1.5, 2 und 2.5 bar Druck im Zyklon P_Z dar. Abbildung 3.3.1 stellt die Fördergrenze grafisch dar.

P _z [bar]	$\dot{m}_{_{FL}}$ [kg/h]	[kg/h]	B _{max} [-]
0,9966	15	125	8,33
1,5	22	144	6,5
2	30	150	5
2,5	38	178	4,66

Tabelle 3.3.1: Fördergrenze der Förderversuche bei 1, 1.5, 2 und 2.5 bar



Abbildung 3.3.1: Maximale Beladung B abhängig vom Druck im Zyklon Pz

Die höchste maximale Beladung *B* ist bei niedrigen Zyklondrücken erreichbar.



Abbildung 3.3.2: Förderleitung

Abbildung 3.3.2 zeigt die Förderleitung in vereinfachter Weise. Die Förderluftmenge in der Förderleitung \dot{V}_{FL} ist das Produkt der Querschnittsfläche A_{FL} der Förderleitung und der Luftgeschwindigkeit w_{FL} :

$$\dot{V}_{FL} = A_{FL} \cdot w_{FL}$$

Der Förderluftmassenstrom \dot{m}_{FL} ist das Produkt der Luftdichte ρ_{FL} und der Förderluftmenge \dot{V}_{FL} :

$$\dot{m}_{FL} = \rho_{FL} \cdot \dot{V}_{FL}$$

Mit der Gleichung der Luftfördermenge \dot{V}_{FL} , erhält man den Förderluftmassenstrom \dot{m}_{FL} zu

$$\dot{m}_{FL} = \rho_{FL} \cdot A_{FL} \cdot w_{FL} \, .$$

Mit der Luftdichte $\rho_{\scriptscriptstyle FL}$, ausgedrückt durch die thermischeZustandsgleichung

$$\rho_{FL} = \frac{p_{FL}}{R \cdot T_{FL}},$$

ergibt sich für den Förderluftmassenstrom:

$$\dot{m}_{FL} = \frac{p_{FL}}{R \cdot T_{FL}} \cdot A_{FL} \cdot w_{FL}.$$

Da R, T_{FL} , A_{FL} und w_{FL} Konstanten sind und die maximale Beladung das Verhältnis des maximalen Brennstoffmassenstromes $\dot{m}_{B,max}$ zum Förderluftmassenstrom \dot{m}_{FL} ist, kann die maximale Beladung B_{max} als

$$B_{\max} = \frac{\dot{m}_{B,\max}}{\dot{m}_{FL}} = K \cdot \frac{1}{p_{FL}}$$

angeschrieben werden. Dieses sehr einfache Modell für den Verlauf der Fördergrenze weicht von der Ausgleichskurve in Abbildung 3.3.1 ab. Dort erhält man einen Exponenten von - 0.662, der sich in einem flacheren Abfall der tatsächlichen Fördergrenze äußert.

Zusammenfassung

Der geförderte Brennstoff zeigt nach der Förderschnecke bedeutende Schwankungen. Um diese Schwankungen zu reduzieren, wird der Brennstoff nach der Förderschnecke über eine Schwingrinne geführt, deren Aufgabe im Vergleichmäßigen des Brennstoffmassenstroms liegt.

Es wurde zu jedem Brennstoffmassenstrom eine Amplitude der Schwingrinne gefunden, bei der die Schwankungen auf ein Minimum reduziert werden, d.h. der mittlere Variationskoeffizient ist minimal. Die grafischen Darstellungen dieser optimalen Schwingungsamplituden in Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms wurden für den Brennstoff Buche und für den Brennstoff Fichte in den Abbildungen 2.3.3 und 2.4.3 gezeigt. Der optimale Widerstand für die Schneckendrehzahl von 5 U/min liegt bei 35 k Ω , für 10 und 15 U/min bei 30 k Ω und für 20 U/min 40k Ω für die Buche. Für die Fichte liegen diese Werte bei 35 k Ω , 40k Ω , 0k Ω und 0k Ω .

Durch die Darstellung der Schneckendrehzahl in Abhängigkeit des mittleren Brennstoffmassenstroms wurden für beide Feststoffe die Kennlinien der Förderschnecke festgestellt. Die Kennlinie zeigt, dass der mittlere Brennstoffmassenstrom proportional zur Schneckendrehzahl ist. Diese Proportionalität wurde auch errechnet und beträgt für den Brennstoff Buche 0.173 kg/U und für den Brennstoff Fichte 0.152 kg/U.

Weiters wurde die maximale Beladung bei der Förderung mit dem Brennstoff Buche bei 4 verschiedenen Drücken untersucht. Es wurde festgestellt, dass die maximalen Beladungen bei einem Druck von 1 bar bei 8.33, bei 1.5 bar bei 6.5, bei 2 bar bei 5 und bei 2.5 bar bei 4.66 liegen. Versuche mit dem Brennstoff Fichte waren nicht möglich, da der Zyklon, der die Förderluft vom geförderten Brennstoff trennen soll, nicht seinen Zweck erfüllen konnte. Die Fichte war zu klein und zu leicht, weswegen der Zyklon den Brennstoff von der Förderluft nicht trennen konnte. Der Aufbau eines größeren Zyklons wäre wahrscheinlich erforderlich, um diese Förderversuche durchführen zu können.

Literaturverzeichnis

[1] JOPPICH, A.: *Pneumatisches Brennstoffördersystem für direkt holzstaubgefeuerte Gasturbinen*, Dissertation, Technische Universität Wien, 1999.

[2] TMEJ, C: *Betriebsverhalten eines Brennstoffördersystems für direkt-holzstaubgefeuerte Gasturbinen*, Dissertation, Technische Universität Wien, 2001.

[3] Homepage des Institutes für Thermodynamik und Energiewandlung der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität Wien, http://www.ite.tuwien.ac.at

[4] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie der Bundesrepublik Deutschland

[5] FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations

[6] Waste, on line magazine, http://waste.ideal.es

[7] http://www.bee-ev.de

Beilage



Abbildung A.1: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung A.2: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung A.3: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und R $n_{S3} = 20$ k Ω



Abbildung A 4: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung A 5: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω



Abbildung A 6: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω



Abbildung A 7: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 40 k\Omega$

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>\{</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]	μ _B [kg/h]	maximales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]
0	40,44	44,22	49,45	55,49	56,32	57,05
10	38,92	44,88	50,77	55,38	56,21	57,07
20	34,44	37,72	41,62	52,32	54,42	56,30
25	35.27	38,10	42,16	52.06	54.42	56.78
30	28.22	32.04	35.57	52.08	54 48	56.06
35	21.36	25.60	28.04	53 19	55.26	56.03
30	21,30	20,00	20,04	55,10	55,20	50,95
40	20,00	25,98	32,05	53,10	54,77	55,90

Tabelle A1: Messwerte bei 5 U/min



Abbildung A 8: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung A 9: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung A 10: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω



Abbildung A 11: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung A 12: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω



Abbildung A 13: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω



Abbildung A 14: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>₹</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]	μ _B [kg/h]	maximales \dot{m}_{B} [kg/h]
0	20,78	25,34	31,50	153,84	157,78	160,08
10	23,67	28,94	34,03	155,60	160,47	163,26
20	21,16	25,82	30,37	153,39	158,57	161,10
25	16,24	22,60	25,53	153,73	157,72	159,92
30	11.24	14.41	19.28	154.07	156.91	158.18
		,		,	,.	,
35	19,11	22,77	26,44	151,49	155,59	157,61
40	21,87	24,58	26,63	151,50	155,67	158,57

Tabelle A2: Messwerte bei 15 U/min



Abbildung A 15: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung A 16: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung A 17: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω



Abbildung A 18: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung A 19: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω



Abbildung A 20: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω



Abbildung A 21: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>₩</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]	μ _в [kg/h]	maximales \dot{m}_{B} [kg/h]
0	23 72	25 74	27.63	211 32	217 63	220.52
10	20,09	22,73	25,41	207,76	213,76	216,64
20	17,98	22,93	25,64	207,19	211,40	213,22
25	18,61	22,87	26,47	206,17	210,82	214,15
30	15,71	21,07	23,80	205,70	210,02	212,09
35	18,58	24,59	29,40	202,39	208,74	212,02
40	15,55	20,50	23,91	199,42	204,12	206,45

Tabelle A3: Messwerte bei 20 U/min



Abbildung B1: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung B2: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung B3: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω



Abbildung B4: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung B5: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω



Abbildung B6: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω



Abbildung B7: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 5$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>\{</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]	μ _в [kg/h]	maximales $\dot{m}_{_B}$ [kg/h]
0	67,62	71,39	76,88	44,82	45,83	46,80
10	63,09	65,68	68,71	45,17	47,65	48,05
20	56,57	58,14	60,07	47,05	48,36	49,75
25	36,39	41,17	47,99	47,70	48,61	49,86
30	43,85	47,03	50,70	44,10	45,97	46,80
35	37,99	41,97	45,26	45,72	47,17	48,42
40	39,78	43,76	55,64	47,52	48,34	50,22

Tabelle B1: Messwerte bei 5 U/min



Abbildung B8: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung B9: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung B10: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω



Abbildung B11: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung B12: Variationskoeffizient über der Zeit bei n_{S3} = 10 U/min und R_{S4} = 30 k Ω



Abbildung B13: Variationskoeffizient über der Zeit bei n_{S3} = 10 U/min und R_{S4} = 35 k Ω



Abbildung B14: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 10$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>₹</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]	μ _в [kg/h]	maximales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]
0	44,53	46,54	47,66	92,70	95,52	97,92
10	33,78	38,77	44,47	93,24	94,86	96,30
20	36,47	39,28	42,19	92,88	94,41	95,70
25	38,12	39,86	42,29	88,20	92,10	93,60
30	36,50	39,12	41,43	90,00	92,66	95,04
35	38,95	40,26	41,74	89,46	91,07	94,32
40	34,00	35,78	37,64	93,24	94,86	96,12

Tabelle B2: Messwerte bei 10 U/min



Abbildung B15: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung B16: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung B17: Variationskoeffizient über der Zeit bei n_{S3} = 15 U/min und R_{S4} = 20 k Ω



Abbildung B18: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung B19: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω



Abbildung B20: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω



Abbildung B21: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 15$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>V</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]	μ _в [kg/h]	maximales $\dot{m}_{\scriptscriptstyle B}$ [kg/h]
0	32,26	33,22	34,48	135,72	137,51	138,78
10	36,28	37,45	38,70	131,40	133,80	135,18
20	34,20	36,41	38,46	134,06	135,90	138,86
25	34,49	35,25	36,73	137,16	140,68	142,56
30	34,38	35,58	36,57	133,02	135,53	137,16
35	33,20	35,22	37,36	132,66	134,98	136,62
40	35,73	36,93	37,58	130,32	136,31	140,40

Tabelle B3: Messwerte bei 15 U/min



Abbildung B22: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 0$ k Ω



Abbildung B23: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 10$ k Ω



Abbildung B24: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 20$ k Ω



Abbildung B25: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 25$ k Ω



Abbildung B26: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 30$ k Ω



Abbildung B27: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 35$ k Ω



Abbildung B28: Variationskoeffizient über der Zeit bei $n_{S3} = 20$ U/min und $R_{S4} = 40$ k Ω

<i>R</i> _{S4} [kΩ]	minimales V [%]	<i>√</i> [%]	maximales V [%]	minimales $\dot{m}_{_B}$ [kg/h]	μ _B [kg/h]	maximales \dot{m}_{B} [kg/h]
0	33,28	33,98	35,15	178,20	180,97	182,88
10	34,73	35,41	36,78	190,98	195,04	197,64
20	33,17	34,69	35,91	185,40	186,94	188,28
25	34,22	36,65	37,68	187,38	190,34	192,60
30	34,63	35,32	36,17	178,74	184,30	187,20
35	34,08	35,38	36,62	175,50	181,05	184,50
40	34,35	35,94	37,82	172,44	177,94	183,78

Tabelle B4: Messwerte bei 20 U/min