

DIPLOMARBEIT

Entwicklung eines Laborreaktors für die Festbettvergasung von holz- und nicht- holzartigen Brennstoffen

von

August Zöchbauer, BSc

als Diplomarbeit der Kommission zur Abhaltung der dritten
Diplomprüfung der Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen-
Maschinenbau an der Technischen Universität Graz über das Institut für
Wärmetechnik vorgelegt.

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr. Christoph Hochenauer

Beurteiler

Univ.-Prof. DI Dr. Christoph Hochenauer

Graz, Dezember 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,
.....
(Signature)

KURZFASSUNG

Titel:

Entwicklung eines Laborreaktors für die Festbettvergasung von holz- und nicht-holzartigen Brennstoffen

Autor: August Zöchbauer

Aufgrund steigender Preise fossiler Energieträger rückt die energetische Nutzung von Biomasse immer mehr ins Auge des Endkonsumenten. Bestehende Heizölkessel werden durch neue Pellets- sowie Hackgutfeuerungen ersetzt, welche erhebliche Mengen an Stickoxiden und Feinstaub freisetzen. Nationale und internationale Richtlinien fordern eine Reduktion dieser Emissionen mit immer strenger werdenden Grenzwerten.

Eine automatische Feuerungsregelung bestehender Hackgutfeuerungen konnte den Ausbrand verbessern und die CO-Emissionen minimieren. Ebenso wurden die Stickoxidemissionen durch Absenkung der maximalen Verbrennungstemperatur mittels geringfügiger Luftstufung wesentlich reduziert.

Die Vergasung verspricht zusätzlich noch Potentiale hinsichtlich der Feinstaubreduktion aufgrund der wesentlich größeren Luftstufung, den geringeren Verbrennungstemperaturen und des Sauerstoffmangels im Brennstoffbett.

Bestehende Feuerungen können die Anforderungen an die Dichtheit des Systems bzw. an die geometrischen Gegebenheiten im Feuerraum nicht mehr bedienen. Diese Arbeit beinhaltet somit die Entwicklung, Konstruktion und die Umsetzung eines Laborreaktors für die Festbettvergasung. Weiters konnten erste Messergebnisse der Rauchgaszusammensetzung und der Gesamtstaubemission über verschiedene Primärluftverhältnisse evaluiert werden.

ABSTRACT

Title:

Development of a small scale, fixed bed gasifier for wood and non-woody fuels

Author: August Zöchbauer

Due to rising prices of fossil fuels in recent years, the use of biomass is increasingly attractive to the customers. Existing oil boilers are replaced by new woodchips- and pellets boilers which emit significant amounts of nitrogen oxides and particulate matter.

National and international guidelines call for a reduction with increasingly stringent emission-limits.

An automatic combustion control could improve existing wood chip furnaces regarding burnout and minimizing CO-emissions. Similarly, the nitrogen oxide emissions have been reduced significantly by lowering the maximum combustion temperature by slight air staging. In addition the gasification process promises more potential in terms of particulate matter reduction due to the much larger air staging, the much lower combustion temperatures on top of the fuel bed and lack of oxygen. Existing furnaces can no longer serve the needs of the tightness of the system or to the geometric conditions in the furnace.

Thus, this work includes the development, construction and realization of a laboratory fixed bed gasifier. Furthermore, even first results of the flue gas composition, and particulate emissions were evaluated across different primary air ratios.

VORWORT

Diese Masterarbeit entstand im Jahr **2013** zum Abschluss meines Studiums für **Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau** mit der Vertiefungsrichtung, **Energietechnik**. Durch die Erfahrungen der letzten Jahre, welche ich im Zuge von Arbeitspraktika und durch den Eigenbau eines Umrüstsatzes für den Pelletsbetrieb eines Stückholzkessels machen durfte, wuchs mein Interesse in der energetischen Nutzung von Biomasse stetig. Trotz aller Vorzüge sind die negativen Auswirkungen einer Biomassefeuerung, im speziellen die Staubemissionen, erheblich. Daher war es mir ein besonderes Anliegen, den Kenntnisstand zur Minderung dieser Emissionen zu ergänzen.

Diese Diplomarbeit ermöglichte mir, meine theoretischen Fachkenntnisse im Bereich der Verbrennung/Vergasung sowie der Entwicklung/3D-Konstruktion zu vertiefen und meine praktischen Fähigkeiten wie z.B. dem WIG-Schweißen während der Fertigung dieses Laborvergasers zu festigen.

In diesem Sinne möchte ich mich....

... bei meinem Betreuer, **DI Georg Hofmeister**, bedanken, welcher mir stets mit fachlicher und organisatorischer Kompetenz weitergeholfen hat.

... beim **Personal der Entwicklungswerkstatt** im Innovationszentrum und der **Konstruktionsabteilung** der KWB GmbH für ihre Hilfestellungen während der Umsetzungsphase bedanken.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern, **August und Marianne Zöchbauer**, in jeglicher Hinsicht bedanken. Sie haben mir diesen Ausbildungsweg an der Technischen Universität in Graz ermöglicht und sind mir während der Studienzeit und auch in schwierigen Zeiten immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Danke!

Graz, 06.11.2013

August Zöchbauer

NOMENKLATUR

Kurzform	Beschreibung	Einheit
<i>ED</i>	... Einschaltdauer	%
λ	... Luftzahl	
<i>Brf</i>	... Bezugsgröße ist die feuchte Brennstoffmasse	
<i>ftW</i>	... Bezugsgröße ist die eingestellte feuerungstechnische Wärmeleistung	
<i>Kwl</i>	... Bezugsgröße ist die eingestellte Kesselwärmeleistung	
N_2	... Stickstoff	
CO_2	... Kohlendioxid	
H_2O	... Wasser, Wasserdampf	
SO_2	... Schwefeldioxid	
O_2	... Elementarer Sauerstoff	
NO_x	... Sammelbegriff für eine Gruppe an Stickoxiden	
<i>PM</i>	... Gesamtmasse an Aerosolpartikel (Particular matter)	
<i>KCl</i>	... Kaliumchlorid	
K_2SO_4	... Kaliumsulfat	
<i>CaO</i>	... Calciumoxid	
Al_2O_3	... Aluminiumoxid	
SiO_2	... Siliciumdioxid	
<i>CO</i>	... Kohlenmonoxid	
<i>C</i>	... Kohlenstoff	
<i>SEM – ED_x</i>	... scanning electron microscope – energy dispersive X-ray spectroscopy	
SO_x	... Sammelbegriff für eine Gruppe an Schwefeloxiden	
<i>WHO</i>	... World Health Organisation	
<i>FAV</i>	... Feuerungsanlagen Verordnung	
<i>1. BImSchV</i>	... Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes – Immissionsschutzgesetzes	
<i>G30, G50</i>	... Hackgut – Größenfraktion	

FORMELZEICHEN

Kurzform	Beschreibung	Einheit
w	... Wassergehalt	%
m_{EW}	... Masse der eingewogenen Aluschale samt feuchtem Hackgut	kg
m_{AW}	... Masse der ausgewogenen Aluschale samt trockenem Hackgut	kg
m_{TARA}	... Masse der eingewogenen Aluschale	kg
m_{Brf_100}	... Brennstoffmassenstrom bei 100% Einschaltdauer	$\frac{kg}{h}$
H_u	... Unterer Heizwert	$\frac{kWh}{kg_{Brf}}$
P_{ftW}	... Feuerungstechnische Wärmeleistung	kW
t_{zyklus}	... Zykluszeit (Periode)	s
t_{zyklus_ein}	... Einschaltzeit in der Zykluszeit	s
O_{2min}	... minimaler Sauerstoffbedarf	
L_{min}	... minimaler Luftbedarf	
λ_{prim}	... Primäres Luftverhältnis	
λ_{ges}	... Sekundärluftverhältnis	
L_{prim}	... Luftmasse zur primären Verbrennungszone	kg
L_{sek}	... Luftmasse zur Sekundärverbrennungszone	kg
L_{ges}	... Gesamte Luftmasse	kg

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	12
1.1	Definition von Aerosolen	12
1.2	Verbrennungsablauf	13
1.2.1	Trocknung	13
1.2.2	Pyrolyse	14
1.2.3	Vergasung und Verbrennung	15
1.3	Aerosole aus der Verbrennung	16
1.3.1	Grundsätzliche Einteilung	16
1.3.2	Zusammenfassende Darstellung der Partikel-Bildungspfade	17
1.3.3	Aerosole aus unvollständiger Verbrennung	18
1.3.4	Aerosole aus vollständiger Verbrennung	19
1.3.5	Kalium	20
1.3.6	Calcium	21
1.3.7	Mitgerissene Asche	21
1.3.8	Grundsätze für die Reduktion der Partikelbelastung im Rauchgas	22
1.4	Wirkung auf die Umgebung	24
1.5	Behördlich regulierte Emissionsstandards	26
1.5.1	Situation in Europa	26
2	STAND DER TECHNIK	30
2.1	Vergleich bestehender Kesselsysteme	30
2.1.1	Peripherie	30
2.1.2	Vertikaler Brenner mit Rost	33
2.1.3	Schrägfeuerung mit Rost	35
2.1.4	Schrägfeuerung ohne Rost	37
2.1.5	Unterschubfeuerung	38
2.1.6	Sturzbrandfeuerung	40
2.2	Zusammenfassung	42
3	KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DES VERSUCHSSTANDES	44
3.1	Vergasungsprinzip	44
3.1.1	Größenabschätzung/-bemessung	45
3.1.2	Skizzen	46
3.2	Konstruktion	48
3.2.1	Bestehende Komponenten	50
3.2.2	Versuchsaufbau	50
3.2.3	Detailausführungen	52
3.2.4	Regelung via AutomationX	70

4	VERSUCHE	72
4.1	Erste Testläufe	72
4.2	Vorbereitungen zur Versuchsdurchführung	74
4.3	Startphase	78
4.4	Betrieb	80
4.5	Staubmessung	82
4.5.1	Aufbau	82
4.5.2	Rauchgasabsaugschrank „Miraculix“	84
4.5.3	Wägung	85
4.5.4	Abgasanalysegerät	86
4.6	Ergebnisse	88
4.6.1	Versuch am 15.10.13	88
4.6.2	Versuche am 24.10 und 30.10	93
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	108
6	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	110
7	TABELLENVERZEICHNIS	112
8	LITERATURVERZEICHNIS	113

1 EINLEITUNG

1.1 Definition von Aerosolen

Unter Aerosolen versteht man im Allgemeinen feste oder flüssige Partikel, welche in einer Gasphase suspendiert sind. Die Partikel bzw. Partikelansammlungen treten in Größen von ca. 0,001 bis 100 μm auf. Die partikuläre Materie, kurz PM (Particulate Matter), stellt die Gesamtmasse von Aerosolpartikeln dar. PM_{10} bedeutet somit die Masse der im Gesamtstaub enthaltenen Partikel, welche einen aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 μm besitzen. Typische Immissionsgrenzwerte werden als PM_{10} (Feinstaub), $\text{PM}_{2,5}$ (lungengängig) bzw. PM_1 bezeichnet. [1, 2]

Aerosole in der Atmosphäre bestehen aus Sandkörnern und Erosionsprodukten, Reifenabrieb und Abgasen von Fahrzeugen, Salzkristallen von Straßen und Meeren, Blütenpollen aber speziell im Winter auch aus Produkten der Verbrennung von biogenen Stoffen wie Hackgut, Pellets, Stückgut oder halmgutartigen Materialien.

Die Partikelgrößen haben einen wesentlichen Einfluss auf potentielle gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen sowie die Abscheidewirkung in Gasreinigungsanlagen. Aufgrund ihrer Entstehung treten diese Partikel in unterschiedlichen Größen auf. Unter guten Verbrennungsbedingungen bestehen typischerweise 80% der Gesamtstaubmenge aus Partikeln mit einem Durchmesser von kleiner 1 μm . Abbildung 1 zeigt, dass das Maximum der unimodalen Größenverteilung in einem Bereich von 0,01 μm bis 1 μm bei 0,1 μm liegt. Bei der Verbrennung von Biomasse hängt die Staubemission von mehreren Faktoren wie der Brennstoffzusammensetzung, den Luftverhältnissen oder der Verbrennungstemperatur ab. [1, 2, 3]

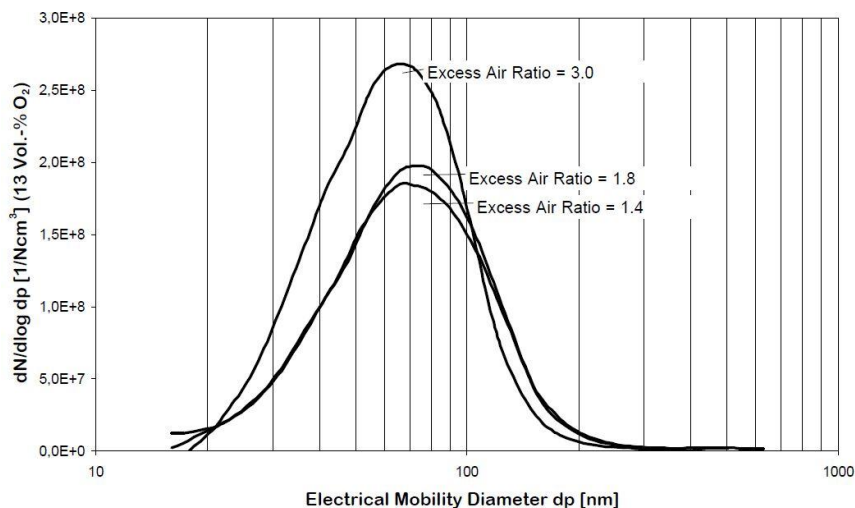


Abbildung 1: Unimodale Größenverteilung von PM_1 unter Einfluss des Gesamtluftverhältnisses [3]

1.2 Verbrennungsablauf

Die Verbrennung von Biomasse kann in unterschiedliche aufeinander folgende Phasen unterteilt werden. [4]

- **Trocknung**
- **Pyrolyse**
- **Vergasung**
- **Verbrennung**

In Abbildung 2 ist der Ablauf einer Biomasseverbrennung schematisch dargestellt.

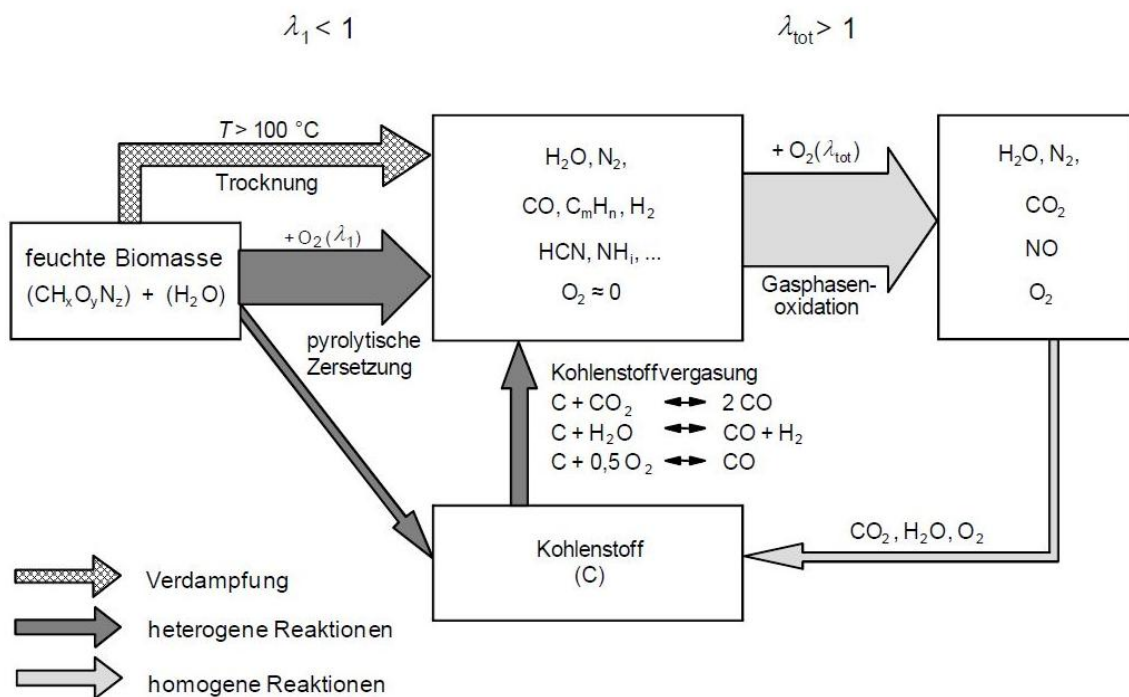


Abbildung 2: Reaktion und Zwischenprodukte bei der Biomasseverbrennung [5]

1.2.1 Trocknung

Zuallererst muss die Biomasse mit Restwassergehalt getrocknet werden. Der Wassergehalt hat wesentlichen Einfluss auf die Energieausbeute bei der Verbrennung, da die Verdampfungswärme von Wasser (2,26 MJ/kg) aufgewendet werden muss. Die Trocknung wird durch das Abdampfen des Wassers von außen her eingeleitet und findet in einem Temperaturfenster von ca. 20°C bis 160°C statt. Aufgrund des Kapillardruckes wandert nun das im Inneren gebundene Wasser an die Oberfläche und verdampft. [4, 5]

Tabelle 1 zeigt die Arten der Bindungen von Wasser in holzartigen Brennstoffen.

Tabelle 1: Art der Wasserbindung [5]

Bindung	Wassergehalt	Merkmale
Kapillarabsorption und Adhäsion	>25%	Feines, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen, gebundenes Wasser in den Holzfasern
Fasersättigungspunkt	19% - 25%	In den Holzfasern (Zellwänden) gebundenes Wasser, Holzschwind bei Wasserentzug
Kapillarsorption	13% - 25%	Kolloidal gebundenes Wasser, Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte
Elektrosorption	5,7% - 13%	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden
Chemosorption	0% - 5,7%	Molekulare Anziehungskräfte

1.2.2 Pyrolyse

Die Pyrolyse ist der Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand der leicht flüchtigen Bestandteile einer Biomasse unter Luftabschluss. Die primäre Pyrolyse findet in einem Temperaturfenster von ca. 250 °C bis 450 °C statt, indem die Biomasse in Pyrolysekoks, kondensierbare und nicht kondensierbare Pyrolysegase aufgespalten wird. Ab etwa 600 °C teilen sich diese kondensierbaren Pyrolysegase (Teere) wieder in nicht kondensierbare Pyrolysegase und Pyrolysekoks auf, sodass nur diese zwei Komponenten übrig bleiben. Ca. 80% bis 85% des organischen Stoffes werden durch die Pyrolyse in gasförmige Komponenten umgewandelt. Abbildung 3 zeigt den pyrolytischen Abbau von trockenem Buchenholz mittels Thermogravimetrie kombiniert mit Massenspektrometrie (Heizrate 20 K/min). Die Abnahme der Brennstoffmasse durch die Pyrolyse beginnt bei etwa 300 °C. Bemerkenswert ist, dass bereits 80% der Gesamtmasse schon bei 450 °C in die Gasphase übergegangen ist. Bis etwa 250°C dampft lediglich das in den Zellen gebundene Wasser aus dem Buchenhackgut. Mit anschließend einsetzender Pyrolyse steigen die Konzentrationen von Methanol (CH₃OH), Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserdampf sehr stark an und spiegeln die schnelle Umsetzung des pyrolytischen Massenabbaus wieder. Die mit steigender Temperatur sinkenden Konzentrationen gasförmiger Komponenten lassen auf eine langsamer ablaufende Vergasung schließen. [4, 5]

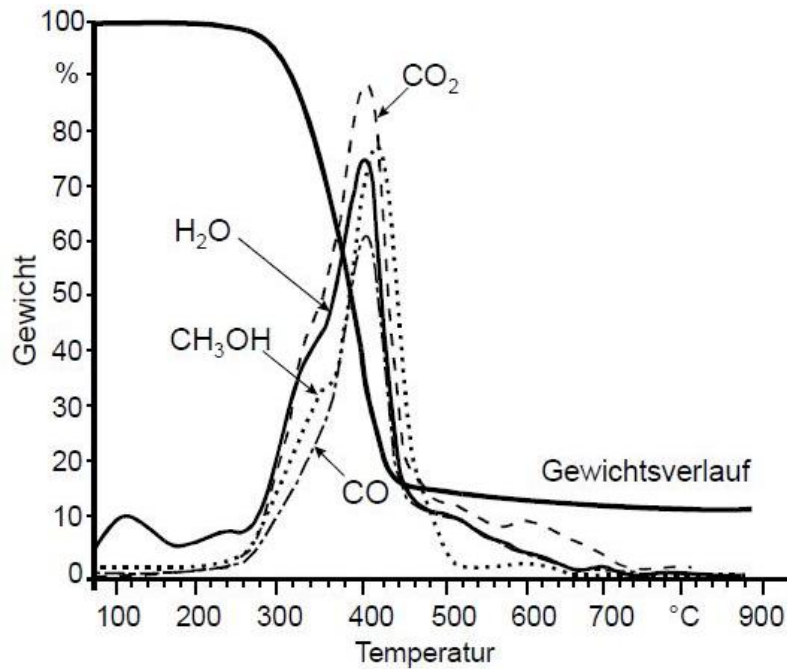


Abbildung 3: Gewichtsverlust von trockenem Buchenholz unter Temperatureinwirkung [5]

1.2.3 Vergasung und Verbrennung

Bei weiterer Erwärmung über 600°C werden die bis dahin noch festen Bestandteile (Koks) mit Hilfe eines Vergasungsmittels (Luft, Wasserdampf oder Sauerstoff) in den gasförmigen Zustand übergeführt. Der Unterschied zum Verdampfen besteht darin, dass bei der Vergasung chemische Verbindungen durch Cracken, Reduktion und partielle Oxidation neu angeordnet werden und feste Bestandteile wie Asche übrig bleiben können. [4, 5]

Der Übergang von der Vergasung zur Verbrennung kann nicht klar festgestellt werden. Generell tritt die Vergasung bei Luftmangel ($\lambda < 1$) und die Verbrennung bei ausreichend Sauerstoffüberschuss ein. [4, 5]

Um die benötigte Energie für Trocknung, Pyrolyse und die Vergasung bereitzustellen, muss die exotherm reagierende Verbrennung parallel ablaufen. Die Verbrennung kann immer nur in der Gasphase geschehen, nie in einer festen Phase. [4, 5]

1.3 Aerosole aus der Verbrennung

1.3.1 Grundsätzliche Einteilung

- **Primäre Aerosole**
entstehen direkt bei der unvollständigen Verbrennung oder durch mitgerissene Flugaschepartikel
- **Sekundäre Aerosole:**
werden erst durch chemische und physikalische Umwandlung in der Atmosphäre gebildet.

Bei der Verbrennung von Holz können mit dem Rauchgas eine Vielzahl von unterschiedlichen Partikelarten frei gesetzt werden. Primäre Aerosole aus einer Verbrennung können einerseits durch die unvollständige Umsetzung des Brennstoffes bzw. andererseits durch Aschepartikel aus mineralischen Bestandteilen bestehen. In dieser Arbeit wird lediglich auf die primären Aerosole eingegangen, da durch die Feuerungsführung kein Einfluss auf die Bildung von Aerosolen in der Atmosphäre besteht [1, 6]

a) Aerosole aus unvollständiger Verbrennung [1]

- C-haltige feste oder flüssige Produkte
 - i. Unverbrannte Holzbestandteile
 - ii. Holzkohle
 - iii. Organische Verbindungen, Pyrolyseprodukte
- C-haltige kondensierbare Syntheseprodukte
 - i. Ruß
 - ii. Organische Verbindungen aus der Synthese von Zersetzungsprodukten

b) Aerosole aus vollständiger Verbrennung [1]

- Schwerflüchtige, mineralische Holzschaschepartikel (CaO , Al_2O_3 , SiO_2)
- Kondensierbare Holzschascheverbindungen durch Neubildung in der Feuerung (KCl , K_2SO_4 und Nitrate)
- Schwerflüchtige Verunreinigungen durch die Holzbringung (Sand, Erde)
- Schwermetalle aus Verunreinigungen bei behandeltem Holz

1.3.2 Zusammenfassende Darstellung der Partikel-Bildungspfade

Abbildung 4 stellt eine Zusammenfassung der nachfolgenden Kapitel dar. Sie beinhaltet mitgerissene Flugasche, unverbrannte Kohlenstoffverbindungen, verdampfte Salze wie z.B. KCl oder feste Partikel der Rindenverbrennung CaO und spiegelt die verschiedenen Bildungs- und Bindungsmechanismen wieder. [7]

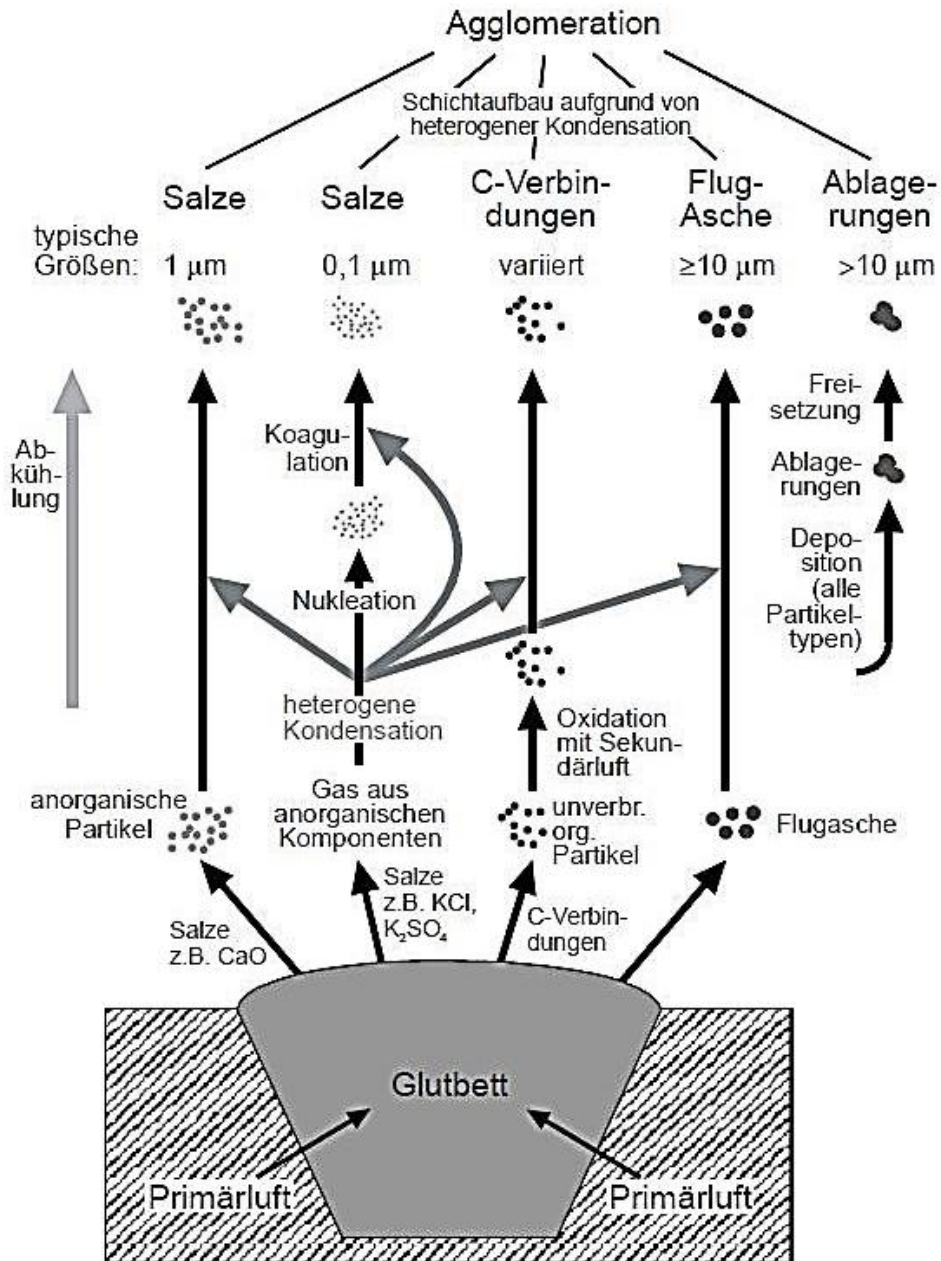


Abbildung 4: Zusammenfassende Darstellung der Entstehungspfade von Partikeln im Rauchgas von Biomassefeuerungen [7]

1.3.3 Aerosole aus unvollständiger Verbrennung

Die automatische Regelung eines Heizkessels bzw. die kontinuierliche Brennstoffzufuhr sind der Grund, dass bei modernen Feuerungen die Aerosole unvollständiger Verbrennung zu vernachlässigen sind. Repräsentativ hierfür kann der CO-Gehalt in Abbildung 5 und Abbildung 6 herangezogen werden. Abbildung 5 stellt den veralteten Naturzugkessel ohne moderne feuerungstechnische Regelung dar. Bei Brennstoffaufgabe in Kombination mit hohen Temperaturen im Kesselraum pyrolysiert der Brennstoff sofort und bildet sehr hohe CO-Konzentrationen. Der Naturzug stellt sich allerdings erst ein, wenn die heißen Rauchgase in den Kamin steigen. Anschließend steigen der Sauerstoffeintrag und der CO₂-Gehalt während die CO-Konzentration abnimmt. [5]

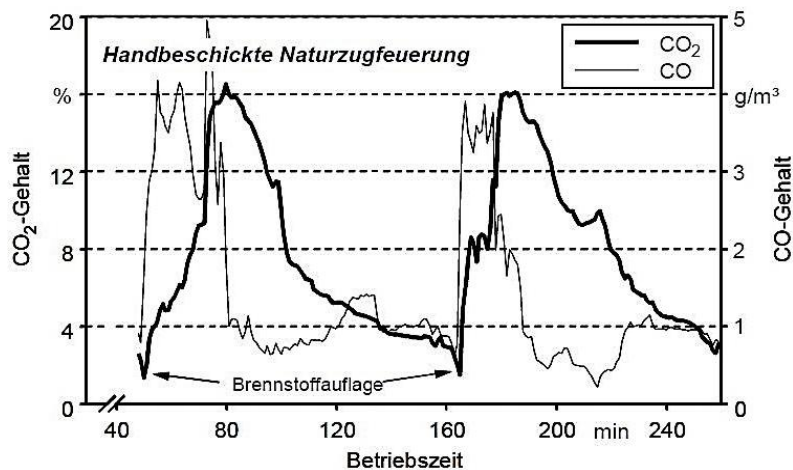


Abbildung 5: CO₂ und CO Verlauf einer handbeschickten Naturzugfeuerung [5]

Abbildung 6 zeigt den sehr gleichmäßigen Verlauf von CO und CO₂ eines modernen Biomassekessels. Der wesentliche Unterschied zum Naturzugkessel besteht darin, dass der Restsauerstoffgehalt im Rauchgas ständig durch eine Breitbandlambdasonde ermittelt wird und eine Änderung dessen, einen sofortigen Eingriff in den Primärluftmassenstrom durch ein Gebläse zur Folge hat. Mit einem zusätzlich kontinuierlicheren Brennstoffeintrag können dadurch wesentlich stationärere (= bessere) Verbrennungsbedingungen eingestellt werden. [5]

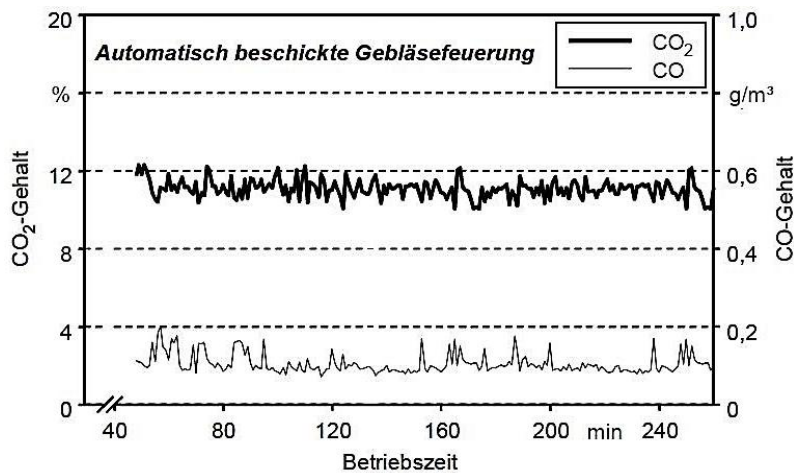


Abbildung 6: CO₂ und CO Verlauf einer automatisch beschickten Gebläsefeuerung [5]

Bei genügend hohen Verbrennungstemperaturen über 600°C steigt der C-Anteil an den Partikeln nie über 7%, wobei davon ein Teil in Form von Carbonaten vorliegt. Der Anteil an organischem Kohlenstoff liegt sogar unter 4%. Im Gegensatz zum stationären Betrieb, bei dem Kohlenstoff-Partikel von untergeordneter Bedeutung sind, machen diese in den Anfahr- und Ausschaltphasen einen größeren Anteil aus. [7]

1.3.4 Aerosole aus vollständiger Verbrennung

Eine weitere Unterscheidung der Partikel kann man aufgrund ihres Entstehungspfades ableiten. Als **Fest-Partikel Pfad** wird jener bezeichnet, bei dem die Partikel während der Bildung im Abgas keine Gasphase durchgemacht haben. Sie bestehen aus im Holz vorhandenen oder im Glutbett gebildeten Substanzen und machen die grobkörnige Fraktion mit einem Durchmesser von 1µm oder mehr aus. Die feinkörnigeren Partikel mit Durchmessern um 0,1µm entstehen über den sogenannten **Fest-Dampf-Partikel Pfad**. Die Komponenten verdampfen im Glutbett und kondensieren als feine Partikel während der anschließenden Abkühlung im Rauchgas aus. [7]

Bei Verbrennungsprozessen von naturbelassenem Holz sind die Anzahl sowie auch die Gesamtmasse der Staubbelastung feinkörniger Partikel wesentlich höher als die der groben Partikel. [2]

Da der Großteil der Partikel im Rauchgas aus der Verfeuerung von Holz einen Durchmesser von ungefähr 0,1µm aufweist, kann daraus gefolgert werden, dass diese Partikel über den Fest-Dampf Pfad gebildet werden. In der Abkühlphase werden Keime gebildet (Nukleation) die sich vergrößern (Koagulation). Über den Fest-Partikel Pfad würden wesentlich gröbere Partikel entstehen. [7, 8, 9]

Anders ist die Verteilung bei der Verbrennung von Rinde. Durch den großen Anteil von Ca in der Rinde wird zusätzlich eine erhebliche Menge an größeren Partikeln über den Fest-Partikel Pfad gebildet. Dies ist ebenfalls an einer bimodalen Partikel-Größenverteilung ersichtlich. [7, 8, 9]

Die nasschemischen und SEM-EDx Analysen von Obernberger und Brunner zeigen, dass die groben Partikel hauptsächlich aus Ca, Na und Mg bestehen, während sich die feinen Partikel aus K, S und Cl zusammensetzen. Die überwiegenden Bestandteile dieser beiden Fraktionen sind K und ebenfalls Ca bei der Verbrennung von Rinde und sollen in den folgenden Kapiteln näher behandelt werden. [7, 8, 9]

1.3.5 Kalium

Es hat sich gezeigt, dass die Aerosolbildung über dem Fest-Dampf-Partikel Pfad hauptsächlich von dem Element Kalium bestimmt wird. [5]

Kalium, sowie andere Nährsalze werden vom Baum über die Wurzeln in Richtung Äste, Blätter und Nadeln transportiert. Aufgrund Ihrer Reaktionsfreudigkeit tritt dieses Element nicht in reiner Form, sondern in Verbindungen wie Kaliumchlorid (KCl), Kaliumsulfat (K_2SO_4) oder als Kaliumhydroxid (KOH) auf. Diese stabilen Kalium-Verbindungen haben, wie in Tabelle 2 zu sehen ist, eine Siedetemperatur von mehr als $1300^\circ C$. Sie liegen damit signifikant über den vorhandenen Verbrennungstemperaturen und können somit nicht verdampfen. Sobald sich allerdings diese Kaliumverbindungen bei der Verbrennung mit Hitze und Sauerstoff zu Kaliumoxiden umformen, tritt ein weiteres Phänomen auf. Es entstehen leicht flüchtige Kaliumoxide, welche sich schon bei Temperaturen unter $400^\circ C$ zersetzen und in die Gasphase übergehen. In nachfolgender Tabelle 2 sind die Umwandlungstemperaturen der wichtigsten, an der Verbrennung beteiligten, Kaliumverbindungen zusammengefasst. [7, 9]

Tabelle 2: Schmelz-,Siede- und Zersetzungstemperaturen von ausgewählten Kaliumverbindungen [7]

Kaliumverbindung	Schmelztemperatur [$^\circ C$]	Siedetemperatur [$^\circ C$]
KCl (Kaliumchlorid)	776	1500
K_2SO_4 (Kaliumsulfat)	1069	1689
KOH (Kaliumhydroxid)	360	1324
K_2O (Kaliumoxid)		350 (Zersetzung)
KO_2 (Kaliumhyperoxid)		380 (Zersetzung)
K_2O_2 (Kaliumperoxid)		490 (Zersetzung)

1.3.6 Calcium

Calcium ist bei der Verbrennung von den meisten Holzarten zweitrangig. [7] Doch bei der Verbrennung von Rinden und rindenhaltigen Biomassen ist Calcium der wichtigste Bestandteil, da um Faktoren höhere Calciumfrachten freigesetzt werden. Ebenso wie Kalium kommt Calcium in der Natur nicht in reiner Form, sondern in Verbindungen mit Sauerstoff, vor. Bei hohen Temperaturen entsteht neben Calciumoxid auch Calciumnitrid. Weiters reagiert es mit dem Wasser zu Calciumhydroxid und mit Wasserstoff zu Calciumhydrid. Diese Calciumverbindungen besitzen sehr hohe Siede- und Schmelztemperaturen und treten, im Unterschied zu Kalium nicht in der Gasphase auf. Calciumverbindungen bleiben stets feste Partikel und werden durch turbulente Strömungsbedingungen Richtung Kamin ausgetragen. Sie beschreiten somit ihren Weg ins Aerosol über den Fest-Partikel Pfad. [7, 9]

Tabelle 3: Schmelz-,Siedetemperaturen von ausgewählten Calciumverbindungen [7]

Calciumverbindung	Schmelztemperatur [°C]	Siedetemperatur [°C]
CaO (Calciumoxid)	2570	2850
Ca ₃ N ₂ (Calciumnitrid)	1723	
Ca(OH) ₂ (Calciumhydroxid)	750	
CaCl ₂ (Calciumchlorid)	772	

1.3.7 Mitgerissene Asche

Wesentlich größere Partikel werden durch sogenannte Flug-Asche oder wieder freigesetzte Ablagerungen in den Rauchgasstrom emittiert. Bei stationären Verbrennungsbedingungen ist ihr Anteil an der Gesamtmenge der Partikel sehr gering. Bei transienten Bedingungen, also wenn der Abgasvolumenstrom und somit auch die Geschwindigkeiten kurzfristig stark erhöht sind, sind auch diese Partikelmassen von Bedeutung. Solche Bedingungen entstehen bei Verklumpungen oder Durchbrennen des Glutbettes. [7]

Aufgrund der Größe ist es möglich, diese Partikel meist mit einem Zyklon weitgehend aus dem Abgasstrom abzutrennen. [4]

1.3.8 Grundsätze für die Reduktion der Partikelbelastung im Rauchgas

Der überwiegende Anteil am Partikelkollektiv machen die über den Fest-Dampf-Partikel Pfad entstandenen Partikel ($<1\mu\text{m}$) aus. Dabei handelt es sich zu großen Teilen um leicht verdampfbare Kaliumverbindungen, welche im stationären Betrieb rund 60% der Gesamtstaubbelastung ausmachen. [7]

Der Dampfdruck dieser Kaliumverbindungen variiert sehr stark, sodass die einen bei normalen Verbrennungstemperaturen fast vollständig in die Dampfphase übergehen und die anderen im festen oder flüssigen Zustand zu großem Teil im Glutbett verbleiben. [7]

Aus experimentellen Versuchen konnte eine Korrelation zwischen Verbrennungstemperatur und der Kaliumfracht nicht nachgewiesen werden. Leichtflüchtige Kaliumverbindungen (Kaliumoxide) liegen dann zu großen Teilen vor, wenn Reaktionen mit Sauerstoff ablaufen. Durch einen kleinen Lambdawert, um 0,2-0,3, entstehen im Glutbett vermehrt schwerflüchtige Kaliumverbindungen (Pottasche K_2CO_3) und werden über den Ascheweg ausgetragen. [7]

Um Kaliumfrachten im Rauchgas zu reduzieren ist es daher notwendig einen möglichst geringen Luftüberschuss einzustellen. Der Luftüberschuss kann allerdings nur soweit abgesenkt werden, dass dennoch eine ausreichende Verbrennungstemperatur bzw. eine stationäre Verbrennung gewährleistet wird. Die Partikelanzahl hingegen kann lediglich über die Reduktion des Gesamt-Luftüberschusses und die damit verbundene Reduktion des Abgasvolumenstromes erreicht werden. Somit ist es den Partikeln, welche durch Nukleation entstehen, leichter möglich, ihre Anzahl durch Koagulation zu reduzieren. [7]

Partikel, die bei der Verbrennung von Rinde entstehen, bestehen überwiegend aus Calcium-Verbindungen, sind schwerflüchtig und werden über den Fest-Partikel-Pfad ausgetragen. Deren Menge lässt sich lediglich durch Wahl eines anderen Brennstoffes bzw. zu geringen Teilen auch von den Strömungsverhältnissen im Glutbett beeinflussen. [7, 8, 9]

a) *Verbrennungstemperatur im Feuerraum genügend hoch (>600°C)*

Dabei kann eine geringe Staubemission von organischen C-Partikeln durch einen vollständigen Ausbrand sichergestellt werden. [7]

b) *Luftüberschuss in der Primär-Verbrennungszone sehr gering*

Trotzdem hoch genug um einen stationären Vergasungsprozess zu gewährleisten. Ein andauernd geringer Luftüberschuss hat immer einen hohen Glutstock zur Folge. Daher muss der Feuerraum genügend hoch gebaut sein. Bei nassen Brennstoffen wird ein höherer Feuerraum benötigt als bei trockenen. [7]

c) *Gesamt-Luftüberschuss so gering wie möglich*

Das Wachstum der Partikel und somit die Reduktion der Partikelanzahl wird daher gefördert. [7]

d) *Gleichmäßige Durchströmung der Vergasungs-/Verbrennungszone*

Verminderung der Austragung von Flugasche und über den Fest-Partikel-Pfad entstandenen Partikel. [7]

e) *Genügend großer Abstand der Sekundärlufteindüsung zum Glutbett*

Dies verhindert eine Rückströmung zur Primärverbrennungs-/Vergasungszone. [7]

1.4 Wirkung auf die Umgebung

Der Partikelgehalt der Atemluft hat für Mensch, Tier und Pflanze sowie für das Klima negative Auswirkungen. [10]

Abhängig von ihrer Größe können Partikel unterschiedlich weit in den menschlichen Körper eindringen. Partikel mit einem Durchmesser von mehr als $10\mu\text{m}$ werden in Nase und Rachen fast vollständig abgeschieden und durch den Hustenreiz aus dem Körper befördert. Besonders schädlich sind Partikel, welche aufgrund ihrer Größe in den Atemwegen nicht mehr abgeschieden werden können. Sie besitzen einen aerodynamischen Durchmesser von $<1\mu\text{m}$, werden im Lungengewebe eingelagert und daher als lungengängige Partikel bezeichnet. [1]

Solch kleine Partikel aus Verbrennungsprozessen wirken oft als Transportmittel für unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle welche zum Teil reizend, toxisch oder mutagen wirken können. Sie werden zum Teil auch in anderen Organen gefunden und sind ein Grund für Herz-Kreislaufstörungen. [10]

Abbildung 7 zeigt den Abscheidegrad von Partikeln der Atemluft in den Atemwegsbereichen bei Nasen-/Mundatmung. Im linken Teil der Abbildung sind der gesamte Fraktionsabscheidegrad sowie die Abscheidegrade von Nase sowie Lunge bei ausschließlicher Nasenatmung zu sehen. Der rechte Teil der Abbildung stellt die Abscheidegrade der Mundatmung gegenüber. [11]

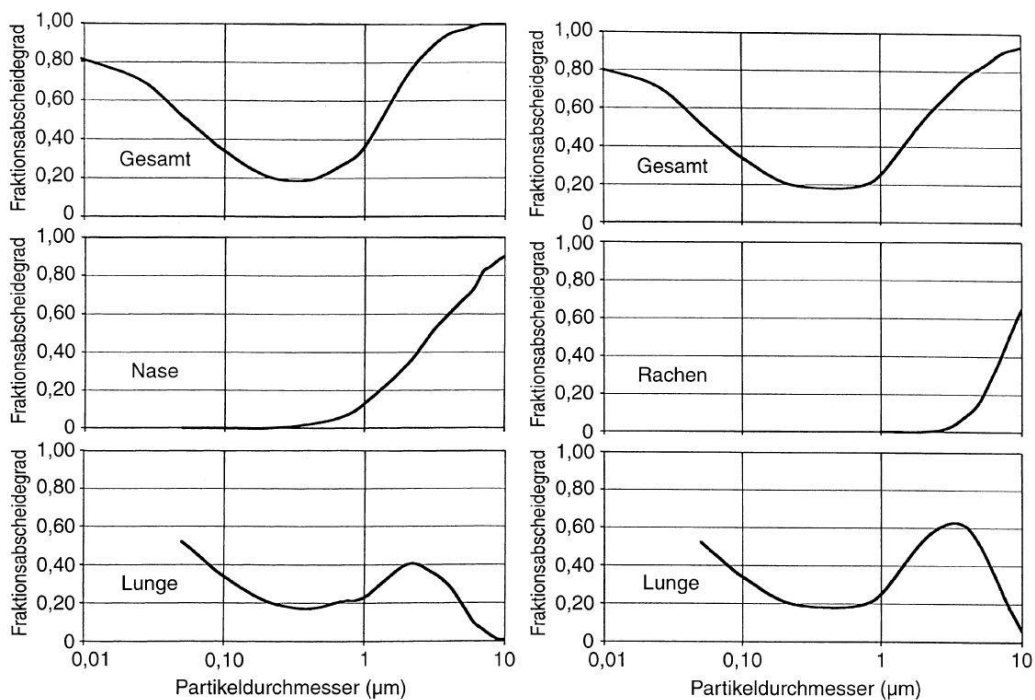


Abbildung 7: Abscheidegrad von Partikeln bei Nasenatmung (links) und bei Mundatmung (rechts) [1,

Hier ist besonders zu bemerken, dass bei der Nasenatmung ein Großteil der Partikel größer $1 \mu\text{m}$ in der Nase abgeschieden wird und nicht in die Alveolen der Lunge gerät. Vergleicht man die Abscheidewirkung von Nase und Rachen, so ist deutlich zu erkennen, dass in der Nase wesentlich mehr und auch ein kleiner Teil submikroner Partikel abgeschieden wird. Trotzdem ist die Filterwirkung für sehr kleine Partikel zu gering, sodass ein Großteil dieser Fraktion bis in die Lunge gelangt. [11]

Partikel in der Atmosphäre beeinflussen direkt, sowie indirekt das Klima. In die Erdatmosphäre eindringende Sonnenstrahlung wird zum Teil an diesen Partikeln ins Weltall reflektiert, gestreut oder absorbiert. Weiters dienen diese Partikel oft als Kondensationskeime für Regentropfen und verändern somit die Anzahl und Größe dieser. [1]

Die Pflanzenoberfläche, also die Blatt- oder Nadeloberfläche wird von diesen Aerosolen verschmutzt. Dadurch reduziert sich der effektive Lichteinfall und die Photosynthese ist vermindert. Ferner können die Poren durch Partikelanlagerungen verstopft werden, welche die Respiration der Pflanze beeinträchtigt. [1]

1.5 Behördlich regulierte Emissionsstandards

Biomasse ist als nachwachsender Rohstoff, als regenerative und CO₂ neutrale Primärenergiequelle anzusehen. Die Verknappung von Erdöl und Erdgas führt zu einer Preissteigerung von fossilen Energieträgern. Dadurch wuchs das Interesse an der Nutzung von CO₂ neutralen Energiequellen der Industrie und Bevölkerung in den letzten Jahren stetig.

Bei der Verfeuerung von Biomasse in Großkraftwerken ist eine anschließende Rauchgasreinigung von Staub, NO_x und SO_x aufgrund der größeren Dimensionen und damit einfacheren Umsetzbarkeit wesentlich einfacher zu realisieren und daher schon seit einigen Jahren Stand der Technik. Bei den Biomassefeuerungen im Leistungsbereich von 5 bis 500 kW kann aufgrund der Baugröße nicht auf solch optimale Rauchgasreinigung zurückgegriffen werden. [4]

Vor allem werden Einzelfeuerstätten und kleine Zentralheizungen für Stückholz, Pellets und Hackgut, in letzter Zeit immer mehr als Verursacher der Feinstaubbelastung angesehen. Im Vergleich zu Partikeln wie dem Diesel-Ruß aus Kraftfahrzeugen sind die Beschaffenheit und Gefährlichkeit dieser Stäube aus Holzfeuerungen noch kaum erforscht. [12]

Die Luftqualität ist stark mit den vom Menschen produzierten Feinstäuben verbunden. Ein klassisches Beispiel ist die Smog-Katastrophe vom 5. bis 10. Dezember 1952 in London (UK) in der 4000 – 12000 Menschen den Tod gefunden haben. Die Ursache waren hauptsächlich kleine Kohlefeuerungen für die Bereitstellung von Raumwärme. Aus diesem Grund wurde 1956 der erste Emissionsstandard in England eingeführt. [13]

1.5.1 Situation in Europa

In den nördlichen Staaten Europas, speziell in Skandinavien (Norwegen, Finnland, Schweden und Dänemark) und den baltischen Staaten (Estland, Lettland und Litauen) ist die energetische Nutzung von Biomassen am intensivsten ausgeprägt. Weiters kann erwähnt werden, dass mehr als 25% der nicht-industriellen Nutzung von Biomasse Europas zur Bereitstellung von Raumwärme in Frankreich stattfindet. Kleine Biomassefeuerungen zählen daher zu einer der signifikantesten Quellen von Aerosolen, welche mit direkten Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen zu tun haben. [13]

Die EU will bis 2020, 20% des europäischen Gesamtenergieverbrauchs allein durch erneuerbare Energiequellen abdecken. [14] Abbildung 8 stellt die nationalen Ziele des Anteils an erneuerbaren Energieträgern dar. Österreich hatte 2005 einen Anteil von ca. 24%, will den Anteil auf 34% ausbauen und liegt damit weit über dem Durchschnitt. [13, 14, 15]

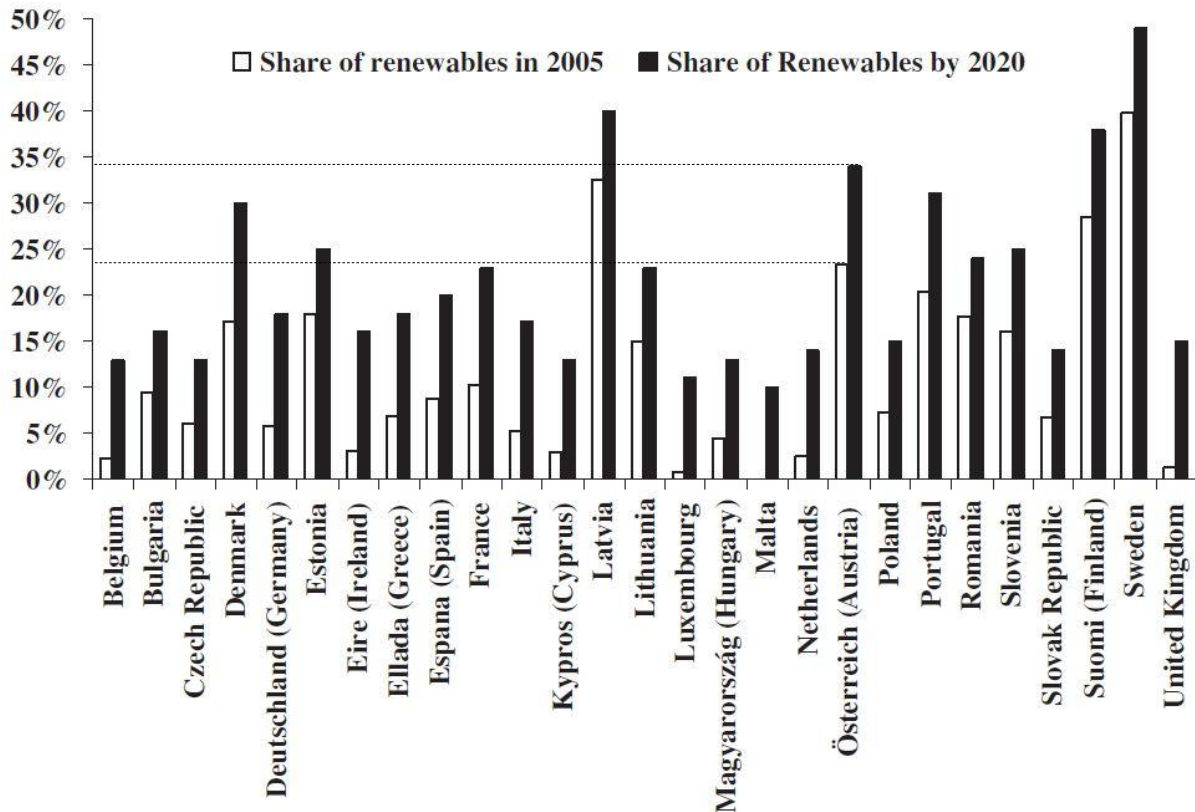


Abbildung 8: Nationale Ziele des Anteils an erneuerbaren Energieträgern bis 2020 [13]

Auf der einen Seite muss die Biomasse-Industrie durch Förderungen und Projekte zur Nachhaltigkeit aufgebaut werden. Auf der anderen Seite dürfen durch die vermehrte Nutzung von Biomasse keine negativen Auswirkungen auf den Menschen und dessen Umwelt entstehen. Aus diesem Grund hat die EU eine Luftqualitätsrichtlinie, in Anlehnung an Empfehlungen der WHO, eingeführt. Das österreichische Umsetzungsgesetz, das „Immissionsschutzgesetz-Luft“ (IG-L) sieht gegenüber den EU-Werten deutlich strengere Grenzwerte bei den Luftschadstoffen PM₁₀ (Feinstaub) und NO₂ (Stickstoffdioxid) vor. [13]

Tabelle 4 beinhaltet die maximal erlaubten Konzentrationen von Partikeln (PM_{2,5}, PM₁₀) sowie verschiedene chemische Verbindungen mit teils unterschiedlichen Bezugszeiten. Weiters sind in der letzten Spalte die für den Bezugszeitraum erlaubten Überschreitungen angeführt.

Einleitung

Tabelle 4: Luftqualitätsrichtlinie der EU [13]

Type	Max. Konzentration	Bezugszeit	Anzahl der Überschreitungen
Partikel (PM _{2.5})	25 µg/m ³	1 a	(-)
Partikel (PM ₁₀)	50 µg/m ³	24 h	35
	40 µg/m ³	1 a	(-)
Schwefeldioxid (SO ₂)	350 µg/m ³	1 h	24
	125 µg/m ³	24h	3
Stickoxide (NO _x)	200 µg/m ³	1 h	18
	40 µg/m ³	1 a	(-)
Blei (Pb)	0,5 µg/m ³	1 a	(-)
Kohlenmonoxid (CO)	10 mg/m ³	Tägliches Maximum (8h)	(-)
Benzen (C ₆ H ₆)	5 µg/m ³	1 a	(-)
Ozon (O)	120 µg/m ³	Tägliches Maximum (8h)	25 Tage im Durchschnitt über 3 Jahre
Arsen (As)	6 ng/m ³	1 a	(-)
Cadmium (Cd)	5 ng/m ³	1 a	(-)
Nickel (Ni)	20 ng/m ³	1 a	(-)
Polycyclische Aromaten Hydrokarbonate (PAH)	1 ng/m ³ (Ausgedrückt als Konzentration von Benzo(a)pyrene)	1 a	(-)

Um die Luftqualitätsrichtlinie der EU einzuhalten, wurden Emissionsrichtlinien für Feuerungen festgesetzt.

Die zulässigen Emissionsgrenzwerte sind in Österreich in der **Feuerungsanlagen-Verordnung (FAV)** niedergeschrieben und hängen von der Art der Brennstoffe und der jeweiligen Brennstoffwärmeleistung ab. In Tabelle 5 sind die Emissionsgrenzwerte für Holzfeuerungen in Österreich aufgeführt.

Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte für die Verfeuerung von holzartigen Brennstoffen nach der FAV [16]

Schadstoff (mg/m ³)	Brennstoffwärmeleistung (MW)					
	<= 0,1	> 0,1-0,35	> 0,35-2	> 2-5	> 5-10	> 10
Staub	150	150	150	50	50	50
CO	800*	800	250	250	100	100
NO _x						
Buche, Eiche, naturbelassene Rinde, Reisig, Zapfen	300	300	300	300	300	200
Sonstiges naturbelassenes Holz	250	250	250	250	250	200
Reste von Holzwerkstoffen oder Holzbauteilen, deren Bindemittel, Härter, Beschichtungen und Holzschutzmittel schwermetall- und halogenverbindungsfrei sind	500	500	500	500	350	350
HC	50	50	20	20	20	20

* bei Teillastbetrieb mit 30 % der Nennwärmeleistung darf der Grenzwert bis zu 50 % überschritten werden.

Die in Österreich erlaubten Gesamtstaubemissionen beginnen für kleine Feuerungen bei $150\text{mg}/\text{Nm}^3$ und sinken auf $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ mit steigender Brennstoffwärmeleistung. Dieser Sachverhalt ist auf die wirtschaftlichere Umsetzbarkeit bei Großfeuerungen zurückzuführen.

Deutschland nimmt bei Biomassefeuerungen eine Sonderstellung ein. Ab 1.1.2015 dürfen Anlagen aller Leistungsklassen nur mehr $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ emittieren. Dies bedeutet für die Verfeuerung von Hackgut eine Reduktion auf ein Fünftel der bisher erlaubten Gesamtstaubemissionen. In Es sind lediglich der Staub- sowie der CO-Grenzwert angeführt.

Tabelle 6 ist der aktuelle Stand und die Grenzwerte ab 2015 des **1. BImSchV** aufgeführt. Es sind lediglich der Staub- sowie der CO-Grenzwert angeführt.

Tabelle 6: Auszug der Emissionsgrenzwerte aus dem 1. BImSchV für holzartige Brennstoffe [17]

	Brennstoff	Brennstoffwärmeleistung (kW)	Staub (mg/m^3)	CO (mg/m^3)
Stufe 1: Anlagen, die ab dem 22.03.2010 errichtet werden	naturbelassenes stückiges Holz (Scheitholz, Hackgut,...) sowie nicht stückiges Holz (Sägespäne, Schleifstaub,...) einschließlich anhaftender Rinde	$\geq 4 \leq 500$	100	100
		> 500	100	50
	Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts oder Pellets	$\geq 4 \leq 500$	60	80
		> 500	60	50
Stufe 2: Anlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden	naturbelassenes stückiges Holz (Scheitholz, Hackgut,...) sowie nicht stückiges Holz (Sägespäne, Schleifstaub,...) einschließlich anhaftender Rinde	≥ 4	20	40
		Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts oder Pellets		

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Vergleich bestehender Kesselsysteme

Im Zuge einer Neukonstruktion eines Hackgutkessels, welcher durch eine verbesserte Feuerungsführung eine sehr geringe Gesamtstaubmenge emittiert, wurden die Produkte der wichtigsten Kesselhersteller im europäischen Raum herangezogen und verglichen. Die Leistungen der betrachteten Kessel weisen eine feuerungstechnische Spitzenleistung von 50kW auf und lassen sich bis etwa 10kW in Teillast betreiben.

Die Feuerungsführung ist zum Teil sehr ähnlich und lässt sich im Wesentlichen auf 5 verschiedene Feuerungstypen reduzieren. Zusätzlich zur Analyse der Feuerungsführung wurden die Emissionen aus den Typenprüfprotokollen herangezogen, um eventuelle reduzierende Auswirkungen der Konstruktion erkenntlich zu machen.

2.1.1 Peripherie

Die **Zubringung** des Hackgutes erfolgt im kleinen Leistungsbereich fast ausschließlich mit einem Förderschneckensystem. Um eine Rückbrandsicherheit zu gewährleisten, muss innerhalb dieses Fördersystems eine Rückbrandsicherung installiert sein. Diese sind entweder als eine Zellradschleuse oder eine Rückbrandklappe ausgeführt. Um reproduzierbare Verbrennungsbedingungen zu erhalten ist es außerdem wichtig, dass in der Primärverbrennungszone nicht zu viel Falschluff über die Hackgut-Zubringung eindringt. Zellradschleusen werden von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich konstruiert und erfüllen mehr oder weniger dieselben Anforderungen. Zu langes Hackgut wird durch eine Schneide zerkleinert und durch eine Drehbewegung zur Einschubschnecke weitertransportiert. [18]

Abbildung 9 zeigt die Einkammer-Zellradschleuse der Firma ETA. Einkammerzellradschleusen neigen weniger zum Blockieren und es können aufgrund des größeren Hohlraumes im Inneren größere Hackgutstücke transportiert werden. [18]



Abbildung 9: Einkammer-Zellradschleuse der Firma ETA [19]

Eine weitere Möglichkeit zur Verhinderung eines Rückbrandes zum Hackgutbunker stellt eine einfache Klappe dar. Diese wird durch einen Stellmotor angetrieben. Große Hackgutstücke werden jedoch nicht zerkleinert und es kann dazu kommen, dass die Klappe nicht ganz schließt. Dennoch stellt die Rückbrandklappe eine sichere und im Vergleich zur Zellradschleuse sehr luftdichte Verschlussmöglichkeit dar. [18]

Bei den heutigen Hackgutkesseln ist eine automatische Zündung mit **Zündgebläse** üblich, sodass von einem Gluterhaltungsbetrieb mit ungünstigen Verbrennungsbedingungen und der damit verbundenen Geruchsbelästigung und CO-Emissionen abgesehen werden kann. Übliche Zündgebläse mit einer Leistung von 2000-3500 Watt, heizen Luft auf eine Temperatur von rund 650°C und blasen diese durch ein Rohr zum Brennstoffbett. Neuere Hackgut-/Pelletsfeuerungen zünden den Brennstoff mit einem luftumströmten Keramikelement. Diese bestehen aus einem in Keramik eingebundenen Heizdraht. Der geringere Leistungsbedarf von ca. 300 W wird damit erreicht, dass dieses Element wesentlich näher zum Brennstoffbett liegt und dem heißen Luftstrom weniger Energie an umliegende Bauteile entzogen wird. Der Luftstrom wird üblicherweise der Primärluftversorgung der Feuerung entnommen. [18]

Jeder der untersuchten Produkte verfügt über eine **gestufte Verbrennung**, sodass die Verbrennungstemperatur und somit die NO_x Emissionen auf ein erträgliches Maß

verringert werden konnten. In der ersten Stufe wird je nach Anwendungsfall unterstöchiometrisch vergast, was die Flammhöchsttemperatur in diesem Bereich stark absenkt. Nach der ersten Verbrennungszone ist die Konzentration an unverbrannten und teilverbrannten Kohlenwasserstoffen noch sehr hoch. [4, 5]

In der zweiten Verbrennungszone wird nochmals Luft in den Feuerraum eingeblasen. Nun kann der teilverbrannte Brennstoff vollständig reagieren. Auch hier muss darauf geachtet werden, dass die Verbrennungstemperaturen zwar hoch genug für die vollständige Verbrennung, aber nicht zu hoch sind, um möglichst geringe NO_x Emissionen auszustoßen. [4, 5]

Zum Stand der Technik zählt ebenfalls eine laufende Regelung der Verbrennung und Analyse des Rauchgases in Hinblick auf dessen Restsauerstoffgehalt. **Die Lambda-Sonde** ist ein Sensor und misst den Luftüberschuss, um daraus resultierend die Menge an Brennstoff, Primär- oder Sekundärluft einzustellen. Die ursprüngliche Sprunglambdasonde detektiert lediglich den stöchiometrischen Zustand mit dem Signal eines Spannungseinbruches von ca. 800 mV auf 200 mV. Bei der Verbrennung von Hackgut, Pellets oder Stückgut benötigt man im Gegensatz dazu eine sogenannte Breitbandlambdasonde. Der Aufbau einer solchen Sonde ist wesentlich komplexer, ermöglicht allerdings den Luftüberschuss (Restsauerstoff) über einem größeren Bereich zu ermitteln. Um einen vollständigen Ausbrand sicherzustellen wird ein Lambdawert von 1,3 bis 1,5 hin eingestellt. Dies begründet sich aus der Tatsache dass chemische Reaktionen ein gewisses Potential, Temperatur und Zeit für dessen Ablauf benötigen. [20]

Der **Wärmeübertrager** wird bei den betrachteten Feuerungen immer als Großwasserraum-Wassererhitzer ausgeführt. D.h. dass die heißen Rauchgase durch Rohre, umgeben von Wasser, strömen. Zur besseren Wärmeübertragung sind in den Rohren sogenannte Turbulatoren eingebaut. Diese brechen die sich aufbauende Grenzschicht und verbessern somit die Wärmeübergangszahl. Um Ablagerungen in den Wärmetauscherrohren aus Produkten der Verbrennung abzureinigen werden diese Turbulatoren beweglich ausgeführt und in gewissen Intervallen automatisch betätigt. [18]

2.1.2 Vertikaler Brenner mit Rost

Vertikale Brenner mit unterschiedlichen Rostausführungen sind die weitaus häufigste Form. Diese sind im Leistungsbereich von ca. 50 kW bei den Herstellern ETA, Hargassner, Fröling, Biotech, Greentech und HDG Bavaria erhältlich.

Die Zuführung des Hackgutes, welche meistens für Größenfraktionen von G30 bis G50 tauglich ist, geschieht immer über eine eingängige, seitlich des Kessels angeordnete Förderschnecke. Die Lage der Einschubschnecke ist leicht steigend oder in einzelnen Fällen sogar horizontal ausgeführt und fördert zu Beginn des Heizzyklus eine vordefinierte Menge an Hackgut auf den Rost. Im Gegensatz zu fördernden Rostsystemen wie ein Stufenrost oder Wanderrost ist der Verbrennungsbereich als kleinflächig einzustufen.

Das Zündgebläse ist seitlich am Kessel angeordnet und zündet durch ein Rohr die Biomasse im Inneren. Ein nach dem Wärmetauscher angeordnetes Saugzuggebläse regelt den Druck im Feuerraum. Bei kleinen Zentralheizungskesseln wird aufgrund von Sicherheitsrichtlinien immer ein geringer Unterdruck hergestellt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit eines Austrittes von heißem Rauchgas aus der Hackguteintragung oder ein Austritt von Rauch in den Heizraum sehr gering.

Die Menge der Primärluft wird mit Stellmotoren angetriebenen Klappen geregelt und gelangt anschließend von unten durch den Rost in das Glutbett. Durch die kreuzstrom geführten Verbrennungspartner kann der Brennstoff zuvor getrocknet werden und es ist somit möglich, auch Brennstoffe mit höherem Wassergehalt zu verfeuern. Mit der Primärluft wird ein unterstöchiometrisches Luftverhältnis von λ 0.7 - 0.9 eingestellt. Weiter oben wird anschließend die Sekundärluft eingeblasen. Um eine gute Durchmischung von Holzgas und Sekundärluft zu gewährleisten, wird die Flamme durch Turbulatoren oder durch die eingeblasene Luft verwirbelt. Dadurch verhindert man eine CO-Stränenbildung, erreicht bestmöglichen Ausbrand und infolgedessen geringe CO-Emissionen.

Abbildung 10 zeigt den Hackgutkessel von Fröling. Das Hackgut wird durch die Zellradschleuse (12) und die Stokerschnecke (5) in den Brennraum auf das Brennstoffbett (2) aufgeschoben. Das Hackgut vergast im Brennstoffbett und nicht-brennbare Bestandteile werden über die automatische Ascheaustragung (3) aus dem Kessel befördert. Die Ringleitung (1) verteilt die Sekundärluft durch Bohrungen im Brennerstein (4) und düst diese in die aufsteigende Flamme ein. Die heißen Rauchgase steigen nun nach oben und werden zur Wärmeabgabe durch den vertikalen Rohrbündelwärmetauscher (6) geführt.

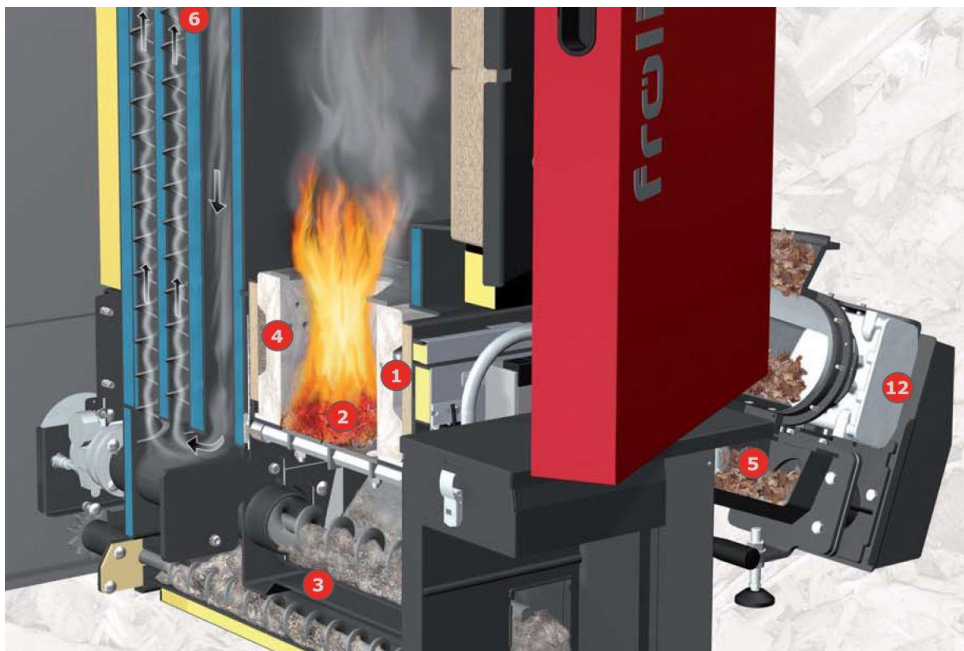


Abbildung 10: Kesselschnitt von Fröling T4 [21]

HDG Bavaria setzt, wie in Abbildung 11 ersichtlich, als Turbulator einen düsenförmigen Schamottstein auf die Verbrennungszone, um bei der Umwandlung der kinetischen Strömungsenergie in Druckenergie Verwirbelungen hervorzurufen. Die Hackgut, sowie die Ascheförderung sind dem Fröling Kessel sehr ähnlich gestaltet. Der wesentliche Unterschied beider Kessel besteht einerseits im düsenförmigen Verbrennungsraum und in der Ausführung des Wärmetauschers. Dieser ist beim Compact 50 als Plattenwärmetauscher ausgeführt. Am Bild lassen sich die unterschiedlichen Ascheaustragungsschnecken für die abgelagerte Flugasche aus dem Wärmetauscher, sowie die Ascheschnecke der Rostasche deutlich erkennen. Weiters ist die Hackguteinschubschnecke bei Fröling steigend, bei HDG aber waagrecht umgesetzt.

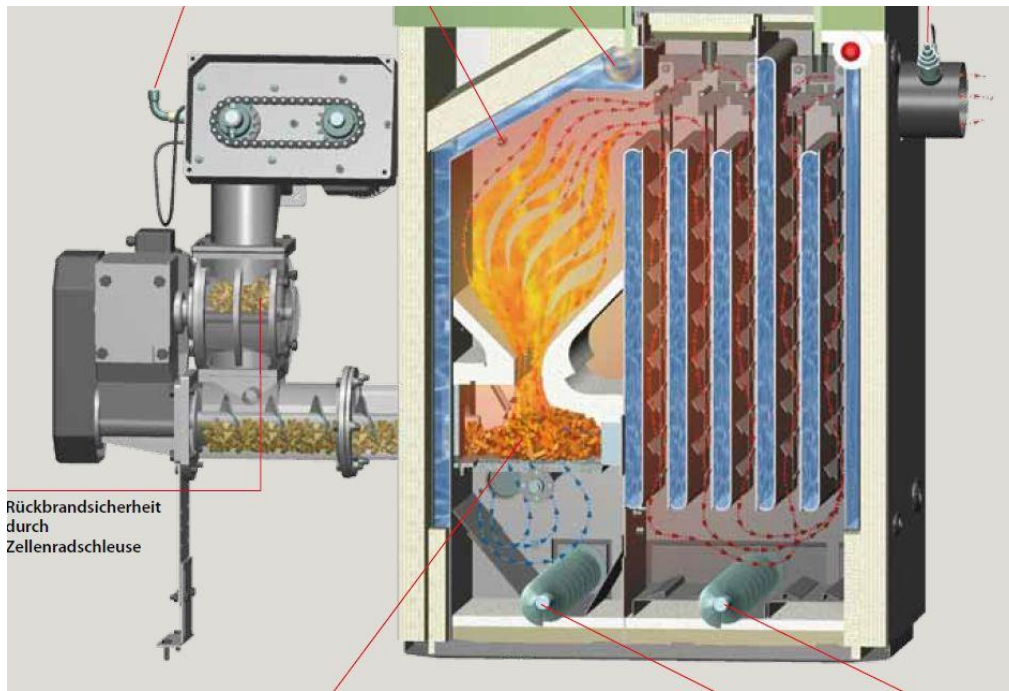


Abbildung 11: Kesselschnitt vom HDG Bavaria Compact 50 [22]

All diese Kessel setzen einen ungekühlten Rost ein, der entweder kippbar gelagert ist oder horizontal weggeschoben werden kann. Dies ist notwendig, um nach Beendigung des Heizzyklus die auf dem Rost verbleibende Asche in die darunter liegende Ascheaustragung zu befördern. Von dort wird die Asche in den außen liegenden Aschebehälter befördert. Bei sehr schlackenden Brennstoffen kommt es vor, dass die Reinigungswirkung aufgrund der Schwerkraft zu gering ist und ab und zu händisch gereinigt werden muss.

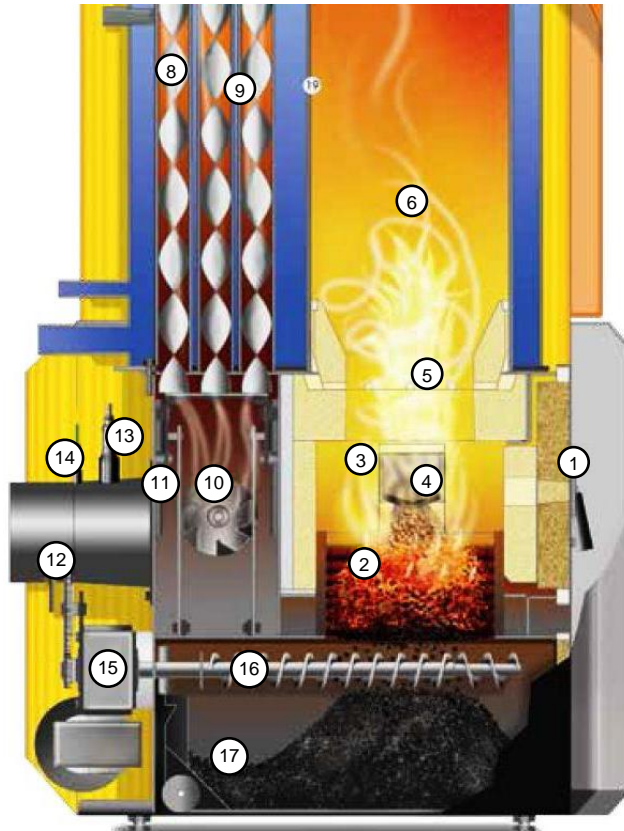
Im langen stationären Betrieb kann es dazu kommen, dass der Druckverlust durch die sich aufbauende Ascheschicht zu groß wird und die Menge an durch den Rost strömender Primärluft nicht mehr ausreicht. In diesem Falle muss der Rost abgereinigt werden, was zu einer erneuten Zündung durch das Zündgebläse führen kann.

2.1.3 Schrägfeuerung mit Rost

Guntamatic setzt bei ihrem Hackgutkessel im Leistungsbereich von 50 kW auf eine bereits bewährte Stufenrosttechnologie von Großfeuerungsanlagen. Bei dieser Feuerung wird im Bereich der hinteren Öffnung (4) der Brennstoff auf den Stufenrost (2) geschoben und gezündet. Die Primärluft gelangt durch die Schlitze am Rost direkt unter das Glutbett. Die Öffnungen links und rechts der Hackguteinschuböffnung und die radial angeordneten Löcher im Bereich 3 der Abbildung 12 dienen der Zufuhr von Sekundärluft. Die Flamme reicht also bis in den zylinderförmigen Sekundärverbrennungsraum.

Nach vollständigem Ausbrand fällt die Asche am Ende des Stufenrostes direkt in die darunter liegende Aschelade (17) und wird von der Ascheschnecke (16) gleichmäßig verteilt. Im Vergleich zu den senkrechten Feuerungen mit Rost ist das Brennstoffbett eher großflächig einzustufen d.h. dass man die einzelnen Schritte der Verbrennung, also die Trocknung, die Vergasung und schließlich der Ausbrand, einem gewissen Abschnitt entlang des Brennstoffbettes zuordnen kann.

Der kontinuierliche Ascheaustrag hat den Vorteil, dass ein kontinuierlicher Verfeuerungsprozess stattfinden kann.



1. Feuerraumtür
2. Treppenrost - Primärluft
3. Brennkammer
4. Füllstandszone
5. Wirbeldüse - Sekundärluft
6. Reaktionsrohr
7. Reinigungsdeckel
8. Wirbulatoren
9. Rohrbündelwärmetauscher
10. Saugzuggebläse
11. Wärmetauscherreinigung
12. Rauchrohr
13. Lambdasonde
14. Rauchgasfühler
15. Reinigungs- bzw. Rostantrieb
16. Ascheschnecke
17. Fahrbarer Aschebehälter
18. Menügeführte Regelung

Abbildung 12: Guntamatic Powerchip 40/50 - links Kesselschnitt; rechts Stufenrost samt Hackguteintragsbereich [23]

2.1.4 Schrägfeuerung ohne Rost

Bei den Vertretern von Schrägfeuerungen ohne Rost sind die Hersteller Gilles, Heizomat und KÖB/Viessmann zu nennen.

Beim Gilles HPK RA 15-160 (Abbildung 13) wird außen am Kessel einer im Gleichstromprinzip gebauter röhrenförmiger Vergaserbrenner aufgesetzt. Der Brennraum selbst ist mit einer tauschbaren Strahlungsdecke ausgestattet. Das Brennmaterial wird von hinten in ein, aus feuerfester Keramik bestehendes Rohr (2) eingeschoben und von oben mittels Heißluftfön gezündet. Die Primärluft gelangt durch am Boden des Rohres befindliche Bohrungen (12) in den Glutstock. Der Vorschub des Glutstockes und der Asche wird lediglich durch den Einschub von frischem Hackgut gewährleistet. Aufgrund der langen Verweildauer der Gase soll eine „saubere“ Verbrennung gewährleistet werden. Die Asche fällt anschließend aus dem Brenner heraus und wird durch ein Rührwerk (3) durch einen Rost in die Aschelade gefördert. Beim HPK-RA kann außer Hackgut noch gewöhnliches Scheitholz mitverbrannt werden. Ein ausschließlicher Betrieb mit Scheitholz ist allerdings nicht möglich. Die Flamme erhitzt die Strahlungskammer (6) und sorgt für niedrige CO-Emissionen. Später strömen die Rauchgase durch den liegenden Rohrbündelwärmetauscher (5) und ein Saugzuggebläse in den Kamin.

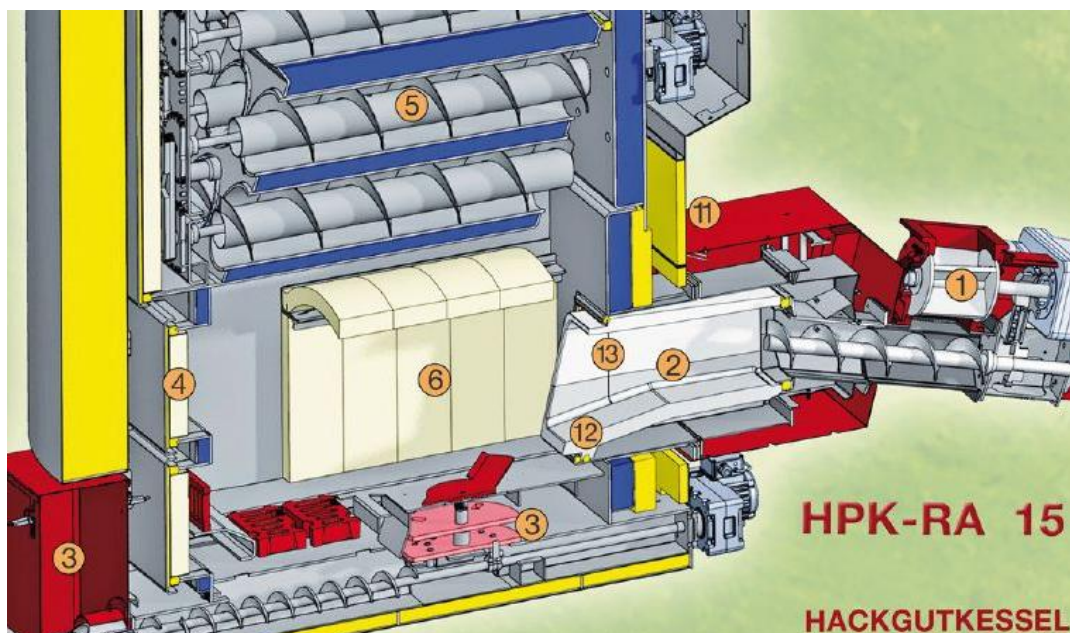


Abbildung 13: Kesselschnitt Gilles HPK-RA 15-160 [24]

Der Hackgutkessel von Heizomat in Abbildung 14 verfügt über einen langen, runden Brennraum, welcher die Brenngase in eine rotierende Strömung zwingt. Der Primärlufteintrag erfolgt direkt bei der Hackguteinbringung von unten während die Sekundärluft durch Düsen (8) an der Oberseite der runden Brennkammer (13) eingeblasen wird.

Weiters verfügt dieser Kessel über eine automatische Entaschung durch einen hochhitzebeständigen Kettenförderer. Wie in Abbildung 14 ersichtlich, besteht diese aus einer umlaufenden Kette mit aufgeschweißten Querstreben. Ähnlich wie der Wärmetauscher des Gilles Hackgutkessels ist der HSK-RA von Heizomat ebenfalls mit einem liegenden Rohrbündelwärmetauscher ausgestattet.

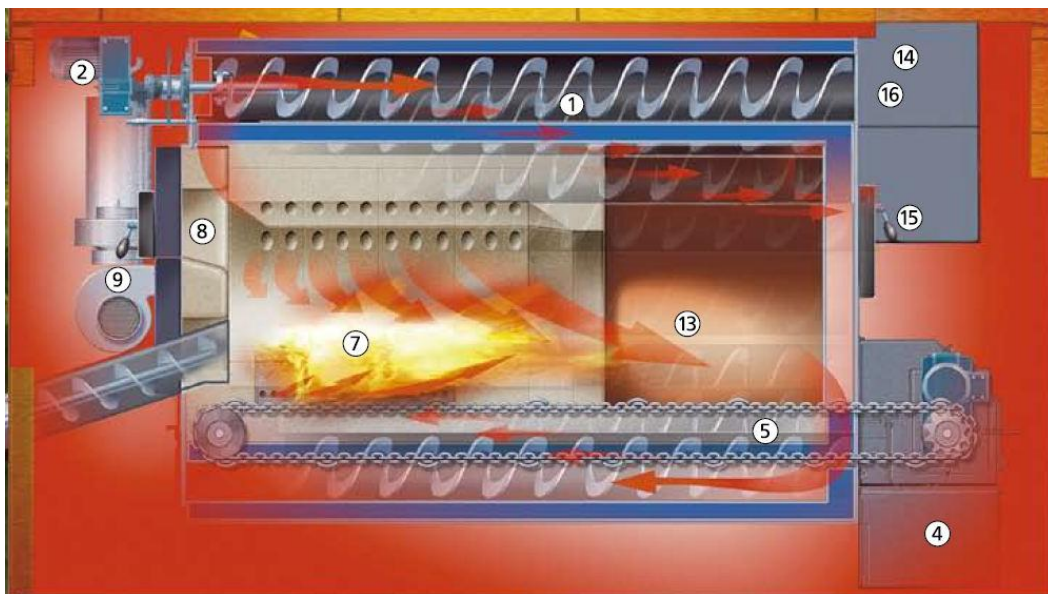


Abbildung 14: Kesselschnitt Heizomat HSK-RA [25]

2.1.5 Unterschubfeuerung

Als Unterschubfeuerungen werden solche bezeichnet, bei denen das Hackgut durch eine Förderschnecke von unten auf einen Brennerteller geschoben wird. Die Primärluft strömt durch Bohrungen, welche rotationssymmetrisch um diesen Brennerteller angeordnet sind. Zu Beginn des Heizzyklus wird der Brennstoff eingeschoben und anschließend mit dem Zündgebläse gezündet. Die Zuführung der Sekundärluft erfolgt ebenfalls wie bei den vertikalen Brennern mit Rost weiter oben. Durch den erhöhten Druckverlust bei Eindüsung der Primärluft durch relativ kleine Bohrungen ist ein zusätzliches Radialgebläse notwendig.

Vollständig verbranntes Material wird bei dem Kessel von KWB durch den nachschiebenden Brennstoff auf dem Brennerteller nach außen gedrängt und dort durch einen Ascheabscheidering in den Aschebehälter nach unten befördert. Diese

Technologie hat seine Zuverlässigkeit auch bei sehr aschereichen und zum Verschlacken neigenden Holzbrennstoffen gezeigt. [26]

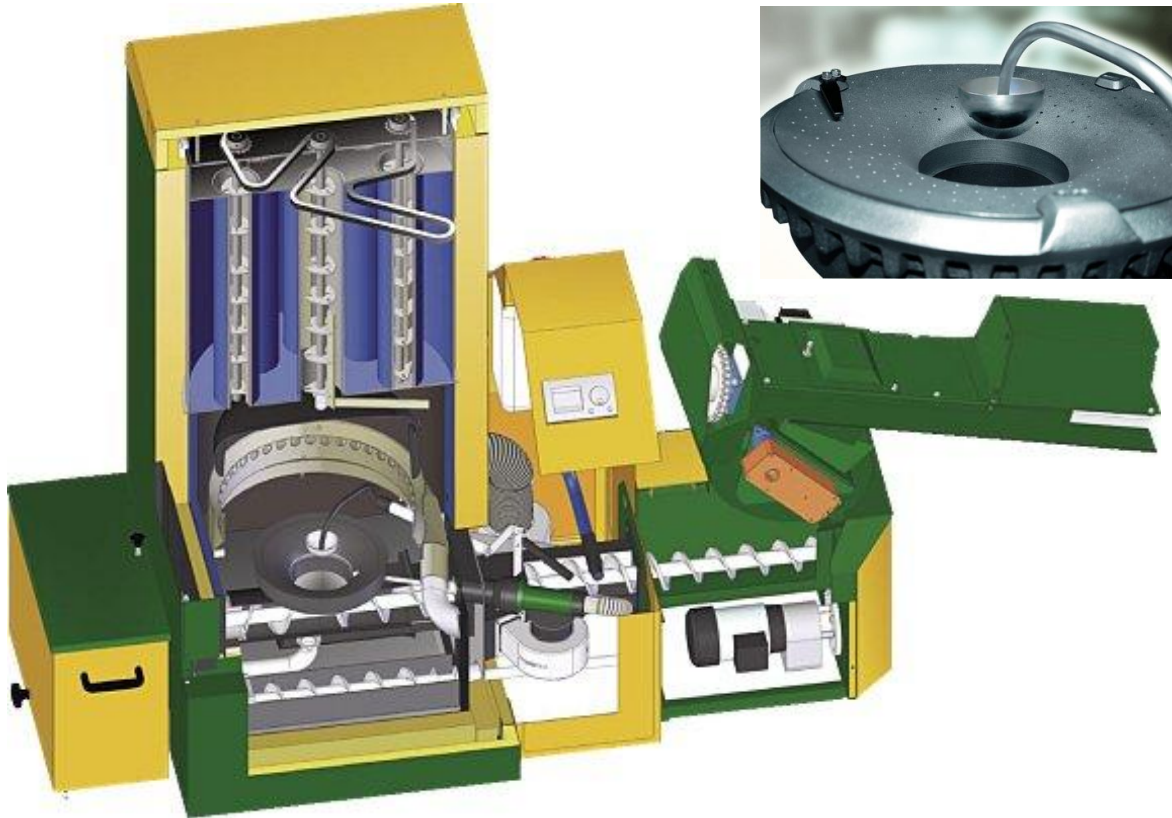


Abbildung 15: Kesselschnitt KWB Multifire [27]

In Abbildung 15 (rechts) ist die mittige Öffnung am Brennerteller für das einzuschiebende Hackgut deutlich zu erkennen. Direkt darüber befindet sich ein Hebel zur Begrenzung des Füllstandes, welcher die Einschubschnecke stoppt. Der schwarze Bügel am linken Brenntellerrand ist die Abschubkralle um den Aschetransport auch bei sehr aschehaltigen Brennstoffen sicher zu gewährleisten. Der zweite Hersteller von Hackgutheizungen nach dem Unterschubprinzip ist Lindner Sommerauer mit dem Kessel SL 49-50 T.

2.1.6 Sturzbrandfeuerung

Der Sturzbrandbrenner von Solarfocus ist in Abbildung 16 dargestellt und nimmt in der gesamten Hackgutkesselpalette eine Sonderstellung ein. Er ist der einzige Kessel, der nach dem Gleichstromprinzip arbeitet. Dies ermöglicht auch ein Verbrennen von normalem Stückgut bis 45 cm, Hackgut und Pellets. Im trichterförmig ausgebildeten Chromstahlguss-Rost verläuft die Verbrennung auf kleiner Querschnittsfläche. Die letzten Reste an brennbaren Teilen der Asche werden in der darunterliegenden Aschelade vollständig umgesetzt.

Durch die Feuerungsführung ist die Vortrocknung des Brennstoffes nicht in dem Maß gegeben, wie sie bei im Gegenstrom geführten Kesseln stattfindet. Somit darf der Wassergehalt der Hackschnitzel maximal bei 30% liegen. [18]

Die Asche sammelt sich im Raum direkt unterhalb des Rostes und muss durch die Reinigungstür an der Front herausgeräumt werden.

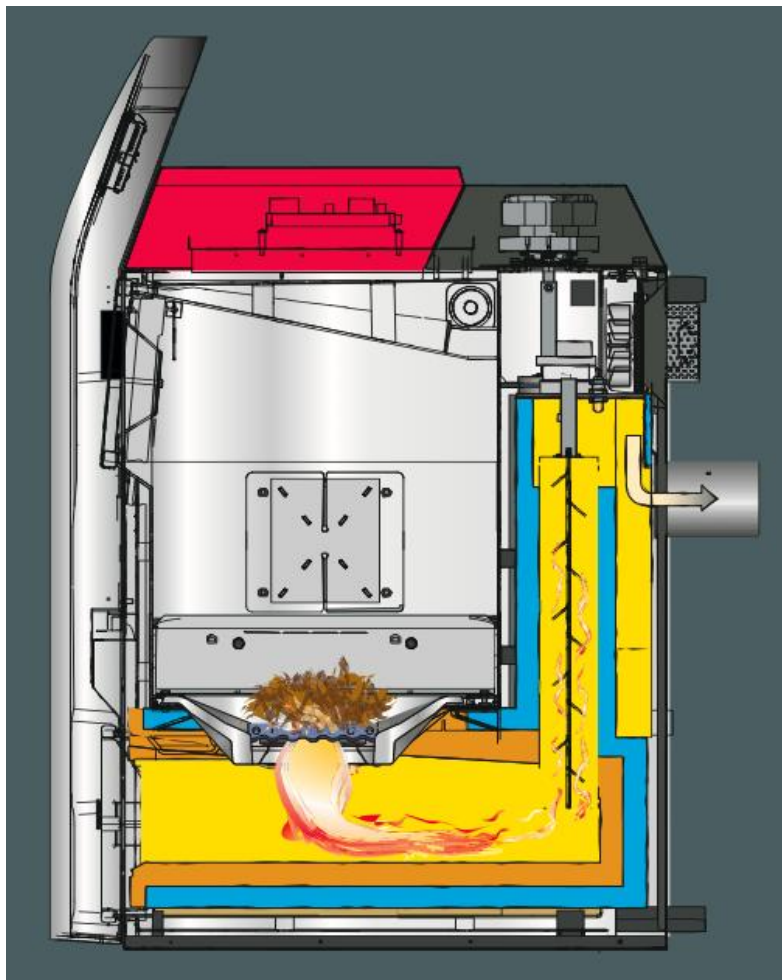


Abbildung 16: Solarfocus Therminator 2 [28]

2.2 Zusammenfassung

Alle Hackgutkessel beweisen im laufenden Betrieb ihre Zuverlässigkeit. Unter Betrachtung der Konstruktionsvorschläge aus Kapitel 1.3.8 werden die Staubemissionen mit nur geringfügigen Änderungen der Feuerungen nicht reduzierbar sein. Bei den betrachteten Biomassefeuerungen ist die Luftstufung zu gering und der Verbrennungsraum zu großflächig ausgeführt. In der Primärverbrennungszone wird zu viel Sauerstoff eingebracht und es können die Kaliumverbindungen zu leicht verdampfenden Kaliumoxiden reagieren. Späteres Kondensieren dieser Kaliumoxide verursacht im Wesentlichen die Feinstaubemissionen.

Bestehende Feuerungen müssen eine große Luftstufung realisieren. Das heißt, dass der Sauerstoffüberschuss in der Primärverbrennungszone so gering wie möglich gehalten werden sollte, aber trotzdem eine stationäre Verbrennung gewährleistet werden muss. Je nach Brennstoff und Wassergehalt ist daher ein Luftüberschuss von 0.2 - 0.4 einzustellen.

Tabelle 7 stellt eine Zusammenfassung der betrachteten Feuerungen dar. Man kann daraus die Brennstoffanforderungen, Art der Rückbrandsicherung, Ausführung des Hackguteinschubes und den Rosttyp ablesen. Weiters sind die Emissionswerte in Voll- und Teillast wie CO, Staub, NO_x, die Rauchgastemperatur sowie der Kesselwirkungsgrad enthalten. Die angegebenen Staubemissionswerte sind für den Betrieb im Feld nicht sehr aussagekräftig, da bei der Ermittlung dieser, ein qualitativ hochwertiges Fichten-Hackgut mit ausgesiebten Fein- sowie Rindenanteil verwendet wird. Weiters wird das instationäre Verhalten einer Feuerung ausgenutzt um möglichst geringe Emissionen für die Typenprüfung zu erreichen. [29]

Tabelle 7: Vergleich bestehender Hackgutfeuerungen inkl. Typenprüfwerten der Rauchgasemissionen [18]

Bezeichnung	P [kW] VL/TL	Brennstoff	Schleusen	Hackgut- einbringung	Rosttyp	Wirkungsgrad		Abgastemp. [°C]	CO [mg/Nm ³]	Staub [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]
						VL/TL - [%]	VL/TL - [%]				
Fröling T4	50/15	G30 W35	ZS 2 Kammern	Seiteneinschub	Gitterrost, kippar	93/93	140/85	20/59	15/11	124/95	
ETA HACK	49,5/14,5	G30-50 W35	ZS 1 Kammer	Seiteneinschub	Gitterrost, kippar	91/91	150/85	22/39	13/12	100/88	
HDG Bavaria Compact 50	50/12	G50	ZS 4 Kammern	Seiteneinschub	Gitterrost, kippar	92/92	160/105	105/168	15/29	109/88	
Hargassner WTH 49	49/14	G30 W20	Klappe	Seiteneinschub	Gitterrost, einteiliger Abschubrost	93/93	165/90	32/72	28/15	141/132	
Biotech HZ 50	49,5/13	G30-50 W35	Klappe	Fallschacht	Rost, kippar	92/91	117/74	11/35	21/n.g.	103/n.g.	
Greentech Evo HS50 Eco	49,5/15	G20-50 W15-30	Klappe	Seiteneinschub	mehrteiliger Kipprost	94/94	125/80	56/143	26/13	136/109	
Guntamatic Powerchip 40/50	50/12	G30-50	Klappe	Seiteneinschub	Stufenrost	96/93	120/70	9/64	8/n.g.	92/n.g.	
Gilles HPK RA 49	49/12	G50 W35	ZS 4 Kammern	Einschub	Rohrfeuerung	92/93	154/84	17/163	11/19	94/101	
Heizomat RHK-AK	50/0		ZS 4 Kammern	Seiteneinschub	Rohrfeuerung, Entschungung mit Kettenförderer	91,2	180	130	27	-	
KÖB-Viessmann Pyromat-DYN 45	49/10	G50 W35	Klappe	Seiteneinschub	Rost	92/92	138/79	19/163	22/37	-	
KWB Multifire 50	50/14,2	G30 W30	Klappe	Unterschub	Unterschubrost, mittig, Ascheabschub seitlich	91/92	160/90	156/198	19/9	145/159	
Lindner-Sommerauer SL 49-50 T	49/13,8	k. A.	Klappe	Unterschub	Unterschubrost, mittig, Ascheabwurf durch Rostöffnungen	91/93	165/115	18/66	6/n.g.	103/n.g.	
Solarfocus Terminator 2	49/13,85	G30 W30	ZS 4 Kammern	Fallschacht	Rost, Sturzbenner	93/94	131/68	64/122	31/14	113/103	

Legende: P - Kesselleistung; ZS - Zellschleuse; CO - Kohlenmonoxid; NO_x - Stickoxide; G30 - Größenfraktion; W30 - Wasseranteil; VL/TL - Voll- und Teillast

3 KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DES VERSUCHSSTANDES

Wie in Abschnitt 1.3.8 dargestellt, muss auf verschiedene Parameter der Verbrennung/Vergasung eingegangen werden, um die Staubbeladung möglichst weit herabzusetzen.

3.1 Vergasungsprinzip

Um die Zersetzung der natürlichen Kaliumverbindungen und die anschließende Bildung feinsten Staubpartikel zu verringern, ist es notwendig den Eintrag von Sauerstoff O_2 in die Primärverbrennungszone, sowie die Primärverbrennungstemperatur so gering wie möglich zu halten. Diese Anforderungen werden auch an Reaktoren der thermo-chemischen Biomasse-Vergasung zur Produktion eines Produktgases gestellt. Solche Produktgase werden in aufbereiteter Form in Gasmotoren zur Erzeugung elektrischer Energie bzw. zur Kraftstoffherstellung verwertet. Dabei werden die Komponenten wie Luft, das Produktgas und der Brennstoff entweder im Gegenstrom-/Gleichstromprinzip oder in Doppelfeuerungssystemen geführt.

Wie in Abbildung 17 ersichtlich, ist der Partikelgehalt in gegenstromgeführten Anlagen am geringsten. Der hohe Teergehalt bildet sich durch das Verdampfen leicht kondensierbarer Kohlenwasserstoffverbindungen im Bereich der Brennstoffzufuhr. Im Gegensatz zu Anlagen zur Produktgaserzeugung müssen diese Verbindungen in Wärmeerzeugern nicht abgeschieden werden, denn sie spalten sich durch die hohen Verbrennungstemperaturen in der anschließenden Sekundärverbrennungszone auf und verbrennen anschließend ohne Rückstände.

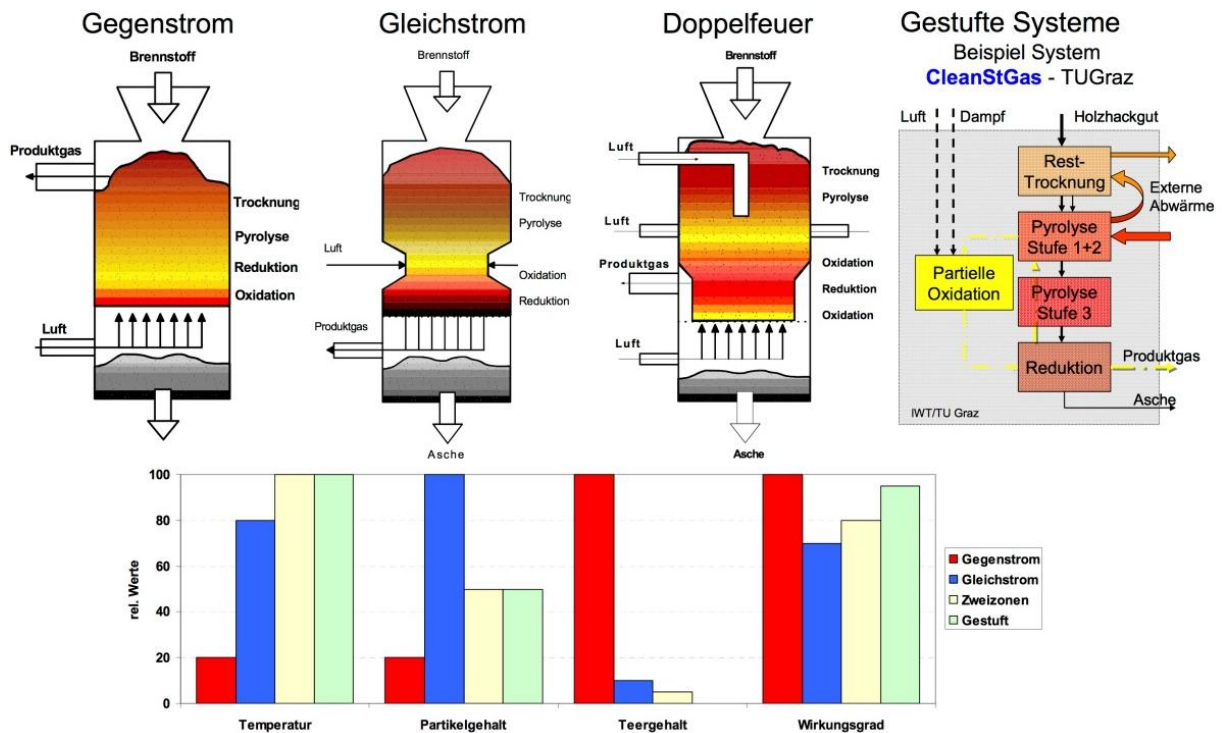


Abbildung 17: Vergasungsverfahren im Festbett [30]

Weitere Vorzüge, wie die einfache und robuste Bauweise, der hohe Vergasungswirkungsgrad, stabile Gaserzeugung mit einem breiten und kostengünstigen Brennstoffspektrum, sowie die Möglichkeit, auch organische Stoffe mit einem relativ hohen Wassergehalt umzusetzen, lassen das **Gegenstromvergaserprinzip** für die Verwendung in kleinen dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen als ideal erscheinen.

3.1.1 Größenabschätzung/-bemessung

Die Dimensionierung der Hauptabmessungen beruht zu größten Teilen aus empirischen Erfahrungen. Die Brennstoffwärmeleistung wurde mit rund 50-70 kW für den Versuchsstand festgelegt. Einerseits muss die Anlage eine gewisse Leistungsgröße aufweisen, um mögliche Randeffekte möglichst gering zu halten und auf der anderen Seite soll das Endprodukt als Wärmequelle für Einfamilienhäuser und landwirtschaftlich genutzte Gebäude auch in kleinen Baugrößen angeboten werden können.

Aus den Erfahrungen der Firma CLEANSTGAS ist mit Vergasungsleistungen im Gleichstromprinzip von ca. 400 kW/m² Rostfläche auszugehen. Eine andere Informationsquelle stellt ein Patent der Firma Windhager dar, welche einen schachtförmigen Gegenstromvergaser für den Brennstoff Holzpellets entwickelt hat. Hierbei werden Werte von umgerechnet 3000 kW/m² angegeben. All diese

Vergasungsreaktoren setzen einen zylinderförmigen Vergasungsschacht ein. Randeffekte wie das Durchbrennen von Kanälen an der Schachtwand bei sehr feinem Brennstoff sind bei kreisrunden Querschnitten am geringsten. Die Umrechnung der bekannten Rostbelastungen in kW/m^2 stellt nur einen groben Richtwert dar, da sich die Angaben sehr unterscheiden. Für den Leistungsbereich von ca. 50-70 kW ergibt sich somit ein Durchmesser von rund 200 mm bis 300 mm. [31, 32, 33]

Die Höhe des effektiven Vergasungsschachtes wird mit dem 1,5 fachen Durchmesser festgelegt. Aus der Literatur und den empirischen Erfahrungen wird sich ein erhöhter Glutstock bilden, der je nach Wassergehalt noch variiert. Dies ist auch der Grund für die größere Trägheit des Systems, speziell in den Anfahr- und Abschaltvorgängen. In Notsituationen muss daher auch eine Möglichkeit für die Abstückung und Kühlung des Glutbettes durch Eindüsen des interten Gases, Stickstoff N_2 , in die Primärverbrennungszone und in den Hackgutzuführungskanal, vorgesehen werden. [31, 32, 33]

Der maximale Luftbedarf wurde aus einer überschlägigen Verbrennungsrechnung mit ca. 150 kg/h ermittelt. Hierbei ist eine Sicherheitsreserve eingerechnet, sodass maximal 100 kW Brennstoffwärmeleistung umgesetzt werden kann.

3.1.2 Skizzen

Zu Beginn der Konstruktionsphase wurden verschiedene Konstruktionen grob skizziert und im Workshop am 22.03.13 am Institut für Wärmetechnik analysiert. In Abbildung 18 ist die Anordnung im Überblick dargestellt. Der Rost, hier als Wanderrost ausgeführt, befindet sich in einem gasdichten Brennraum in dem die Primärluft (PL) und das Rezirkulationsgas (REZI) zugeführt werden. Aus dem unteren Brennraum muss entweder die Asche manuell oder über eine Ascheaustragungsschnecke entfernt werden.

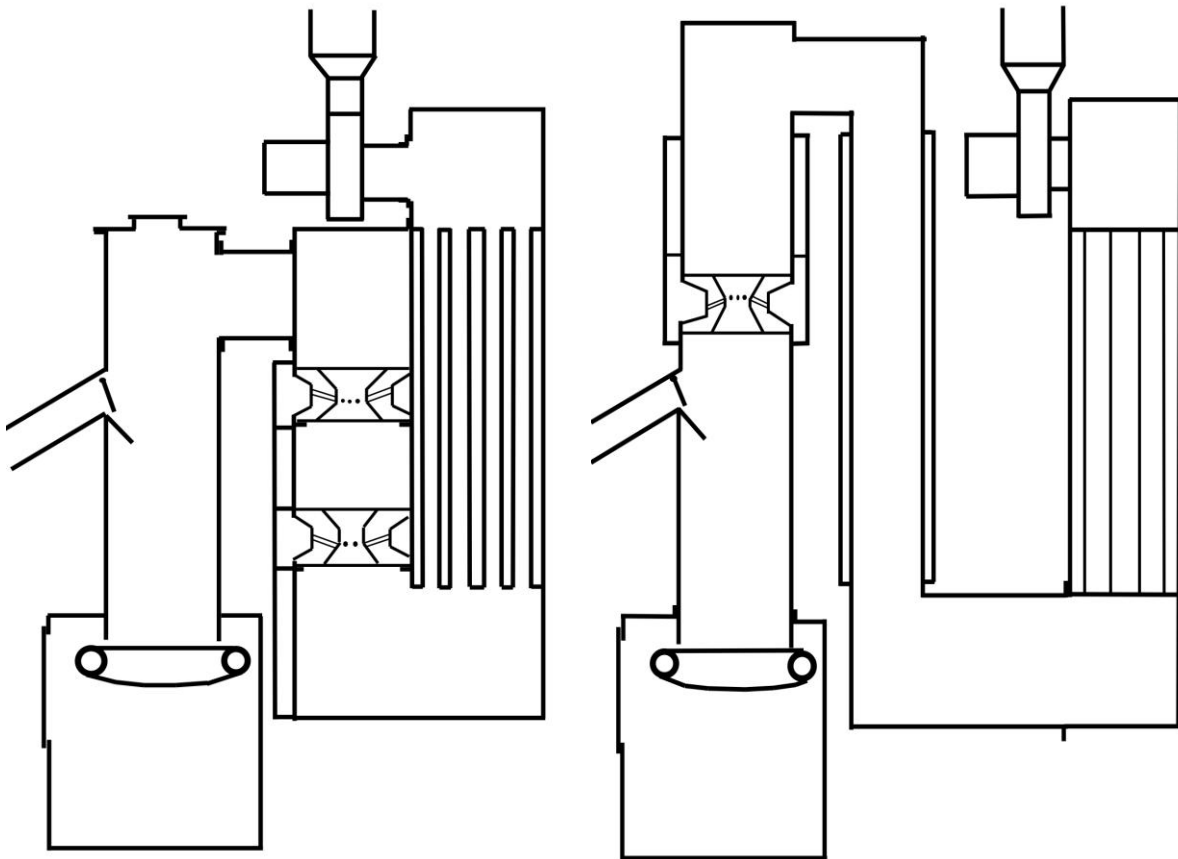


Abbildung 18: Prinzipskizzen möglicher Versuchsstandaufbauten

Über der Rosteinheit befindet sich der rotationssymmetrische Vergaserschacht in dem der Brennstoff im Gegenstromprinzip vergast wird. Der Einschub des Hackgutes erfolgt mit einer darüber angeordneten Stokerschnecke. Um große Oberflächentemperaturen bzw. Wärmeverluste von nicht wasserführenden Teilen der Anlage zu verhindern, müssen diese Komponenten gedämmt werden. Die Einblasung der Sekundärluft erfolgt entweder direkt darüber angeordnet (Abbildung 18 rechts) oder nach einem Übergang in den Fallschacht (Abbildung 18 links) vor Eintritt in den Wärmetauscher.

Um eine sichere Zündung des Produktgas-Sekundärluftgemisches zu gewährleisten, ist es notwendig, die Abgastemperaturen von mindestens 600 °C einzuhalten. Daher ist die Strecke von Primärverbrennungszone zur Eindüsungsstelle der Sekundärluft so kurz wie möglich auszuführen. Dennoch muss eine Rückströmung dieser unterbunden werden. Ein weiterer Grund für die Anordnung direkt darüber ist, dass sich beim Überströmen in den Fallschacht ein Rückströmwirbel direkt vor der Sekundärverbrennungszone bilden kann, welcher die Nachverbrennung negativ beeinflussen würde.

Das Rauchgas strömt anschließend direkt in einen Rohrbündelwärmetauscher und verlässt den Versuchsreaktor durch ein Saugzuggebläse in den Kamin.

Abbildung 19 rechts stellt das Prinzip eines Wanderrostes dar. Er besteht aus zwei angetriebenen Walzen, welche mit einem flächigen Kettensystem umschlungen sind. Die Verbrennungsluft wird darunter in einer Tasse aufgegeben und strömt durch Bohrungen/Schlitze der Rostelemente. Diese Konstruktion hat sich vor allem bei Müllverbrennungsanlagen, aufgrund ihrer Robustheit bewährt. Um in dem Vergaser nur die Ascheschicht auszutragen, wird am Ende eine einstellbare Abschürflippe vorgesehen.

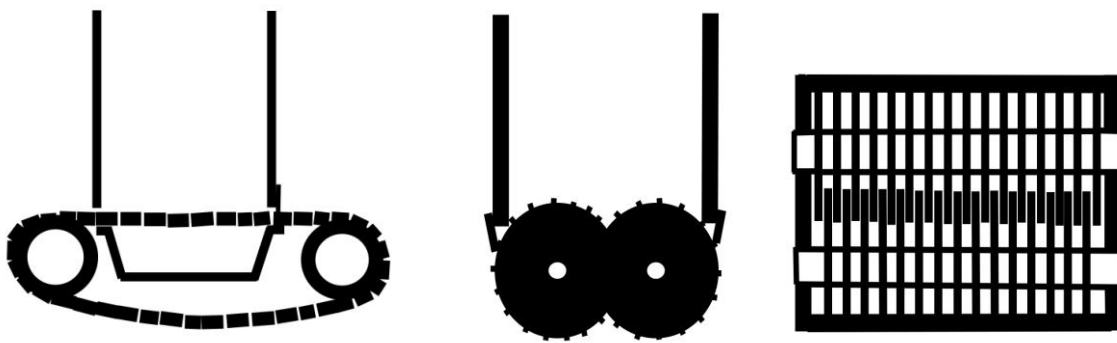


Abbildung 19: rechts: Wanderrost, links Walzenrost

Eine weitere Möglichkeit des Ascheabzuges stellt der in Abbildung 19 links dargestellte Walzenrost dar. Dieser befördert die Asche durch die sich gegenläufig drehenden Walzen nach unten. Leichte Verschlackungen können zerkleinert werden, jedoch neigt diese Ausführung bei Fremdgegenständen aus Metall (Nägel, Schrauben,...) zu Verklemmungen.

3.2 Konstruktion

Der Multifire II soll das neue Flaggschiff der Hackgutheizungen der Firma KWB werden. Dieser besteht aus einem Wanderrost mit bewährten Rostelementen, sowie aus einer CFD optimierten Sekundärverbrennungszone und wird in zwei Leistungsvarianten entwickelt. Der MF II stellt eine ideale Ausgangsbasis für den Versuchstand zur Reduktion der Rauchgasemissionen dar. In der ersten Testphase dessen Entwicklung, sind mehrere Prototypen von Zellradschleuse, Wärmetauscher und Kesselgrundkörper entstanden, welche keinen Zweck mehr erfüllen und für diesen Versuchsstand herangezogen werden können. Der erste Teil der Konstruktion war die Ermittlung des Bestandes. Später folgte die eigentliche Konstruktionsphase sowie auch die Umsetzungsphase mit ständiger Adaption der 3D Modelle, da diese

nicht immer mit den bereits bestehenden Teilen übereinstimmten. Somit war von Beginn an klar, dass ein großer Teil der Fertigung nicht an externe Kräfte übertragen werden kann, und aufgrund firmeninternen Kapazitätsmangels, eigenständig in der Entwicklungswerkstatt umgesetzt werden musste.

Die Fertigungszeichnungen wurden mit einer 3D-Konstruktionssoftware erstellt. [34] Als Standort des Versuchsstandes wurde die Versuchshalle der Tochterfirma Cleanstgas festgelegt, da zum einen ein großes Vergasungs-Know-How vorhanden war und zum anderen auf die dort verwendete Steuerungs- und Regelsoftware zurückgegriffen werden konnte. [35]

Einen wesentlichen Einfluss auf die Konstruktion der Vergasungszone stellte die Dichtheits- und Sicherheitsanforderung der Firma Cleanstgas dar. Da nicht von einem problemlosen Betrieb in der Anfangsphase ausgegangen werden konnte, musste ein Austritt von toxischen Gasen, wie Kohlenmonoxid unbedingt unterbunden werden. Daher mussten alle thermisch belasteten Flansche aus 10mm Edelstahlblech ausgeführt, die Sekundärverbrennungszone mit einem Gasbrenner ausgestattet und im Bereich der Hackguteinbringung ein leichter Unterdruck eingestellt werden.

3.2.1 Bestehende Komponenten

Abbildung 20 zeigt einen Schnitt durch den Multifire II 35-50 kW und die übernommenen Komponenten. Der rote Bereich in Abbildung 20 kennzeichnet den Kessel ab der Sekundärverbrennungszone inkl. Wärmetauscher und Saugzugeinheit. Violett markiert ist die Hackgutzuführung inkl. neu entwickelter Einkammerzellradschleuse. Auch Teile des Wanderrostes konnten, allerdings in der größeren Ausführung, von 50-120 kW, übernommen werden.

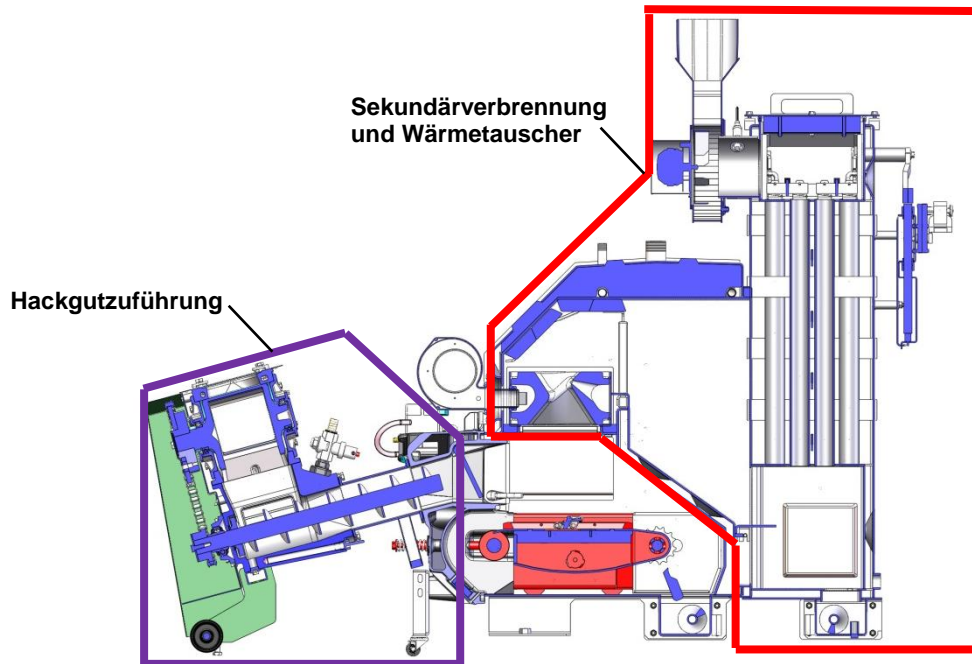


Abbildung 20: Schnitt Multifire II – 35-50kW

3.2.2 Versuchsaufbau

Dieses Kapitel soll nur einen kurzen Überblick über den tatsächlichen Aufbau des Versuchstandes geben. Abbildung 21 spiegelt den Versuchsaufbau schematisch wieder. Das im Hackgutbehälter befindliche Hackgut wird über eine Austragungsschnecke in ein Fallrohr, welches in einen Einlauf der Zellradschleuse mündet, gefördert. Die Zellradschleuse bildet den sicheren Verschluss zwischen Kessel und Brennstoffbunker und ist aufgrund ihrer Ausführung mit lediglich einer Kammer sehr störungsempfindlich. Unter der Zellradschleuse befindet sich die Stokerschnecke, welche den Brennstoff in den Übergangsteil zwischen Vergaserschacht und Sekundärverbrennungszone befördert und dort auf das Brennstoffbett abwirft. Von unten strömen die Primärluft und das Rezirkulationsgas durch den Rost zum Brennstoff und reagieren mit diesem zu einem Produktgas. Das Produktgas besteht aus CO , CO_2 , H_2O , H_2 , N_2 , ... und strömt mit ca. 250 – 800 °C zur Sekundärverbrennungszone, wo die Sekundärluft eingedüst wird. Hier findet die

vollständige Umsetzung des Brennstoffes bei Temperaturen zwischen 900 – 1000 °C statt. Das heiße Rauchgas gibt die entstandene Wärme über den Rohrbündelwärmetauscher an das Wassernetz ab und verlässt die Anlage durch ein Saugzuggebläse in den Kamin.

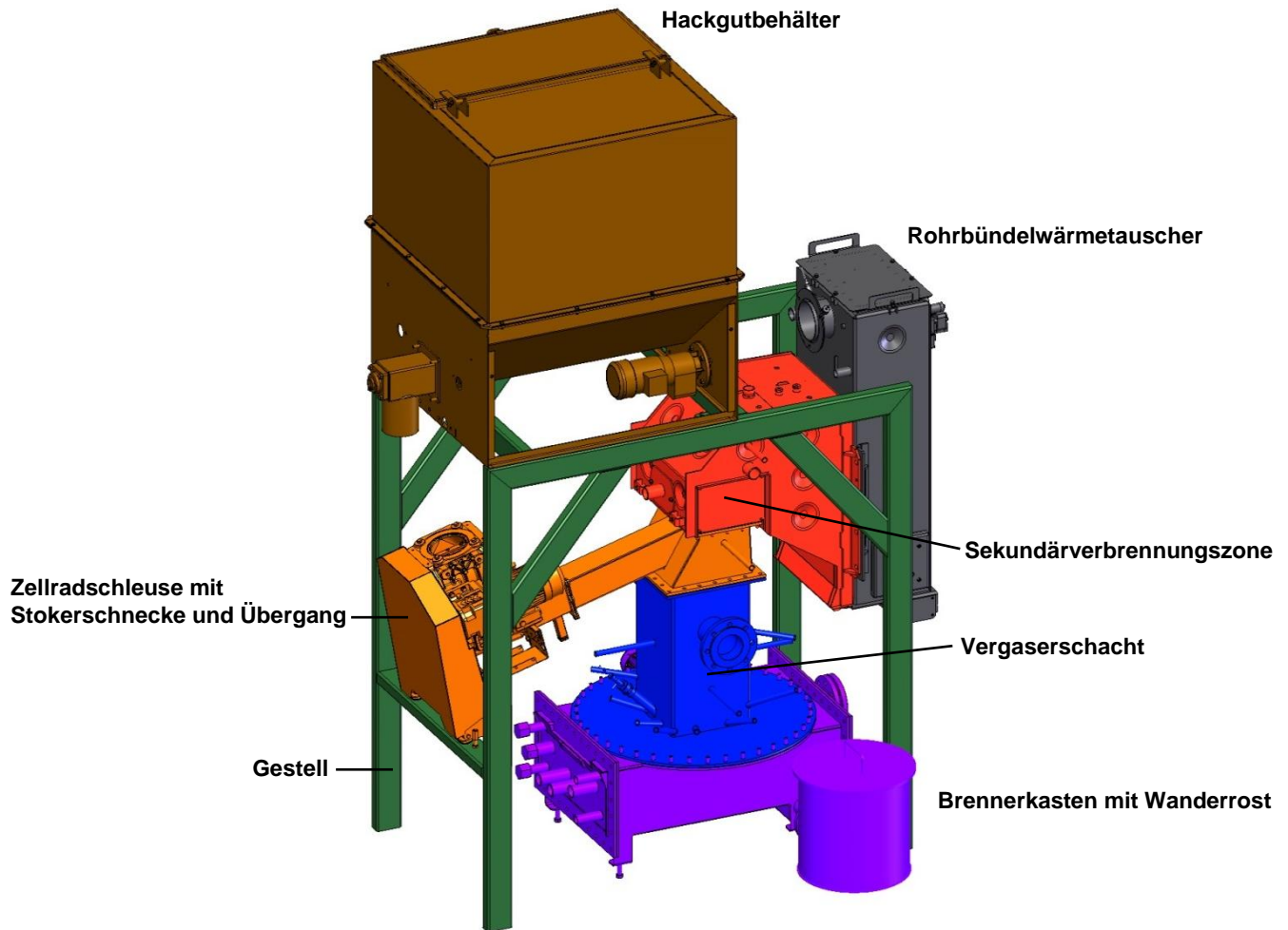


Abbildung 21: Überblick des Versuchsstandes

3.2.3 Detailausführungen

a) Hackgutbehälter

Der Hackgutbehälter besteht im Wesentlichen aus einem trichterförmigen Unterteil, einem quaderförmigen Aufsatz zur Vergrößerung des Speichervolumens und fasst in etwa einen Schüttraummeter Waldhackgut. Mit einer durchschnittlichen Dichte von ca. 230 kg/m^3 kann eine Masse von 230 kg eingefüllt werden und ermöglicht einen durchgehenden Betrieb von mindestens 10 Stunden bei einer Brennstoffwärmeleistung von maximal 90 kW. In Abbildung 22 ist der gesamte Hackgutbehälter im Schnitt dargestellt. Die Schnittflächen sind Blau eingefärbt. Der Antrieb erfolgt durch einen Drehstrom-Asynchronmotor (0,25 kW). Über ein Stirnradgetriebe und einen Kettenantrieb mit einer Gesamtübersetzung von $i=136,12$ treibt er die Austragungsschnecke mit einer Drehzahl von $n=6,1 \text{ U/min}$ und einem Drehmoment von $M=410 \text{ Nm}$, sowie zwei Rührarme im Inneren des Behälters an. Die Steigung der Austragungsschnecke nimmt progressiv zu, um ein Verstopfen und anschließendes Blockieren zu vermeiden. Die Rührarme sind notwendig, da Hackgut zur Brückenbildung neigt und nicht wie beispielsweise Pellets selbstständig nachrieselt. Am Ende der Austragungsschnecke, direkt über dem Abwurfschacht ist ein Quadratstahl auf die Welle aufgeschweißt. Mit dieser Abwurfkralle ist es nicht mehr möglich, dass das Hackgut die Flanschlagereinheit der Welle beschädigt, sondern Richtung Abwurfschacht zur Zellradschleuse nach unten gedrückt wird. Über die ausgetragene Hackgutmasse wird schlussendlich die Brennstoffwärmeleistung eingestellt. Da die Masse mangels Messtechnik nicht laufend erfasst werden kann, muss die Austragungsmasse vor jedem Versuch mit dem im Behälter befindlichen Hackgut empirisch ermittelt werden. D.h. es wird die Masse gewogen, welche die Schnecke in einem gewissen Zeitabschnitt ausfördert. Aufgrund dieser gewonnenen Daten kann auf die Austragemenge in kg/h bei 100% Einschaltdauer geschlossen werden. Einen wesentlichen Einfluss auf den beförderten Massenstrom stellt die Häufigkeit der Starts/Stopps und somit die unterschiedlichen Nachrückbedingungen des Brennstoffes dar. Daher muss bei der Ermittlung, sowie im Betrieb die Periodendauer gleich gehalten werden.

Bei geringerem Brennstoffbedarf wird die Schnecke bei gleicher Periodendauer aber mit variabler Ein-/Ausschaltzeit betrieben.

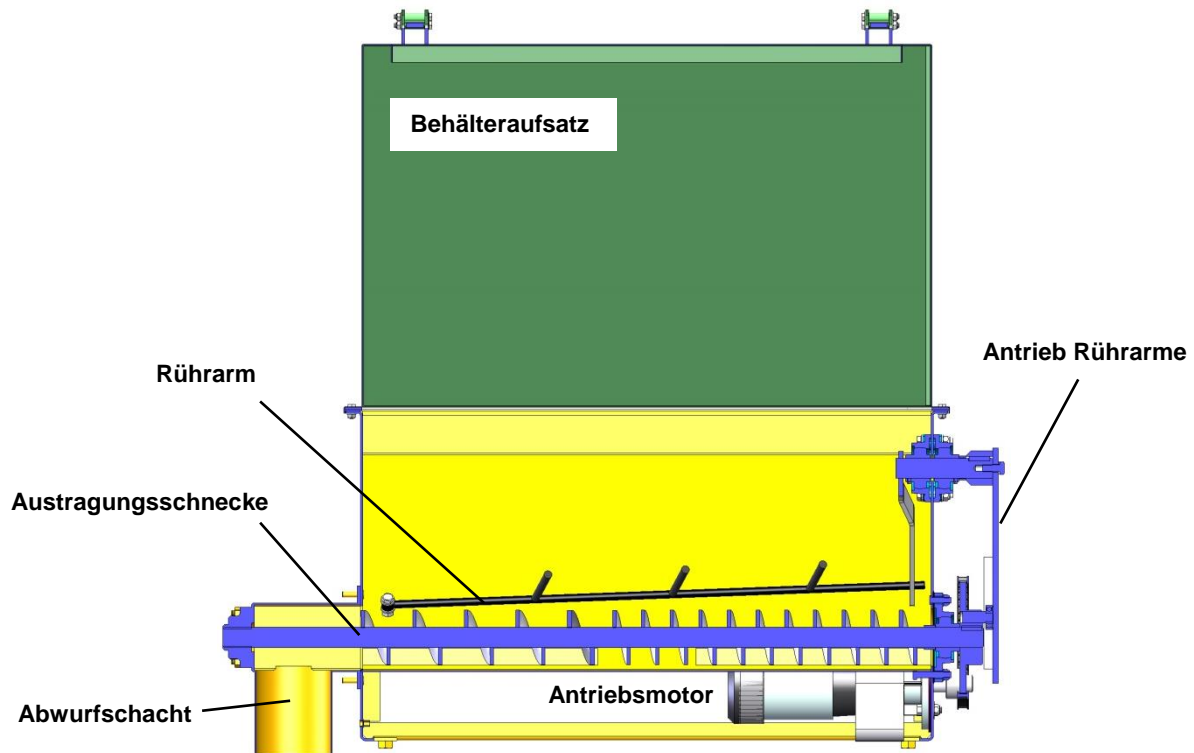


Abbildung 22: Hackgutbehälter

b) Stokerschnecke und Zellrad schleuse

Das Schnittbild dieser Baugruppe ist in Abbildung 23 dargestellt. Nachdem das Hackgut aus dem Hackgutbehälter ausgetragen wurde, fällt es durch ein Absaugungsspiralrohr zum Eintritt in die Zellrad schleuse. Der Grundkörper der Zellrad schleuse ist ein Gussteil, in welchem sich das Einkammerzellrad mit einer Drehzahl von 5,8 U/min dreht. Das Zellrad kann maximal 120 mm lange Holzstücke aufnehmen. Bei zu langem Hackgut trennt die auswechselbare Klinge das Holzstück mit einer Kraft von 4,6 kN ab und verhindert somit ein Blockieren der Zellrad schleuse. Der Antrieb erfolgt ebenfalls mit einem Drehstrom-Asynchronmotor mit einer Leistung von 0,25 kW. Bei weiterer Drehbewegung des Zellrades fällt das Hackgut in den Stokerkanal mit einem Querschnitt von 120 x 120 mm, der den direkten Weg zum Vergaserschacht darstellt. Zu Beginn dieses Kanales ist eine Wartungsöffnung vorgesehen, um eine eventuelle Blockade des Brennstoffes zu lösen. Um thermische Rückwirkungen (Rückbrand) so gut wie möglich auszuschließen, ist der Stokerkanal im Vergleich zum ursprünglichen Kessel mit einer Länge von 800 mm um das Doppelte verlängert worden. Weitere Sicherheitseinrichtungen gegen Rückbrand sind eine thermische Ablaufsicherung und ein Stutzen zur Eindüsung von Stickstoff N_2 . Die thermische Ablaufsicherung beruht auf der Ausdehnung einer Flüssigkeit in einer geschlossenen Kapsel, welche

durch ein Kapillarrohr mit einem Ventil verbunden ist. Dehnt sich nun durch Temperaturanstieg die Flüssigkeit aus, wird das Ventil durch den steigenden Druck im Kapillarrohr geöffnet und es kann Löschwasser in den Stokerkanal fließen. Der Löschwasserbehälter fasst 10 Liter Wasser und ist in Höhe des Brennstoffbehälters angebracht. Der negative Effekt dieser Löschmethode ist die anschließende Reinigung des nassen und somit verklebten Kanals und wird daher erst als letzte Instanz ausgelöst. In erster Linie soll der Rückbrand durch Stickstoff unterbunden werden. Es besteht kein Einfluss auf den Verbrennungsvorgang, da das inerte Gas nicht mit anderen chemischen Elementen reagiert.

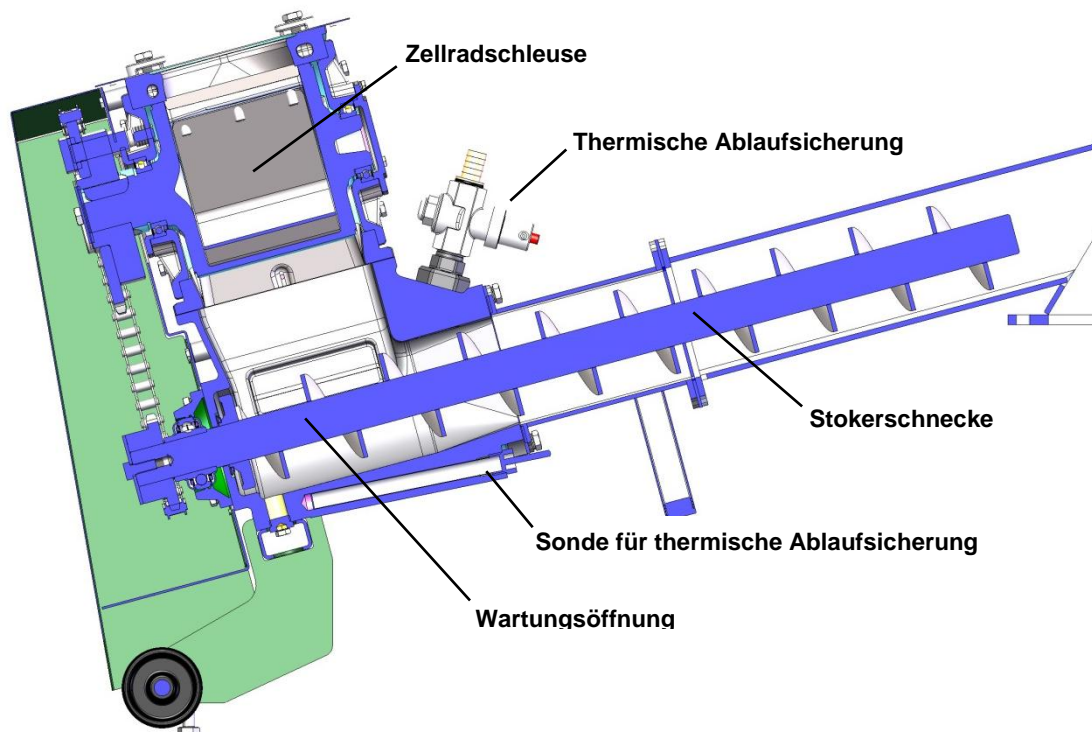


Abbildung 23: Einkammerzellradschleuse mit anschließender Stokerschnecke

c) Vergasungsbereich

In Abbildung 24 ist der Bereich der Vergasung dargestellt. Aus dem Stokerkanal (links oben) wird das Hackgut zum Übergangsteil zwischen Vergaserschacht und Sekundärverbrennungszone geschoben und fällt anschließend auf das im Vergaserschacht befindliche Brennstoffbett. Durch die dort herrschenden Temperaturen wird das Hackgut sofort getrocknet und pyrolysiert im Anschluss, sodass das Brennstoffbett schlussendlich aus Koksstücken besteht.

Zur Montage bzw. zur Demontage ist der Flansch zwischen Übergang und Vergaserschacht zu öffnen und der gesamte Vergasungsbereich über vier

Stellschrauben zu senken. Mit einem Paletten-Hubwagen kann diese Einheit zur Inspektion abtransportiert werden.

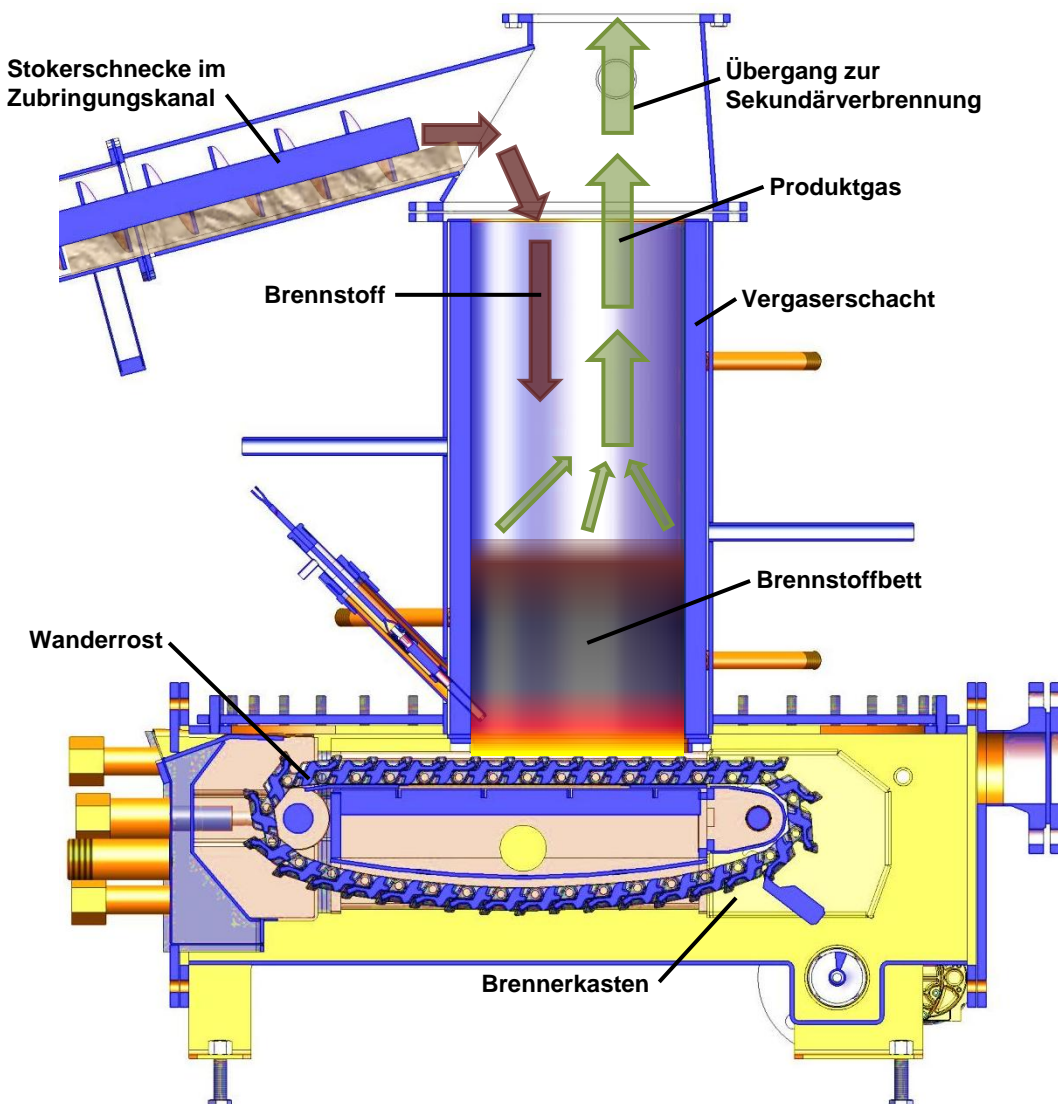


Abbildung 24: Überblick des Vergasungsbereiches

d) Vergaserschacht

Der Vergaserschacht besteht im Inneren aus einem hohtemperaturbeständigen keramischen Kaminprofilrohr der Firma Schiedel mit einem Innendurchmesser von 250 mm, einer Wandstärke von 10 mm und einer Höhe von 600 mm. Durch zwei Metallringe wird dieses im Inneren eines quadratischen Blechschaftes zentriert. Um den dort herrschenden Temperaturen um 900 °C und den extrem aggressiven Bedingungen zu widerstehen, müssen dieser Blechschaft, sowie der Übergang aus einem hohtemperaturbeständigen Stahl (1.4841) gefertigt sein. Damit auch bei Temperatureinwirkung die Dichtheit der Flansche gewährleistet wird, sind diese aus

10mm Stahlblech mit einem Lochabstand der Flanschschrauben von 60 – 70 mm ausgeführt. Die Standardblechstärke sonstiger Teile ist 5 mm. Der Hohlraum zwischen Keramikrohr und Stahlmantel ist mit Keramikfaserwolle gefüllt.

Die **Temperaturmessung** im Inneren des Vergaserschachtes erfolgt mit 10 Thermoelementen des Type K. Diese können bis zu 1200 °C verwendet werden. Die Thermoelemente sind mit einem vertikalen Abstand von 50 mm und spiralförmig um den Umfang des Schachtes angebracht. Grund für diese spiralförmige Anordnung ist, dass im Falle eines Durchbrennens an der Schachtwand in der Nähe der Thermoelemente nicht alle Thermoelemente falsche Messwerte liefern. Eine anschließende Gruppierung und Mittelwertbildung mehrerer Messwerte liefert wesentlich aussagekräftigere Messergebnisse. Die Thermoelemente haben eine Länge von 400 mm, sowie einen Durchmesser von 3 mm und können mittels Teflon-Klemmringverschraubung während des Betriebes geringfügig in ihrer radialen Messposition verschoben werden. Die Zuführung erfolgt durch ½ " Messstutzen, wie in Abbildung 25 zu sehen ist. Der Durchbruch des Keramikrohres für die Thermoelemente erfolgte mit einem 10 mm, mit Diamanten bestückten, und wassergekühlten Bohrer, da normale Steinbohrer das Keramikrohr zersprengen würden.

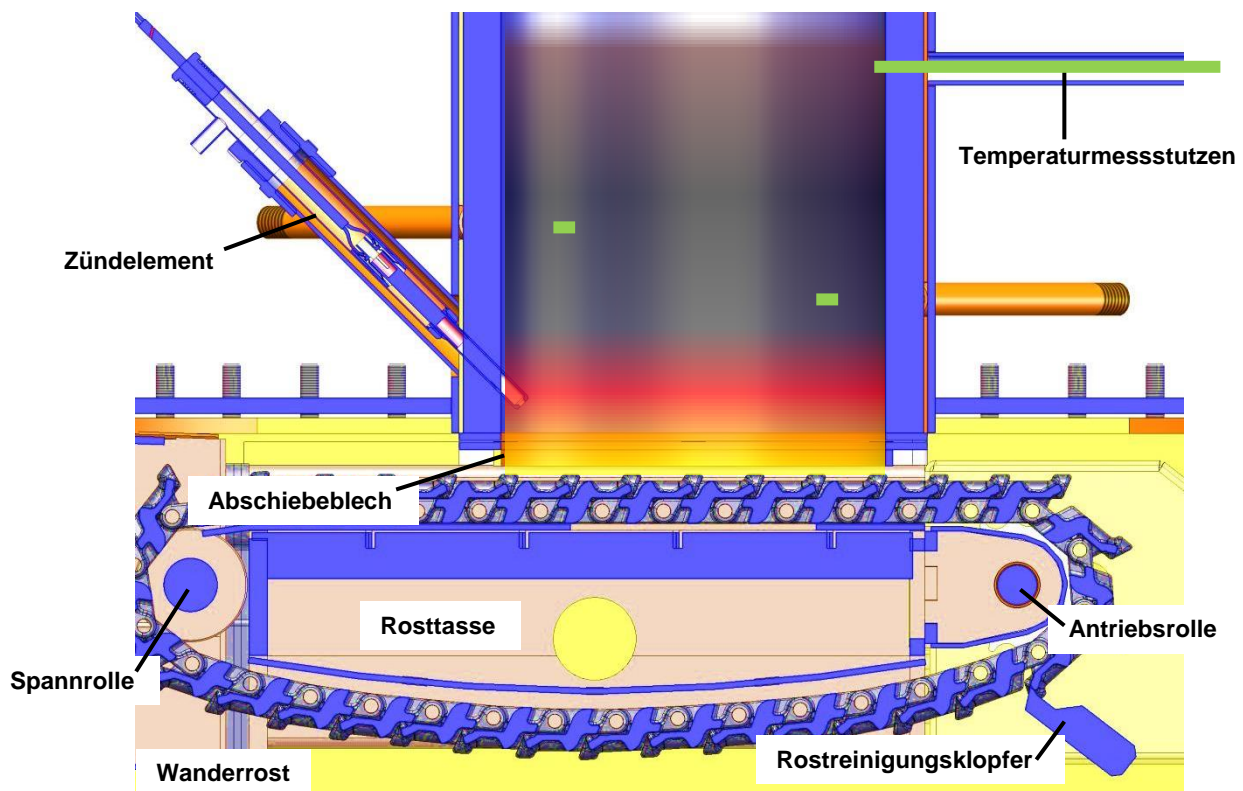


Abbildung 25: Detailansicht des Vergaserschachtes

Eine weitere Öffnung am unteren Ende des Schachtes dient der **Zündeinrichtung**. Diese besteht im Wesentlichen aus einem Rohr, einem 300 W Keramik-Heizelement und einer Düse, welche die heiße Luft möglichst ohne Verluste zum zu zündenden Hackgut befördert. Vor Beginn der eigentlichen Feuerungsversuche wurde ein Zeit-Temperatur Diagramm aufgezeichnet, welches Aufschluss über den möglichen Zündzeitpunkt gibt. Die Messreihen, Standard 1 und Standard 2, aus Abbildung 26 zeigen den normalen Zündvorgang, indem das Magnetventil für die Zündluft und das Keramikheizelement gleichzeitig eingeschaltet werden. Um möglichst schnell hohe Zündtemperaturen zu erreichen, wurden auch andere Zündintervalle getestet. Impuls 1 und Impuls 2 stellen ein vorzeitiges Einschalten des Heizelementes dar. Das Heizelement und das Metallrohr können sich in diesem Bereich stark erhitzen und durch plötzliches Zuschalten der Zündluft soll sich die Luft möglichst schnell zum Brennstoffbett bewegen. Der Grundgedanke dahinter war, ein möglichst instationäres Verhalten zu erzeugen, indem die zuvor erhitzte Luft möglichst wenig Energie an die metallische Düse abgibt. Nachdem sich gegen der Erwartungen keine wesentliche Temperaturüberhöhung im Impulsbetrieb gezeigt hat und der Impulsbetrieb ein höheres Potential der Überhitzung des Keramikelementes bedeutet, wird für zukünftige Zündvorgänge der Standard-Zündvorgang gewählt.

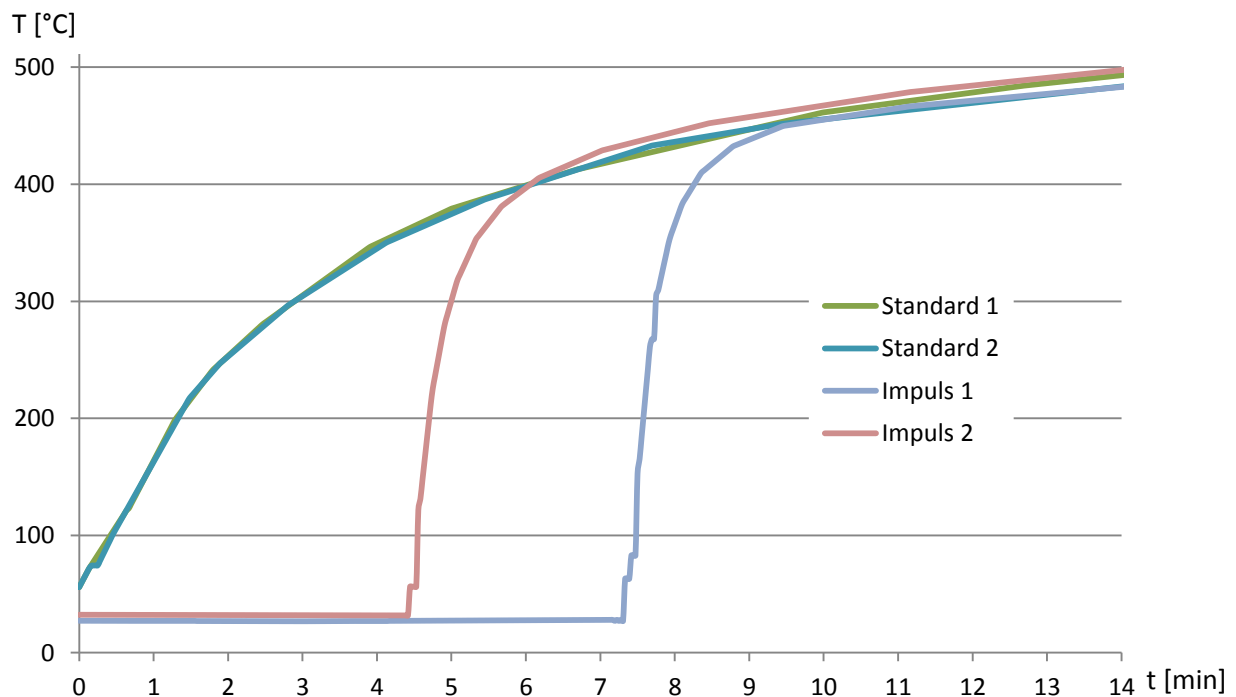


Abbildung 26: Aufheiz-Diagramm des Zündelementes

Am unteren Ende des Vergasungsschachtes in Abbildung 25 ist ein austauschbares **Abschiebeblech** vorgesehen. Es verringert den Abstand zwischen Rostelementen

und Keramikrohr und verhindert außerdem, dass Scherkräfte vom Rost in das empfindliche Keramikrohr eingeleitet werden. Dieses Abschiebeblech besteht ebenfalls aufgrund der hohen Temperaturen aus 1.4841-Stahl und dient dazu, die abgezogene Ascheschicht und den damit entstehenden Druckverlust möglichst gering zu halten.

Der Vergasungsbetrieb hat ein Anwachsen und somit einen wesentlich höheren Glutstock als normale Rostfeuerungen zur Folge. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass der Vergaserschacht nicht überfüllt wird und somit ein Rückbrennen in die Hackgutzubringung möglich wäre. Die Begrenzung des Füllstandes erfolgt mit einem **Drehflügelgeber**. Der Drehflügelgeber ist im Schnitt in Abbildung 27 dargestellt. Er besteht im Wesentlichen aus einer Antriebs-/Lagereinheit (1,4), Antriebswelle (3), einer Spüleinrichtung, eines Montageflansches (2) und einem Flügelrad. Das Flügelrad sitzt im Inneren des Schachtes und wird über die Welle von der Antriebseinheit in ständiger Drehbewegung gehalten.

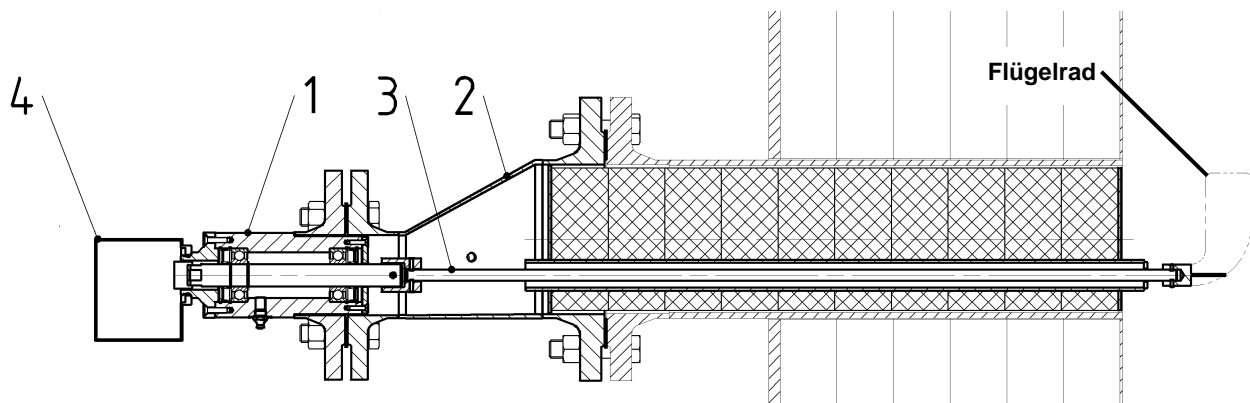


Abbildung 27: Drehflügelgeber [36]

Steigt nun das Brennstoffbett, werden der Widerstand am Flügelrad und das Drehmoment schlagartig größer. Das mit einer Feder in der Antriebseinheit eingestellte Grenzdrehmoment spannt die Feder und schaltet anschließend einen Schalter. Dieses Signal des Schalters wird weiterverwendet, um die Hackgutzubringung, also die Austragungsschnecke im Hackgutbehälter, sowie die Stokerschnecke zu stoppen. Um eine thermische Rückwirkung und Beschädigung der Lagereinheit zu unterbinden, wird die Welle mit Stickstoff gespült. Der Stickstoff strömt anschließend in den Vergaserschacht.

Der Achse des Drehflügelgebers ist in der vertikalen Position von 450 mm über der Rostoberkante angeordnet. Mit einer Flügellänge von etwa 50 mm ergibt sich daraus ein Grenzfüllstand von 400 mm, welcher jedoch aufgrund der Schüttgutdichte des

Brennstoffbettes und dem Wegschieben des Flügelrades leicht variieren kann. Da der tatsächliche Füllstand noch nicht sicher gesagt werden kann, ist ein weiterer Flansch in der Vertikalen Position von 525 mm vorgesehen. Mit zusätzlicher Variation der Flügellänge kann somit ein Füllstand von 475 mm bis 500 mm detektiert werden.

e) *Wanderrost*

Der verwendete Wanderrost wurde aus dem Bestand bestehender Prototypen entnommen. Die Wanderrost-Baugruppe besteht wie in Abbildung 28 aus dem Rostkasten, auf welchem die Rostträger montiert sind, den hohlen Rostträgern, der Rosttasse, der Antriebs- und Spannrolle und der umlaufenden Wanderrostkette.

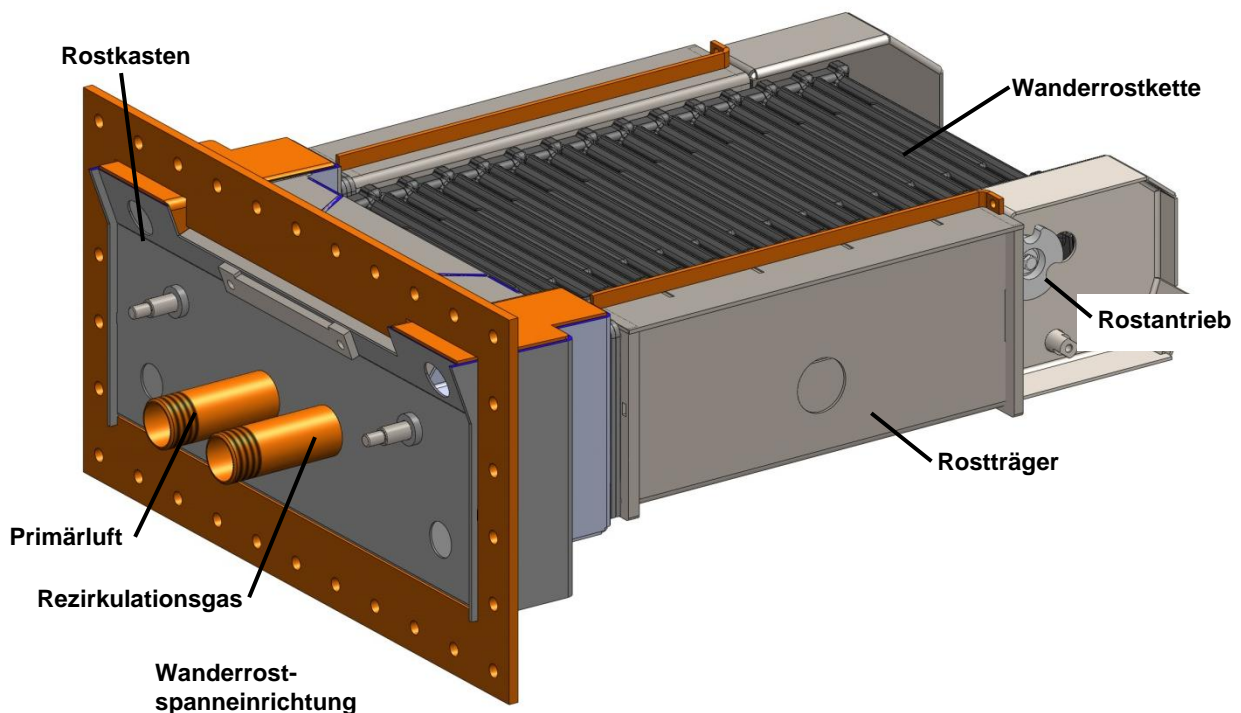


Abbildung 28: Wanderrost

Im Vergleich zum aktuellen Wanderrostmodell ist der Rostkasten als geschweißte Version ausgeführt, welche eine Adaption in Hinblick auf die Schweißbarkeit wesentlich vereinfachte. Der Rostkorpus wurde um ca. 20 cm gekürzt, ein Flansch zur Verschraubung am Brennerkasten aufgeschweißt, und auch die Spanneinrichtung musste abgedichtet werden. Zwei weitere 1,5" Rohrstützen sind für die Versorgung von Primärluft und Rezirkulationsgas am Rostkorpus aufgeschweißt, in denen sie sich vermischen und über die seitlich angeordneten Rostträger unter die Rostelemente, in die Rosttasse, strömen. Durch eine quadratische Öffnung, mit einer Seitenlänge von 160 mm, kann dieses Luftgemisch aus der Rosttasse durch den Wanderrost zentrisch in das Glutbett entweichen. Über diesen Luftweg ist daher

gewährleistet, dass die Primärluftversorgung durch den Rost strömen muss, diesen kühlt und eine gleichmäßige Beaufschlagung der primären Verbrennungszone bedeutet.

Die Wanderrostkette weist eine nutzbare Länge von 590 mm und eine Breite von 290 mm auf. Da das Schamotterrohr einen geplanten Außendurchmesser von 300 mm aufweist, wurde der Wanderrost in der größeren Ausführung von 50 - 120 kW ausgewählt. In Abbildung 29 sind drei Wanderrostelemente grafisch dargestellt. Die gegossenen Rostelemente weisen eine Längsteilung von 40 mm und eine Gesamtbreite 337 mm auf und bestehen aus einem warmfesten mit Silizium und Molybdän legierten Gusseisen mit Kugelgraphit.

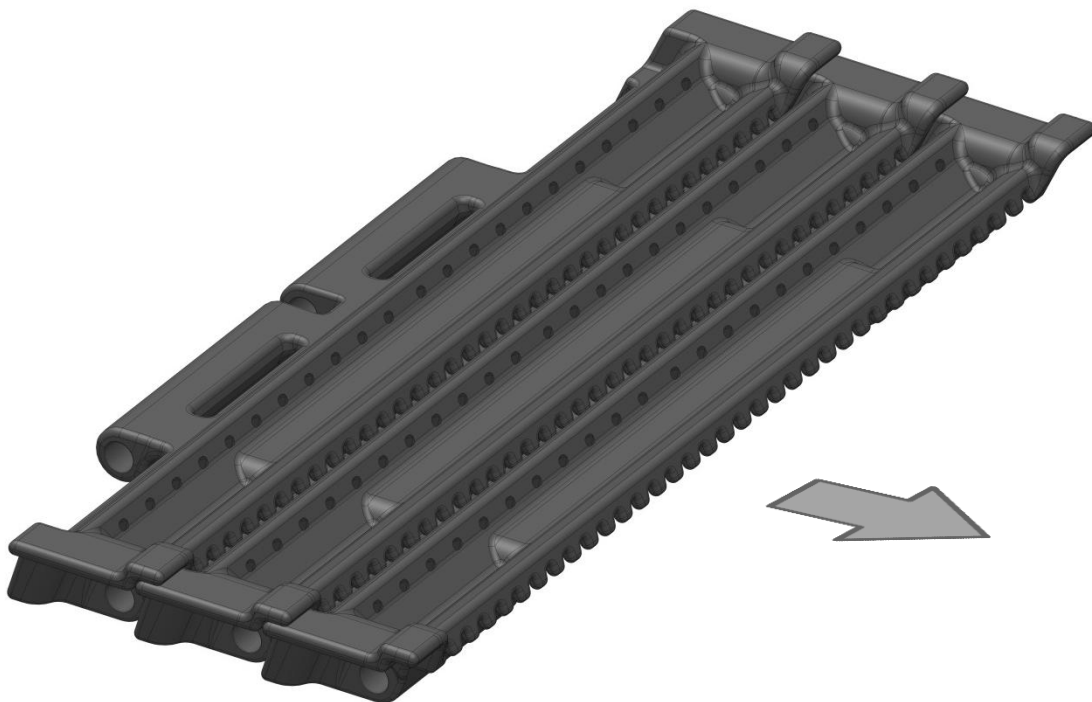


Abbildung 29: Wanderrostelemente in Schrägansicht [37]

In Abbildung 30 sind drei Rostelemente im Schnitt abgebildet. Die Primärluft, von unten kommend, kann ein Rostelement über die in Bild rot markierten Pfade passieren und strömt von unten in das Brennstoffbett. Die unterste Schüttung des Brennstoffbettes verbrennt somit bei Sauerstoffüberschuss und lässt nicht brennbare Bestandteile des Brennstoffes als Asche übrig. Die Asche wird mit dem Rost in Förderrichtung, nach rechts, ausgetragen. Um diese Ascheschicht möglichst dünn zu halten ist wie in Kapitel d) Vergaserschacht ein Abschiebeblech vorgesehen. Bei sehr geringem Primärluftmassenstrom wird es vorkommen, dass zum Teil glühende Koksstücke mit ausgetragen werden. Durch die umgebende Luft im Brennerkasten können diese jedoch noch vollständig ausbrennen.

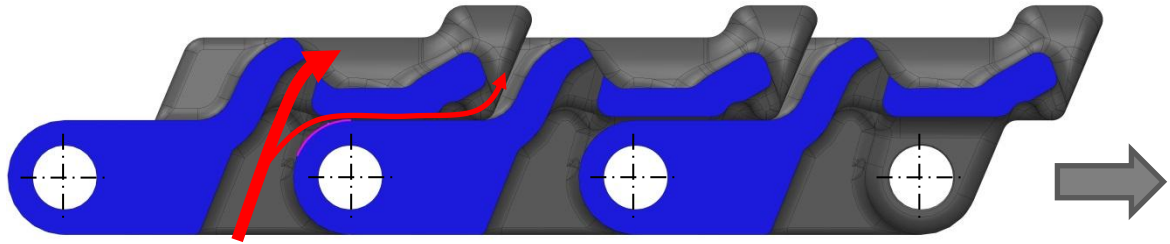


Abbildung 30: Schnittdarstellung dreier Rostelemente [37]

Der Rost wird über einen drehzahlgeregelten Asynchronmotor mit einer elektrischen Leistung von 0,075 kW, 3,3 U/min und einem Drehmoment von $M=119$ Nm angetrieben. Da die Getriebeübersetzung der bestehenden Motor-Getriebeeinheit zu klein war, konnte die Rostgeschwindigkeit einerseits über einen Frequenzumrichter und zum anderen durch den Impulsbetrieb herabgesenkt werden. Die angestrebte Rostgeschwindigkeit liegt bei etwa 20 mm/min. Gleich wie bei der Steuerung der ausgetragenen Hackgutmenge aus dem Brennstoffbehälter können auch andere durchschnittliche Rostgeschwindigkeiten durch Variation der Ein- und Ausschaltzeiten in einer festgelegten Periodendauer eingestellt werden. Im Falle eines Verklemmens von Hackgut reißt sich der Rost mit einer Kraft von bis zu 2480 N los. Durch einen induktiven Näherungssensor und eine Lochscheibe, welche am gegenüberliegenden Getriebeausgang sitzt, kann durch die Impulse im Betrieb auf eine Drehbewegung des Rostes oder ein Steckenbleiben geschlossen werden. In diesem Fall muss der Anlagenführer den Rost mit einem Vor- und Rückfahren frei bekommen oder die Brennstoffzufuhr unterbinden, um den Hackgutvergaser abzustellen.

Der Antriebsmotor sitzt außerhalb des Brennerkastens und muss den Rost durch eine gasdichte Durchführung antreiben. Der Antrieb erfolgt mit einer fliegend gelagerten Welle, da sich der Rost unter der thermischen Belastung in Längsrichtung ausdehnt.

Die Asche fällt am Ende des Wanderrostes in den darunter befindlichen Ascheaustragungskanal. Anhaftende Partikel werden mit einem schwerkraftgetriebenen Rostreinigungsklopfer (Abbildung 25) von den Rostelementen abgereinigt.

f) Unterer Brennerkasten

Bei der Konstruktion des Brennerkastens mussten verschiedene **Anforderungen** beachtet werden. Um die Auswirkungen einer Verpuffung in diesem Abschnitt so gering wie möglich zu halten, muss das tote Volumen so klein wie möglich sein. Mögliche Lösungsansätze sind, dieses so klein wie möglich zu gestalten oder mit einer temperaturbeständigen Steinwolle oder Keramikfaserwolle auszufüllen. Im Sinne der Wartungsfreundlichkeit wurde von der Ausfüllmethode abgesehen, da diese bei der Reinigung immer zu entfernen ist. Weiters ist es erforderlich, den Rostkasten vom Vergaserschacht separat demontieren und mit einem Palettenwagen wegtransportieren zu können. Um dieses Rostsystem auch an einem Laborvergaser zur Herstellung eines Produktgases testen zu können, mussten die Anschlussmaße des Flansches ($\text{Ø}850\text{mm} \times 40 \times \text{Ø}13 \text{ mm}$) sowie die maximale Flanschhöhe von 420 mm übereinstimmen. Abbildung 31 stellt die Baugruppe des Rostkastens mit Antrieben, Wanderrost und Aschebehälter dar.

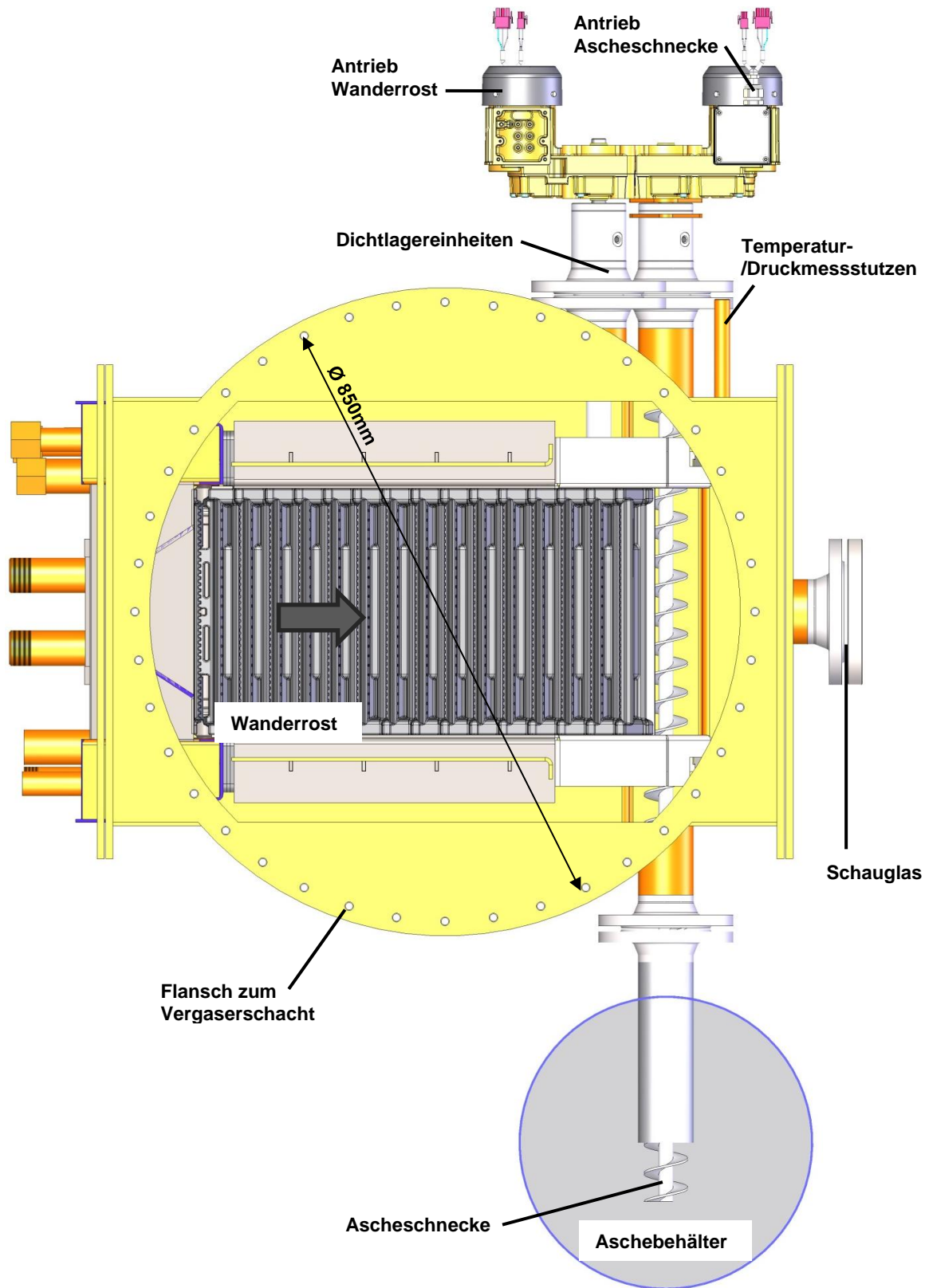


Abbildung 31: Rostkasten Draufsicht

Der untere Brennerkasten ist aus 1.4301 Edelstahl gefertigt und wurde gasdicht verschweißt. Vorne und hinten sind zwei große rechteckige Flansche angeordnet, die einerseits den Wanderrost aufnehmen und auf der anderen Seite einen Einblick

durch ein Schauglas auf den Rost gewähren. Aufgrund der Temperaturbeständigkeit ist dieses als 7 mm dickes Quarzglas mit einem durchgängigen Durchmesser von 80 mm ausgeführt. Die Flansche sind mit einem selbstklebenden Teflonband abgedichtet. Auf den Längsseiten befinden sich die Antriebseinheiten für den Rostantrieb und die Ascheaustragungsschnecke. Gegenüberliegend der Antriebe ist der Aschebehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 50 l angeordnet.

Der Wanderrost trägt die Asche aus dem Vergaserschacht über den Rostabklopffhammer im Impulsbetrieb zur **Ascheschnecke**. Diese startet den Förderbeginn gleichzeitig mit dem Rost, läuft aber einige Sekunden nach. Den Antrieb stellt ein 230 V Antrieb mit einer Leistung von 30 W dar. Das Eindringen von Luft bzw. das Ausströmen von Produktgasen muss bei der Durchführung der Ascheschnecke sowie der Rostantriebswelle ausgeschlossen sein. Dies erfolgt mit einer von CLEANSTGAS entwickelten **Dichtlagereinheit**, welche im Wesentlichen auf einem Vorschweißflansch, einem zylindrischen Gehäuse sowie zwei Standard Rillenkugellagern und Radialwellendichtringen besteht. Weiters ist das zylindrische Gehäuse mit einer Fettfüllung ausgestattet. Die Antriebe sind auf die, mit einer Passfeder ausgestatteten, Antriebswellen aufgesteckt und stützen ihr Drehmoment über ein Hebelsystem auf den Dichtlagereinheiten ab.

g) Sekundärverbrennungszone

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, wurde der bestehende Hackgutkessel, Mulitifire 2, umfassend adaptiert und konnte somit weiterverwendet werden. Die ursprüngliche primäre Verbrennungszone sowie die Aufnahme des Sekundärluftsteines mussten mit einem Plasmaschneidegerät und Winkelschleifer herausgetrennt werden. Da einige Bereiche der Seitenwände wasserführende Komponenten sind, war es notwendig, diese anschließend dicht zu verschließen. Nach Reinigung der oxidierten Schnittfläche des Plasmaschneidevorganges wurden entsprechende Bleche zugeschnitten und mit Hilfe eines MAG-Schweißgerätes eingeschweißt. Um eine anschließende Dichtheit zu gewährleisten ist der Kesselkörper mit einem Druck von 5bar auf Dichtheit geprüft worden. Vorhandene, mit dem freien Auge nicht sichtbare Schweißporen wurden großzügig ausgeschliffen und wieder verschweißt. Weiters sind eine neue Aufnahme des Sekundärluftsteines und ein Flansch zum Übergang hinzugekommen.

Aus der Vergasungszone aufsteigende Produktgase strömen durch den Übergang, der die Querschnittsänderung zwischen Vergaserschacht und bestehendem Kessel

ausgleicht, in die Zone der Sekundärverbrennung. Wie in Abbildung 32 ersichtlich, besteht diese im Wesentlichen aus einem düsenförmig ausgebildeten Sekundärverbrennungsstein. Dieser weist einen Öffnungsquerschnitt von 230 mm x 70 mm auf und besteht aus feuerfestem Beton. Die Ringleitung im Stein ist als umlaufende Nut ausgeführt und wird von einem umschließenden Blechgehäuse und keramischen Gewebebändern abgedichtet.

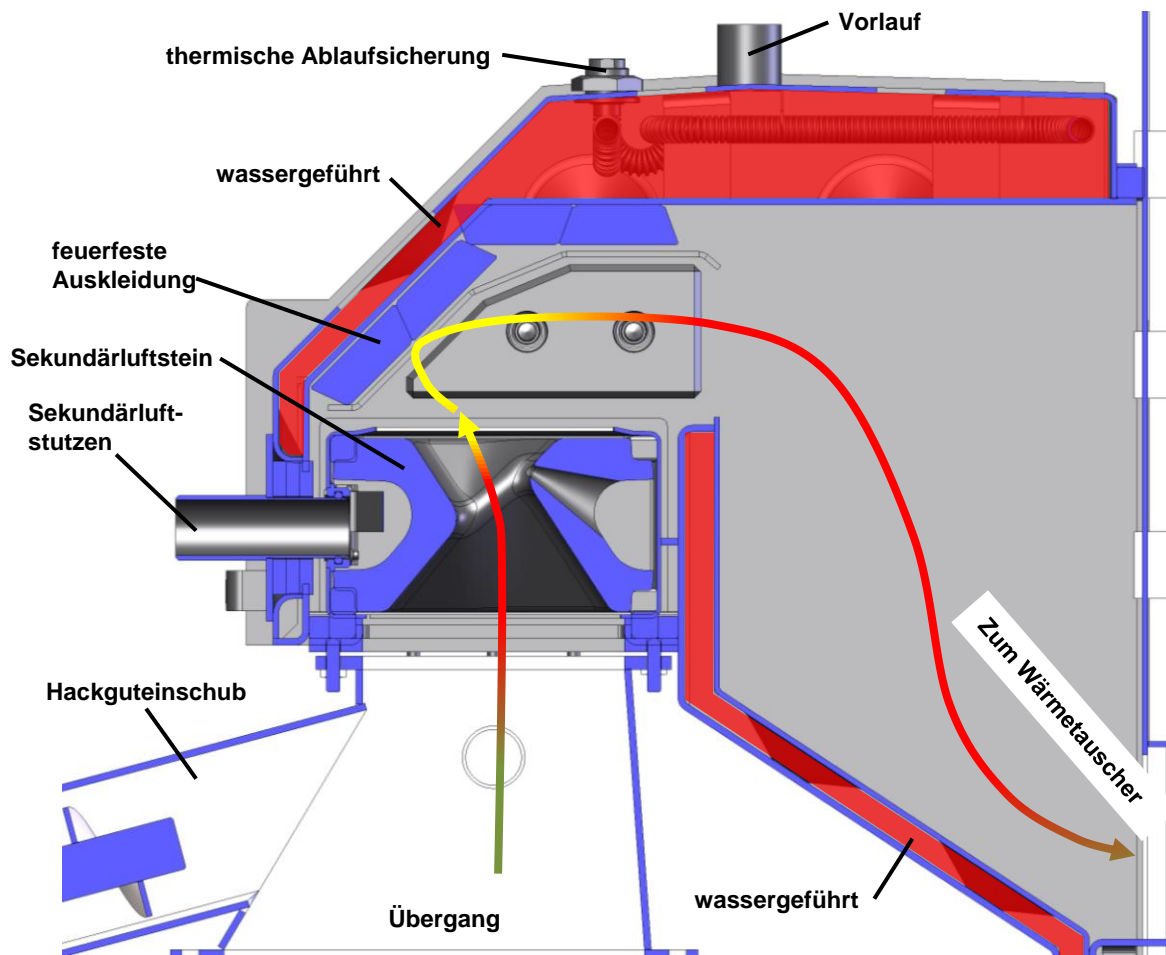


Abbildung 32: Sekundärverbrennungszone

Die Sekundärluft wird von außen in eine im Stein integrierter Ringleitung befördert. Aus dieser kann die Luft durch 13 Bohrungen in das Produktgas an der Stelle des geringsten Querschnittes strömen und durchmischt sich so turbulent wie möglich mit dem Produktgas. Tests haben gezeigt, dass eine gleichmäßige Durchmischung sowie ein ausreichendes Temperaturniveau notwendig ist, um niedrige CO-Emissionen zu garantieren. Weiters hat sich herausgestellt, dass eine Strömung dieses heißen Gasgemisches gegen eine wasserführende Wand negative Auswirkungen hat. Die Ursache darin liegt in der Abkühlung des Gasgemisches und

der daraus folgenden Beeinflussung der Reaktionskinetik zu langsameren Geschwindigkeiten. Deshalb wurde dieser Bereich mit feuerfesten Steinen verkleidet. Ein direkt über der Sekundärlufteindüsungsstelle angeordnetes Thermoelement misst die Temperatur und gibt in Zusammenhang mit dem Thermoelement im Übergang, also vor der Sekundärlufteindüsung, Aufschluss, ob das Gasgemisch entzündet ist. Bei sehr kleinen Temperaturgradienten besteht die Gefahr, dass sich ein zur Verpuffung neigendes Gemisch bildet. Aus diesem Grund ist für schwierige Startbedingungen ein Gasbrenner, ZIO 40 der Firma Krom-Schröder vorgesehen dessen Flamme direkt zum Austritt der Sekundärluftdüse strömt und das Gasgemisch trotzdem entzünden kann. Der Brenner hat eine Brennstoffwärmeleistung von etwa 20 kW, wird mit einer Zündkerze entzündet und kann mit Erdgas, Stadtgas und Flüssiggas betrieben werden. Eine weitere Zündkerze misst im Anschluss den Ionisationsstrom, welcher eine Flamme signalisiert.

Das heiße Rauchgas gibt die Wärme an die wassergeführte Kesselwand ab und strömt anschließend nach unten zum Eintritt in den Rohrbündelwärmetauscher.

Um eine **Überhitzung** und Verdampfen des Kesselwassers zu verhindern sind zwei Sicherheitseinrichtungen im Einsatz. Beide lösen einen mit einem in Kapitel 3.2.3, Abschnitt b) beschriebenen Kapillarrohr, angesteuerten Schaltkontakt/Ventil aus. Zum ersten wird ein im Kesselkörper geführter Wellrohrschauch mit Frischwasser durchströmt und kühlt somit die Kesselwassertemperatur (thermische Ablaufsicherung). In zweiter Instanz schließt ein Schaltkontakt (STB) bei 95 °C, schaltet die Brennluftversorgung aus und schließt alle Regelventile. Der Saugzugventilator läuft hingegen weiter, um die entstehenden Schwelgase abzusaugen und auszutragen. Auf diesem Weg kann sich kein Brennstoff mehr in einer exothermen Reaktion umsetzen und die Kesselwassertemperatur weiter steigen lassen.

h) Wärmetauscher

Der Wärmetauscher, wie in Abbildung 33 dargestellt, ist als Großwasserraum-Wärmetauscher ausgeführt, d.h. die heißen Rauchgase strömen durch mehrere von Kesselwasser umgebenen Rohren. Das heiße Rauchgas strömt im Kesselgrundkörper nach unten in den Wärmetauscher und steigt anschließend durch die Wärmetauscherrohre wieder nach oben in Richtung Saugzuggebläse. Um den Wärmeübergang im Rohr so groß wie möglich zu halten, müssen die Rohre ständig von anhaftender Flugasche gereinigt werden. Aus diesem Grund ist in jedem Rohr

ein Abreinigungsturbulator eingefügt, der in konstanten Zeitabständen durch den Reinigungsantrieb in der Längsrichtung gehoben und gesenkt wird. Die dabei abgekratzte Asche fällt nach unten zum Flugaschereservoir.

Am Eintritt in den Wärmetauscher befindet sich eine Möglichkeit, grobe Flugasche aufgrund der Schwerkraft und langsamen Strömungsgeschwindigkeiten abzuscheiden. Im Unterschied zum Original-Wärmetauscher, in dem die Asche mit einer Ascheschnecke ausgetragen wird, muss bei dieser Ausführung die Flugasche durch die zwei Putztüren herausgeräumt werden.

Nachdem die heißen Rauchgase im Wärmetauscher von etwa 500 °C auf rund 120 °C abgekühlt sind, strömen sie durch den Absaugstutzen, welcher als Aufnahme des Saugzuggebläses dient, in den Kamin. Um die O₂-Konzentration im Rauchgas zu ermitteln, ist in diesem Stutzen eine Breitbandlambdasonde positioniert.

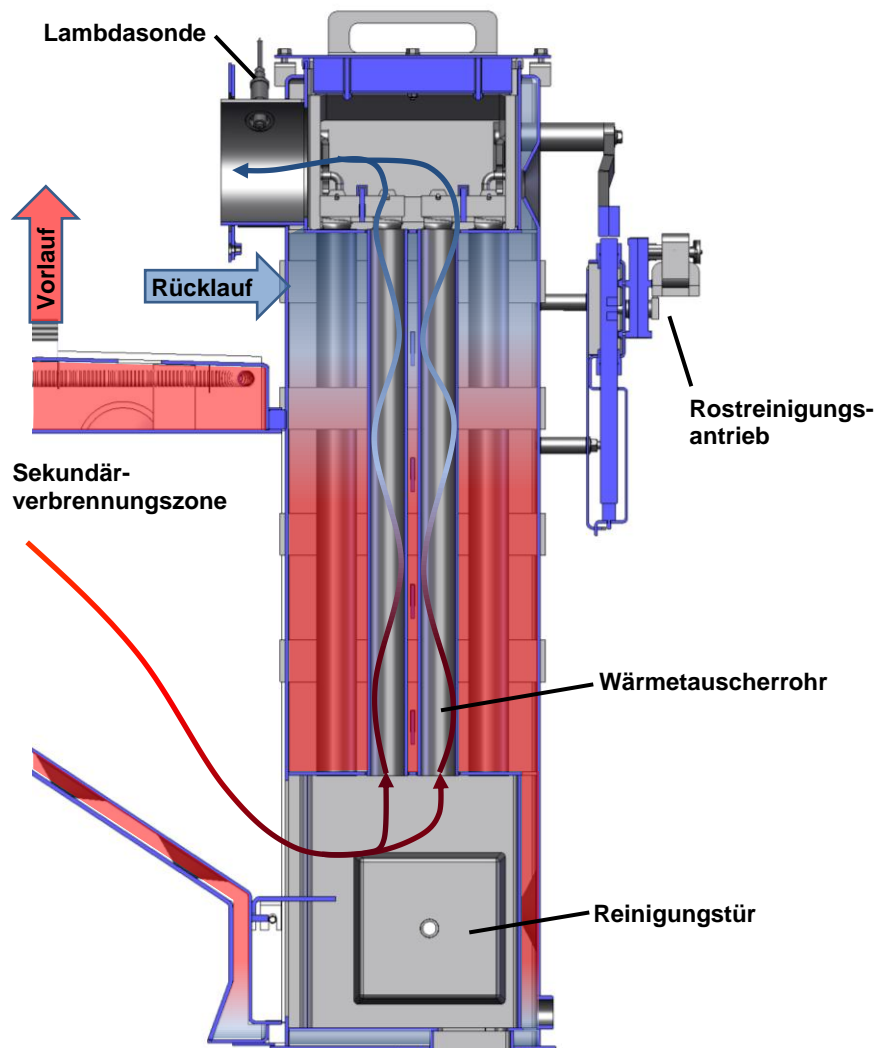


Abbildung 33: Rohrbündelwärmetauscher des MF 2 [37]

j) Luftversorgung

Der gesamte Luftbedarf der Anlage wird über ein Radialgebläse bereitgestellt. Durch einen drehzahlgeregelten Asynchronmotor lässt sich auf der Verteilerrohrleitung ein Vordruck von bis zu 50 mbar einstellen. Anschließend teilt sich der Luftvolumenstrom in die Primärluft- sowie die Sekundärluftmessstrecke und die Versorgung der Zündeinrichtung auf.

Der Massenstrom von Primär- und Sekundärluft wird durch eine Messblende und einen Differenzdruckaufnehmer ermittelt und kann mit einem nachgeschalteten Belimo-Regelkugelhahn auf einen definierten Sollwert eingestellt werden. Die Menge der Sekundärluft ist über einen Software-Dreipunktregler der Steuerung mit dem Restsauerstoffgehalt im Rauchgas nach dem Wärmetauscher verknüpft. Der gewünschte Restsauerstoffgehalt wird demnach selbstständig durch die Steuerung auf einen vordefinierten Wert geregelt. Der maximale Primärluftmassenstrom ist auf 56 kg/h und der Sekundärluftmassenstrom auf 94 kg/h aufgrund des Druckverlustes der Zuleitungen begrenzt.

j) Rezirkulationsgas

Das Rezirkulationsgas, ist Rauchgas, welches in die Verbrennungszone rückgeführt wird. Im Unterschied zur Primärluft weist das Rezirkulationsgas einen wesentlich geringeren Sauerstoffgehalt von etwa 6% auf, beinhaltet allerdings mehr Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf. Aufgrund der Wärmekapazität und geringeren Oxidationsfreudigkeit können die Temperaturspitzen gesenkt werden und schützen damit den Rost vor Überhitzung und daraus folgender Blockade. Ein daraus resultierender Nachteil ist die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit im gesamten Kesselsystem, welche mehr Grobstaub aus dem Vergaserschacht zur Sekundärverbrennungszone austrägt.

Die Gasstrecke kommt ohne zusätzliches Gebläse aus. Durch eine an das Saugzuggebläse anschließende Blende wird ein Gegendruck aufgebaut und lässt das Rezirkulationsgas wieder in die primäre Oxidationszone strömen. Die Regelung der Menge erfolgt ähnlich wie bei der Primär- und Sekundärluft mit einer Regelklappe und einer Messblende zur Bestimmung des Durchflusses. Aufgrund der Abkühlung unter den Taupunkt ist mit einem Auskondensieren des Wassers zu rechnen. Deshalb musste die konstruktive Ausführung dieser Rohrleitung zusätzlich mit einem Kondensatabscheider ausgestattet werden. Damit das anfallende Kondensat in der Rohrleitung die Durchflussmessung nicht negativ beeinflusst, war es zusätzlich

erforderlich, die Messblende im fallenden REZI-Rohr einzubauen, damit das Kondensat nach unten abfließen kann.

3.2.4 Regelung via AutomationX

Ein weiterer wichtiger Punkt war die Steuerungs-/Regelungsumgebung, samt übersichtlicher Visualisierung und Datenaufzeichnung. Nach anfänglichen Überlegungen, die Standard KWB Kesselregelung sowie SPS-Systeme alias Siemens-LOGO zu verwenden, wurden schnell verworfen. Zum einen bietet die hauseigene Kesselregelung eine nur eingeschränkte, sowie aufwändige Möglichkeit, verschiedene Parameter zu ändern und zum anderen gibt es keinerlei Visualisierung, um den Überblick aller Messdaten zu behalten.

All diesen Anforderungen konnte die Steuerungs- und Regelsoftware, AutomationX, gerecht werden. Diese findet bei einer Vergasungsanlage der Firma Cleanstgas Anwendung, musste deshalb nicht neu angeschafft und es konnten Teile von bestehenden Programmteilen übernommen werden.

Alle Messdaten führen von den Sensoren zum Schaltschrank, werden von einer Siemens SPS aufbereitet und von dem AutomationX-Server ausgelesen. Dieser steuert entweder über Reglermechanismen bzw. händischer Steuerungseingaben die entsprechenden Antriebe.

Abbildung 34 zeigt die Visualisierung der Hackgutvergasungsanlage. Im linken oberen Bereich (grau) befindet sich ein Hauptschalter, im mittleren Bereich können die Steuer-/Regelparameter verändert werden und ganz rechts ist die Sicherheitskette des Gasbrenners dargestellt. Der untere Bereich (hellgrau) spiegelt die Versuchsanlage schematisch wieder. Zu Beginn ist der Wanderrost im Rostkasten, die Ascheschnecke und –behälter und der Eintrag der Primärluft und des Rezirkulationsgases zu erkennen. Danach folgt der Vergaserschacht, welcher mit 9 Thermoelementen ausgestattet ist, der Übergang und links davon die Hackgutzubringung, bestehend aus Behälter, Austragung, Zellradschleuse und schlussendlich der Stokerschnecke. Darüber befindet sich die Sekundärverbrennungszone mit dem Düsenstein und dem darüber links angeordneten Gasbrenner. Anschließend strömen die heißen Rauchgase durch den wassergekühlten Verbrennungsraum, den Rohrbündelwärmetauscher und das Saugzuggebläse in den Kamin. Die Entnahmestelle des Rezirkulationsgases ist im Anschluss des Saugzuggebläses angeordnet. Im rechten unteren Teil der Grafik ist der Vergaserschacht von oben dargestellt. Hier ist die Verteilung der Thermoelemente am Umfang des Schachtes zu sehen.

Konstruktive Ausführung des Versuchsstandes

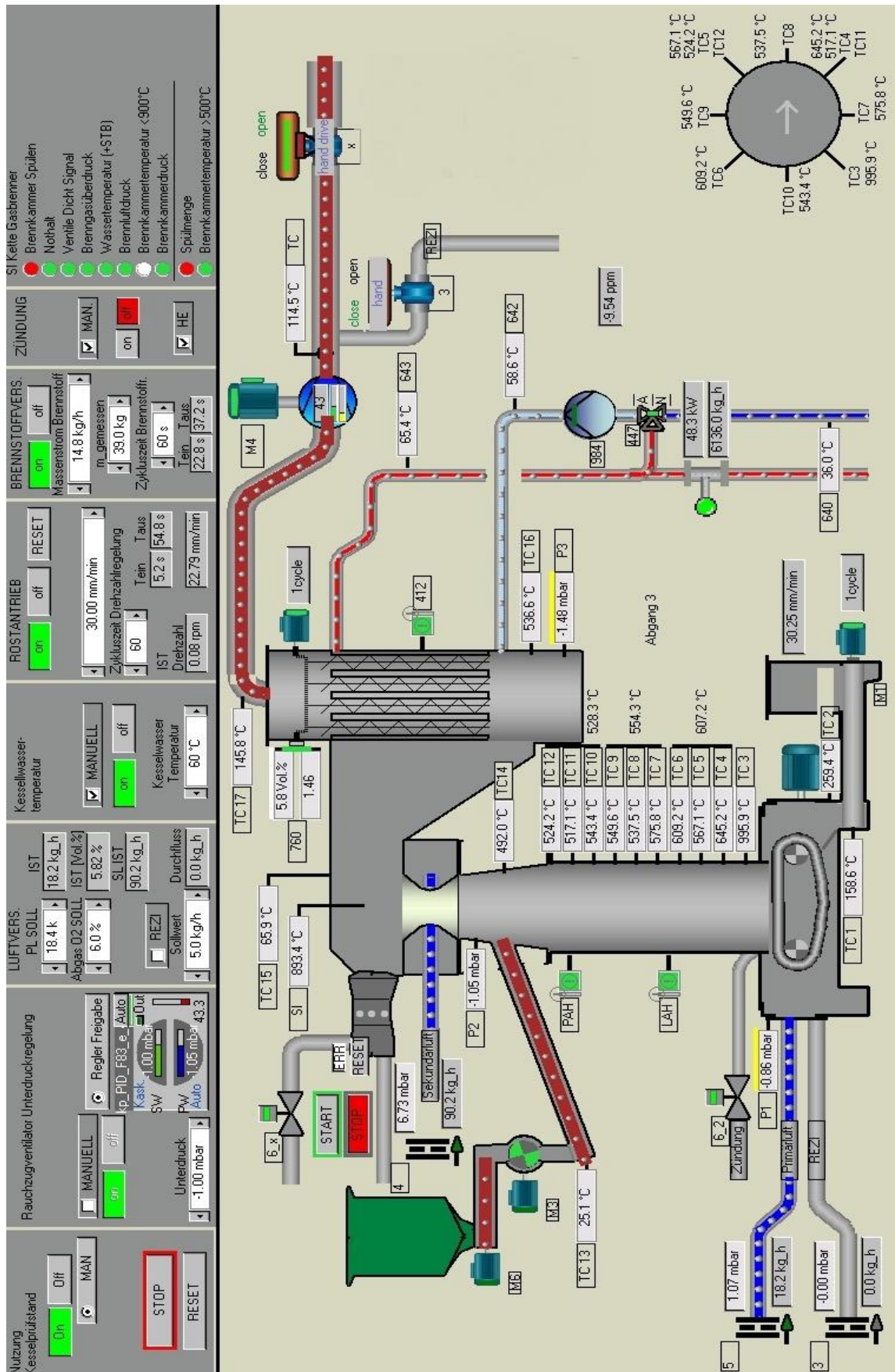


Abbildung 34: Softwareumgebung AutomationX

4 VERSUCHE

4.1 Erste Testläufe

Die Erstinbetriebnahme erfolgte am Donnerstag, den 19.09.13. Ziel der ersten Versuche war es, die Anlage kennen zu lernen, Fehler auszubessern und eventuelle Fehlanordnungen von Thermoelementen abzuändern. Die thermische Belastung, speziell bei den Bohrungen für die Durchführung der Thermoelemente führte zu einer Rissbildung des Keramikrohres. Der Schacht ist trotzdem in einem stabilen Zustand geblieben und es ist kein Rohrstück ausgebrochen. Abbildung 35 zeigt den Vergaserschacht von oben. In der Mitte des Schachtes ist der Wanderrost zu sehen. Die Risse in der Vergaserrohrwand sind nur schwer zu erkennen und daher durch rote Linien in nachfolgender Grafik markiert.

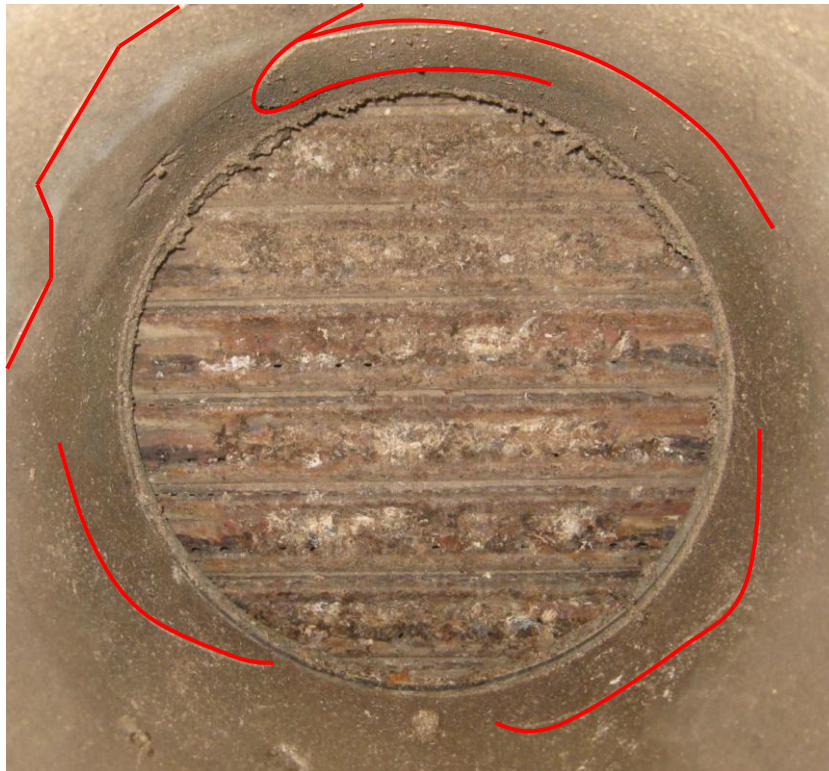


Abbildung 35: Rissbildung der Schachtwand

Weiters führte diese thermische Belastung speziell in der Oxidationszone, der Bereich der größten Temperaturen, zu einer Verformung des Abschiebebleches. Dieses hat sich nach unten gegen den Rost gewölbt und somit die Vorschubbewegung der Rostelemente verhindert. Der Betrieb war somit unterbrochen und der Hackgutvergaser musste abgestellt werden. Aus diesen unvorhergesehenen Gründen war es sehr vorteilhaft, dass der Gasbrenner die zum

Teil erlöschenden Gase sicher gezündet hat. Daher war der Gasbrenner in den ersten Phasen im Dauerbetrieb.

In den Stillstandsphasen zwischen den ersten Testläufen wurde der Sekundärluftstein (Abbildung 36) immer ausgebaut und auf seinen Zustand geprüft. Auch dieser weist Risse im üblichen Ausmaß auf. Auf der Unterseite sind Teeranhaftungen zu erkennen, welche eindeutig die Vergasungsseite kennzeichnen.



Abbildung 36: Vergaserstein von oben (links), unten (rechts)

Von dieser Position kann man anschließend in den Vergaserschacht und auf den Rost blicken, die Thermoelemente neu justieren und bei Bedarf reinigen.

Auch der Flansch mit dem Schauglas wurde entfernt. Auf diesem Weg können die Rostelemente von anhaftender Asche mit einer Drahtbürste befreit werden, um die Luftlöcher wieder durchgängig zu machen. Nach mehreren Versuchen hat sich allerdings herausgestellt, dass die Asche nur sehr locker anhaftet, die Reinigungswirkung des Rostabklopfers genügt und somit nicht bei jedem Stillstand behandelt werden muss.

4.2 Vorbereitungen zur Versuchsdurchführung

Vor einem Testlauf sind mehrere Dinge vorzubereiten. Der Hackgutbehälter mit dem Fassungsvermögen von ca. 1 Schüttraummeter (Srm) muss befüllt werden. Nach der Einwaage eines Aluminiumbleches wird eine Hackgutprobe entnommen und auf diesem zur Trocknung 24 h in einem Heißluftschrank bei 110 °C getrocknet. Anschließend wird die verdampfte Wassermenge, welche die Differenz von der Einwaage und der Auswaage darstellt, bestimmt. Der **Wassergehalt** berechnet sich wie in Gl. 4-1 dargestellt. Mit m_{EW} und m_{AW} wird die Masse der ein- sowie der ausgewogenen Brennstoffprobe bezeichnet. Die Differenz stellt somit die gesamte Wassermasse dar. m_{TARA} ist die Masse des leeren Messbehältnisses. Zieht man diese von der eingewogenen Masse ab, ergibt sich die Gesamtmasse des Hackgutes inklusive Wasser.

$$w = \frac{m_{Wasser}}{m_{Gesamt}} = \frac{m_{EW} - m_{AW}}{m_{EW} - m_{TARA}} [\%] \quad \text{Gl. 4-1}$$

Nach Bestimmung des Wassergehaltes kann die Bestimmung des **Brennstoffmassenstromes** beginnen. Da die von der Förderschnecke ausgetragene Menge an Hackgut sehr stark von der Schüttdichte, Stückigkeit und vom Feinanteil abhängt, muss diese vor jedem Versuch empirisch ermittelt werden. Während die Austragungsschnecke mit einer Einschaltdauer von 100% läuft, wird die Hackgutmasse in einer festgelegten Zeit mit einer Waage ermittelt. Mit Gl. 4-2 können die gemessenen Werte in einen einheitlichen Brennstoffmassenstrom pro Stunde umgerechnet werden. Mit $m_{Brf_{Start}}$ sowie mit $m_{Brf_{Ende}}$ sind die jeweiligen abgelesenen Werte der Waage bezeichnet. Ersterer stellt die Masse vor der Massenstromermittlung dar. Zweiterer spiegelt die Gesamtmasse am Ende der Messung wieder. Die Differenz beider ist die aus dem Hackgutvorratsbehälter ausgetragene Hackgutmasse. Als t_{ein} ist die Zeit bezeichnet, welche diese Messung in Anspruch nimmt. $m_{Brf_{100}}$ stellt den Brennstoffmassenstrom bei Dauerbetrieb, das entspricht einer Einschaltdauer von 100%, dar.

$$m_{Brf_{100}} = \frac{m_{Brf}}{t_{ein}} * 3600 = \frac{m_{Brf_{Start}} - m_{Brf_{Ende}}}{t_{ein}} * 3600 \frac{kg_{Brf}}{h} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Ziel der Steuerung des Brennstoffmassenstromes ist, eine möglichst gleichmäßige feuerungstechnische Wärmeleistung bzw. Kesselleistung zu erhalten. Die feuerungstechnische Wärmeleistung, P_{ftW} , wurde auf 50 kW fixiert, um allen Versuchen gleiche Randbedingung zu geben. Mit dem unteren Heizwert von

Waldhackgut, der im Wesentlichen vom Wassergehalt abhängt, kann ein erforderlicher, feuchter Brennstoffmassenstrom, m_{Brf} , ermittelt und somit auf eine notwendige Einschaltdauer der Austragungsschnecke rückgeschlossen werden. In Abbildung 37 ist die Abnahme des unteren Heizwertes mit steigendem Wassergehalt des Hackgutes deutlich zu erkennen.

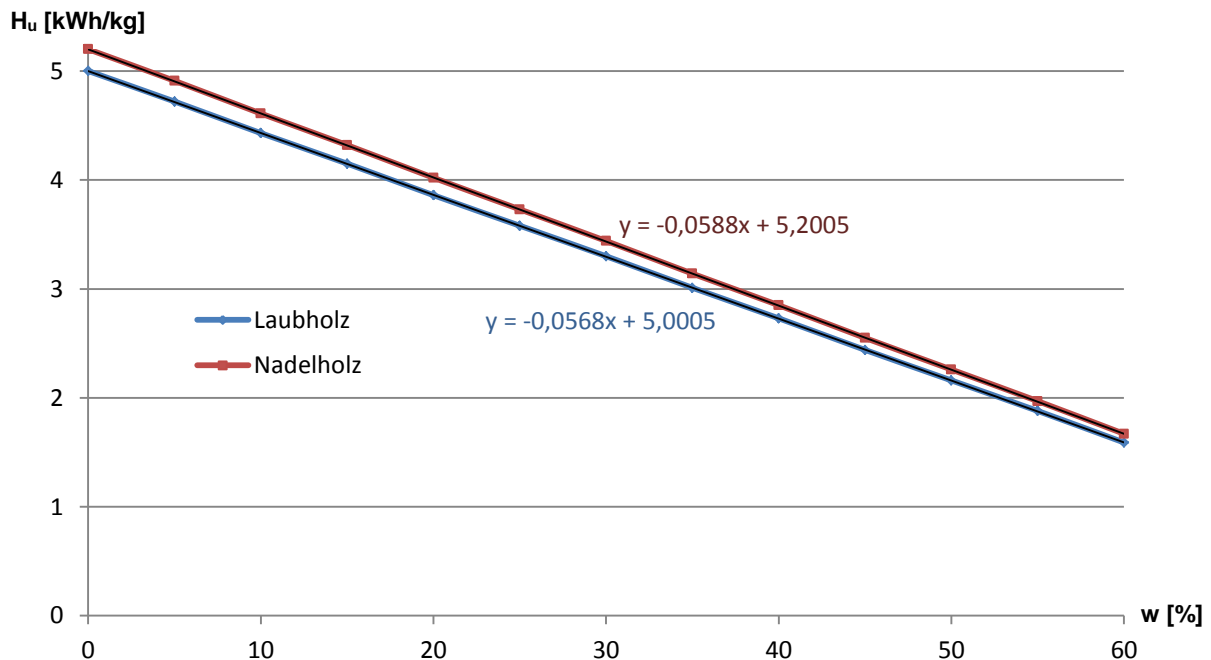


Abbildung 37: Unterer Heizwert über den Wassergehalt für Nadel- und Laubholz [5]

Die Gleichung, für den in Gl. 4-3 enthaltenen unteren Heizwert, H_u , wurde aus Abbildung 37 für Nadelholz übernommen.

$$m_{Brf} = \frac{P_{ftw}}{H_u} = \frac{P_{ftw}}{-0,0588 * w + 5,2} \frac{kg_{Brf}}{h} \quad \text{Gl. 4-3}$$

$$ED = \frac{m_{Brf}}{m_{Brf_{100}}} * 100 [\%] \quad \text{Gl. 4-4}$$

Bei einer Zykluszeit von einer Minute muss die Einschaltzeit um die Einschaltdauer, ED , verringert werden. Gl. 4-5 gibt diesen Sachverhalt wieder. D.h. die Austragungsschnecke schaltet sich jede Minute für t_{zyklus_ein} Sekunden ein. Die Zellradschleuse sowie die Stokerschnecke laufen hingegen einige Sekunden nach, um eine Blockade zu verhindern.

$$t_{zyklus_ein} = t_{zyklus} * ED [sec] \quad \text{Gl. 4-5}$$

Die **Verbrennung von festen oder flüssigen Brennstoffen** setzt die Kenntnis über die Brennstoffzusammensetzung in Massenprozent bzw. $\text{kg}_{\text{Element}}/\text{kg}_{\text{Brennstoff_trocken}}$ voraus. Unter Einbezug des Wassergehaltes kann von den Massenanteilen auf die in Tabelle 8 dargestellten Massenanteile auf eine feuchte Bezugsmasse umgerechnet werden. Im Weiteren werden alle Berechnungen auf ein Kilogramm feuchte Brennstoffmasse bezogen.

Tabelle 8: Elementare Hackgutzusammensetzung [5]

Wassergehalt										
	30,3%									
	Anteil	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	Asche [%]	w [%]	Hu [kWh/kgBrf]
Fichtenholz	70%	35,08	4,32	30,06	0,14	0,00	0,00	0,13	30,25	3,45
Buchenholz	15%	34,18	4,25	30,90	0,14	0,00	0,00	0,27	30,25	3,31
Fichtenrinde	10%	36,69	4,19	27,20	0,42	0,04	0,01	1,21	30,25	3,45
Buchenrinde	5%	34,94	4,05	28,53	0,35	0,06	0,01	1,82	30,25	3,31
Brennstoff	100%	35,1%	4,3%	29,8%	0,2%	0,0%	0,0%	0,3%	30,3%	3,42

Neben dem Brennstoffbedarf ist auch die Primärluft- sowie die Sekundärluftmenge zu bestimmen. Da diese Berechnungen öfter auch während des Betriebes auszuführen sind, wurde dafür ein Excel-Dokument erstellt, in dem die Berechnung automatisiert gelöst wird. Die Berechnung basiert auf dem Abgleich von Atombilanzen, welche in der Vorlesung Thermodynamik 1 und 2 an der Technischen Universität in Graz gelehrt wurden. [38]

Versuche

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der Excel-Verbrennungsrechnung. Der gelbe Bereich markiert die gewünschten Zieldaten. Im Anschluss werden der einzustellende Brennstoffmassenstrom (orange) sowie die Primär- und Sekundärluftmenge auf unterschiedliche Bezugsbasen ausgegeben. Mit der Bezugsbasis von einem kg_{Brf} berechneten Werte sind grün hinterlegt. Der hellrote Bereich bezieht sich auf die feuerungstechnische Wärmeleistung und der blaue berücksichtigt einen vordefinierten Massenstrom eines Rezirkulationsgases.

P_{ftw} 51,88 [kW]	m_{Brf} 15,18 [kg/h]	m_{RG} 111,01 [kg/h]	Gemessene Werte
n_{Kessel} 81,2% Kesselwirkungsgrad	EINGABE		L_{prim} 18,40 kg/h
P_{Kwl} 42,11 [kW]	AUSWERTUNG		L_{sek} 77,43 kg/h
λ_{prim} 0,29 Primäre Luftzahl			
λ_{ges} 1,50 Gesamte Luftzahl			
w 30,3% Wassergehalt			
m_{REZI} 10,00 [kg/Pth*h] 9% 0,36 [kmol/Pth*h]	Solve		
pro kg_{Br} (feucht)	pro P_{ftw} (feucht)	für P_{ftw} mit REZI	
O₂ Betrachtung			
O _{2min} 0,0306 [kmol/kgBrf]	O _{2min} 0,4652 [kmol/PftW*h]	O _{2REZI} 0,0214 [kmol/PftW*h]	
O _{2prim} 0,0088 [kmol/kgBrf]	O _{2prim} 0,1340 [kmol/PftW*h]	O _{2prim} 0,1126 [kmol/PftW*h]	
O _{2sek} 0,0372 [kmol/kgBrf]	O _{2sek} 0,5641 [kmol/PftW*h]		
O _{2ges} 0,0460 [kmol/kgBrf]	O _{2ges} 0,6981 [kmol/PftW*h]		
L Betrachtung			
L _{min} 0,1459 [kmol/kgBrf] 4,2 [kg/kgBrf]	L _{min} 2,2145 [kmol/PftW*h] 63,9 [kg/PftW*h]		
L _{prim} 0,0420 [kmol/kgBrf] 1,2 [kg/kgBrf]	L _{prim} 0,6380 [kmol/PftW*h] 18,40 [kg/PftW*h]	L _{prim} 0,5361 [kmol/PftW*h] 15,5 [kg/Pth*h]	
L _{sek} 0,1769 [kmol/kgBrf] 5,1 [kg/kgBrf]	L _{sek} 2,6849 [kmol/PftW*h] 77,43 [kg/PftW*h]	L _{sek} 2,7868 [kmol/PftW*h] 80,4 [kg/Pth*h]	
L _{ges} 0,2189 [kmol/kgBrf] 6,3 [kg/kgBrf]	L _{ges} 3,3229 [kmol/PftW*h] 95,83 [kg/PftW*h]	L _{ges} 3,3229 [kmol/PftW*h] 95,8 [kg/Pth*h]	
REZI 0,3570 [kmol/PftW*h] 10,0 [kg/Pth*h]			
Rauchgas Betrachtung (feucht)			
N ₂ 0,1730 [kmol/kgBrf] 67,6% 4,85 [kg/kgBrf]	N ₂ 2,6260 [kmol/PftW*h] 73,56 [kg/PftW*h]	Rauchgaszusammensetzung bleibt gleich	
CO ₂ 0,0293 [kmol/kgBrf] 11,4% 0,82 [kg/kgBrf]	CO ₂ 0,4440 [kmol/PftW*h] 19,54 [kg/PftW*h]		
SO ₂ 0,0000 [kmol/kgBrf] 0,0% 0,00 [kg/kgBrf]	SO ₂ 0,0000 [kmol/PftW*h] 0,00 [kg/PftW*h]		
H ₂ O 0,0382 [kmol/kgBrf] 14,9% 1,07 [kg/kgBrf]	H ₂ O 0,5804 [kmol/PftW*h] 10,46 [kg/PftW*h]		
O _{2Rest} 0,0153 [kmol/kgBrf] 6,00 0,43 [kg/kgBrf]	O _{2Rest} 0,2328 [kmol/PftW*h] 7,45 [kg/PftW*h]		
SUMME 0,2558 [kmol/kgBrf] 7,17 [kg/kgBrf]	Summe 3,8834 [kmol/PftW*h] 111,02 [kg/PftW*h]		

Abbildung 38: Ansicht des Excel-Berechnungstools

4.3 Startphase

Die Startphase beginnt mit dem Einfördern von ca. 2 kg feuchter Brennstoffmasse bis sich diese zu einem ca. 10 cm hohen Brennstoffbett aufgebaut hat. Anschließend öffnet ein Magnetventil. Das Heizelement wird eingeschaltet und heiße Luft strömt durch ein $\varnothing 6$ mm Edelstahlrohr zum Brennstoffbett. Nach etwa 5 bis 10 Minuten lässt sich eine Erwärmung der vorderen Thermoelemente, welche in unmittelbarer Nähe zur Einblasöffnung angeordnet sind, feststellen. Das Zündelement wird erst nach einem rapiden Anstieg eines dieser Thermoelemente von ca. 50 °C auf über 200 °C abgestellt. Aufgrund unterschiedlicher Schüttungsbedingungen müssen immer unterschiedliche Thermoelemente im vorderen Schachtbereich als Zündindikator herangezogen werden.

Um den Kessel möglichst sicher und schonend aufzuwärmen wird ein Rostbetrieb eingestellt. Das heißt, dass der primäre Luftüberschuss, ähnlich wie bei bestehenden Rostfeuerung bei ca. 0,7 bis 0,9 liegen soll. Die entsprechende Primärluftmenge wird eingestellt und abgewartet bis das Brennstoffbett fast niedergebrannt ist. Das Absinken des Brennstoffbettes lässt sich im Betrieb sehr gut mit dem Temperaturgradienten der Schachtthermoelemente abschätzen. Speziell in der Startphase ist ein Blick durch das Schauglas auf den Rost aber die schnellste und zuverlässigste Variante. Bei sehr niedrigem Brennstoffbett kann man die Flammenfront (Abbildung 39) deutlich erkennen.

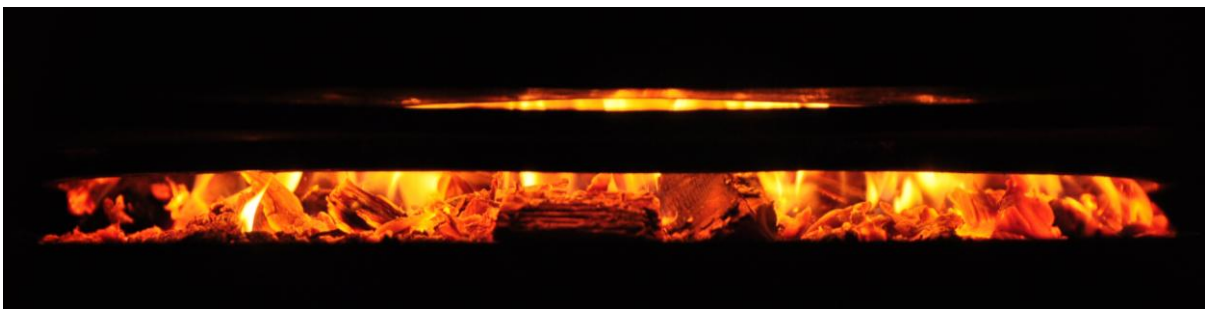


Abbildung 39: Flammenfront bei großem Primärverbrennungsverhältnis

Nach dem Abbrennen des Brennstoffbettes wird der Hackguteinschub eingeschaltet, welcher die vordefinierte Brennstoffmenge kontinuierlich einfördert. In Abbildung 40 ist der Startvorgang vom 2.10.13 dargestellt. Der erste Anstieg der Schachttemperaturen zeigt, dass das Brennstoffbett entzündet ist. Das Thermoelement TC3 steigt auf ca. 650 °C. Nachdem das Brennstoffbett fast vollständig abgebrannt ist, flachen die Kurven der Schachttemperaturen ab und sinken bis zum Zeitpunkt einer erneuten Brennstoffeinföderung. Die

Schachttemperaturen steigen erneut. Eine Reduktion des Primärluftmassenstroms führt zu einer langsameren Brennstoffumsetzung und lässt somit die Schachttemperaturen wieder sinken. Das zweite Tal kennzeichnet den Bereich, wo der gesamte Brennstoff abgebrannt und die Flammenfront durch das Schauglas kontrolliert worden ist. Anschließend beginnt die Einföderung des konstant gesteuerten Brennstoffmassenstroms. Auch der Primärluftmassenstrom wurde von 11 kg/h auf 20 kg/h erhöht. Die Schachttemperaturen steigen wieder und heizen die Kesselanlage auf Betriebstemperatur auf, liegen aber dennoch sehr eng beisammen. Diese geringe Spreizung der Schachttemperaturen lässt auf eine große Luftzahl und ein niedriges Brennstoffbett schließen. TC3, das Thermoelement direkt über dem Wanderrost weist eine sehr starke Temperaturschwankung auf. Der Grund dafür kann die Bewegung des Rostes sein, da das Thermoelement abwechselnd von der Primärluft gekühlt wird und andererseits befindet es sich in der reaktivsten Zone mit den höchsten Temperaturen. Um 10:35 Uhr wurde die Primärluft für den Vergasungsbetrieb auf ca. 17 kg/h gesenkt. Ab diesem Zeitpunkt lässt sich bereits die Auswirkung auf die Schachttemperaturen erkennen. Während TC3 eine leichte Tendenz zum Steigen vermittelt, sinken die Temperaturen der weiter oben angeordneten Thermoelemente geringfügig.

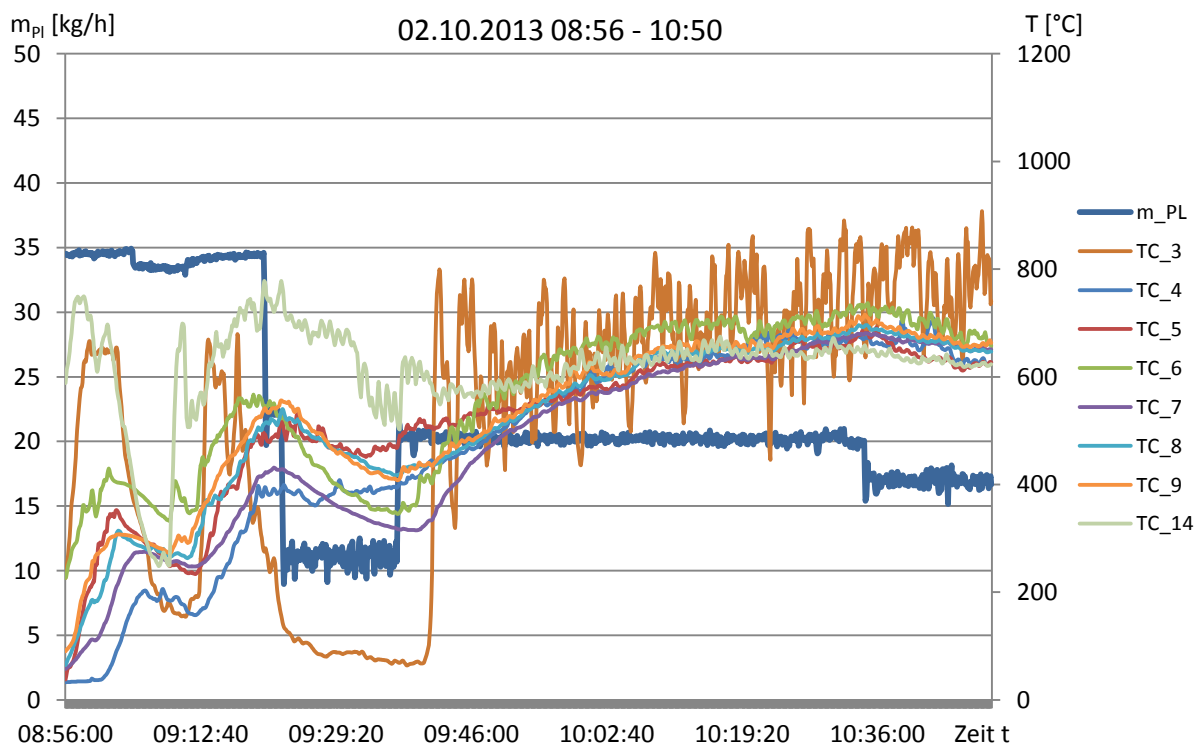


Abbildung 40: Primärluftmassenstrom und Schachttemperaturen im Startzyklus

4.4 Betrieb

Anschließend werden die zuvor errechneten Parameter für den entsprechenden Vergasungsbetrieb bei konstantem Primärluftverhältnis durch die AutomationX Grafikoberfläche eingestellt. Eine Auswirkung der Reduktion um 12:49 Uhr der Primärluft lässt kurzfristig weniger Brennstoff umsetzen. Daher sinken die Schachttemperaturen großteils während die Kesselleistung erst zeitverzögert abfällt. Gegengleich verhält sich das unterste Schachtthermoelement TC3. Die Temperatur steigt, da in diesem Bereich der Brennstoff vollständig umgesetzt und zugleich von weniger vorbeiströmender Luft/Gasen gekühlt wird. Weiters steigt die Temperatur in der Sekundärverbrennungszone. Dies ist mit der einsetzenden exothermen Reaktion dieses Gasgemisches verbunden. Im Vergleich zum Rostbetrieb steigen nun keine Rauchgase mit geringem CO-Gehalt sondern ein Produktgasgemisch bestehend aus CO, C, CH₄, H₂, N₂, NO, NO₂ und H₂O mit einem Heizwert von bis zu 4 MJ/m³ in die Sekundärluftdüse. Dort kann die chemisch gebundene Energie mit dem vorhandenen Sauerstoffüberschuss in thermische Energie umgewandelt werden. Abbildung 41 spiegelt diesen Sachverhalt sehr gut wieder. Als TICAHAL wird das Thermoelement bezeichnet, welche die Temperatur in der Sekundärverbrennungszone misst. Das Abfallen der Temperatur in der Sekundärverbrennungszone zwischen 12:32 und 12:38 lässt auf ein Erlöschen der Sekundärflamme schließen. In diesem Fall wird ein gefährliches, zur Verpuffung neigendes, Gasgemisch durch den Wärmetauscher in den Kamin ausgetragen und muss unbedingt vermieden werden. Eine Verpuffung hätte einen Austritt des Gases aus der Kaminleitung zu folge. Um 12:49 wurde der Primärluftmassenstrom von 17 kg/h auf 15 kg/h reduziert. Die Schachttemperaturen, TC4 bis TC14, und TC3 sowie TICAHAL wandern infolge dieser Änderung stark auseinander. Ab 13:02 pendeln sich die Schachttemperaturen zwischen 590 °C und 630°C ein und scheinen auf diesem Niveau konstant zu bleiben. Durch die Reduktion der Primärluft wächst das Brennstoffbett allmählich. Dies nimmt eine längere Zeit in Anspruch.

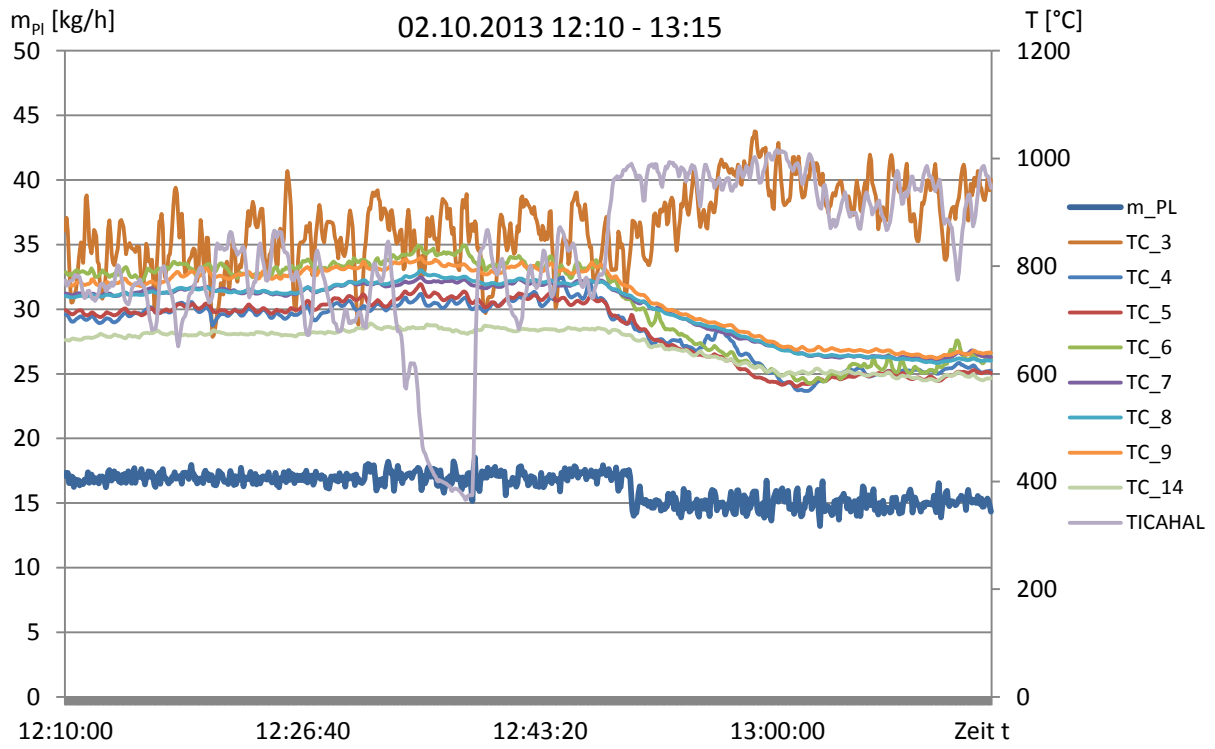


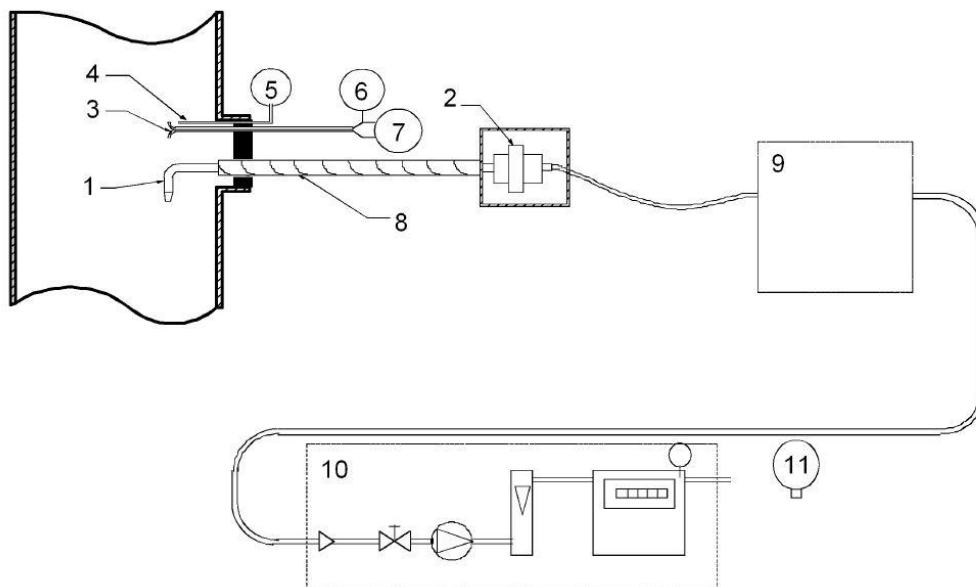
Abbildung 41: Übergang vom Rostbetrieb in die Vergasung

4.5 Staubbmessung

Bei der Staubbmessung muss sehr sorgfältig gearbeitet werden, denn eine Auswaage einer verschmutzten Filterhülse würde die gesamte Messung unwiderruflich zerstören. Das Messprinzip kann sehr einfach erklärt werden. Ein Sondenrohr, welches sich in der Kernströmung des Kaminrohres befindet, saugt das staubhaltige Rauchgas durch einen Filter. Die Staubpartikel scheiden sich auf der Filteroberfläche ab. Um die Masse des abgeschiedenen Staubes zu ermitteln, muss der Filter vor und nach der Absaugung gewogen werden. Da sich die Messgenauigkeit im Zehntel-Milligramm-Bereich befindet, muss bei der Einwaage sowie der Auswaage immer der gleiche Arbeitsablauf angewendet werden.

4.5.1 Aufbau

Der Messaufbau ist an die VDI-Richtlinie 2066 der Gesamtstaubbmessung angelehnt. Abbildung 42 stellt den Messaufbau schematisch dar. Die Entnahmesonde ragt in das Rauchgasrohr und zeigt mit der Absaugöffnung entgegen der Strömungsrichtung. Durch eine Membranpumpe wird das Rauchgas durch die Sonde abgesaugt. Der Filterkopf befindet sich nicht in der Rauchgasrohrleitung. Die Länge von Sondenöffnung zum Staubfilter beträgt in etwa 500 mm. Die Aerosole sowie der Grobstaub scheiden sich anschließend auf einem Glasgewebefilter ab.



- | | |
|---|--|
| 1 Entnahmesonde | 7 Gerät zur Messung des dynamischen Drucks |
| 2 Filtergehäuse | 8 Absaugrohr (Out-Stack-Filtergerät) |
| 3 Staudrucksonde | 9 Abkühl- und Trocknungseinrichtung |
| 4 Temperatursensor | 10 Absaugaggregat und Gasmesseinrichtungen |
| 5 Temperaturanzeige | 11 Druckmessgerät |
| 6 Gerät zur Messung des statischen Drucks | |

Abbildung 42: Messaufbau nach VDI 2066 [39]

Da in dieser Rohrleitung eine erhebliche Abscheidewirkung der Staubpartikel stattfindet, muss die Sonde gespült und die dabei ausgewaschenen Partikel für die Staubmessung mit berücksichtigt werden. Um die Membranpumpe nicht zu beschädigen, wird das Rauchgas von Teer befreit, abgekühlt und getrocknet.

Die **Messstelle** befindet sich in der Rauchgasleitung zwischen Wärmetauscher und dem Saugzuggebläse. In Abbildung 43 links ist der ½“ Messstutzen sowie die Rauchgasrohr vom Kessel kommend dargestellt. Abbildung 43 rechts stellt den Blick entlang der Entnahmesonde in das Rauchrohr dar. Weiters ist eine Bohrung für die Rauchgasanalyse zu erkennen. Um bei der Messstelle eine vollständig ausgebildete Strömung zu gewährleisten, muss eine Einlauflänge von etwa 10x dem Rauchrohrdurchmesser eingehalten werden. Dies entspricht im genannten Fall einer Länge von 1100 mm. Die Sondenspitze befindet sich in der Kernströmung.

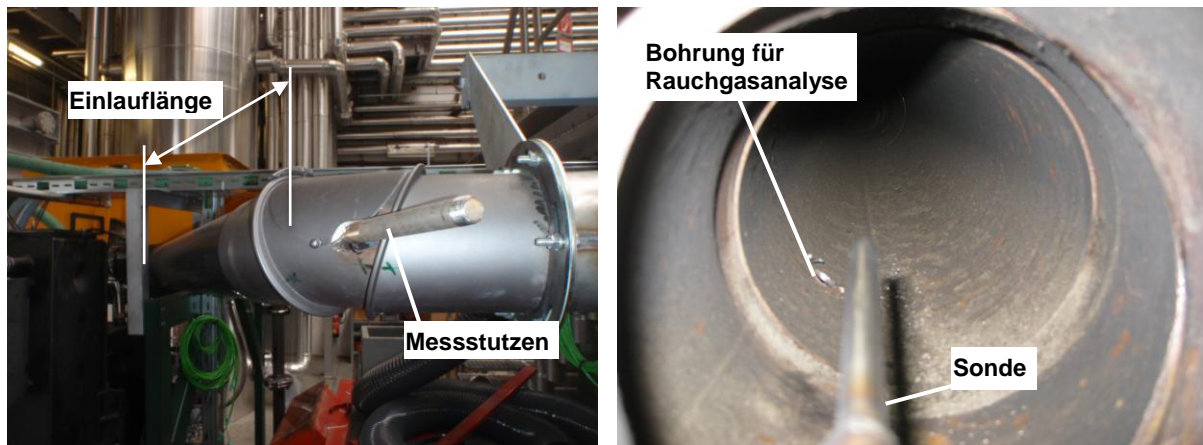


Abbildung 43: Messstelle (links), Blick entlang der Absaugsonde (rechts) [39]

Der Aufbau der Sonde ist in Abbildung 44 dargestellt. Links beginnend, befindet sich ein $\varnothing 6$ mm Edelstahlrohr, welches mit einer Klemmringverschraubung mit dem folgenden Kugelhahn gasdicht verbunden ist. Anschließend folgt das Filtergehäuse mit Filterhülse sowie einem Teflonschlauch, der die Verbindung zur Gaskonditionierungsanlage darstellt. Oberhalb des Filtergehäuses ist die Heizmanschette dargestellt. Diese wird während der Messung über das Filtergehäuse geführt und verhindert das Auskondensieren des Wasserdampfes im Rauchgas am Filtergewebe.

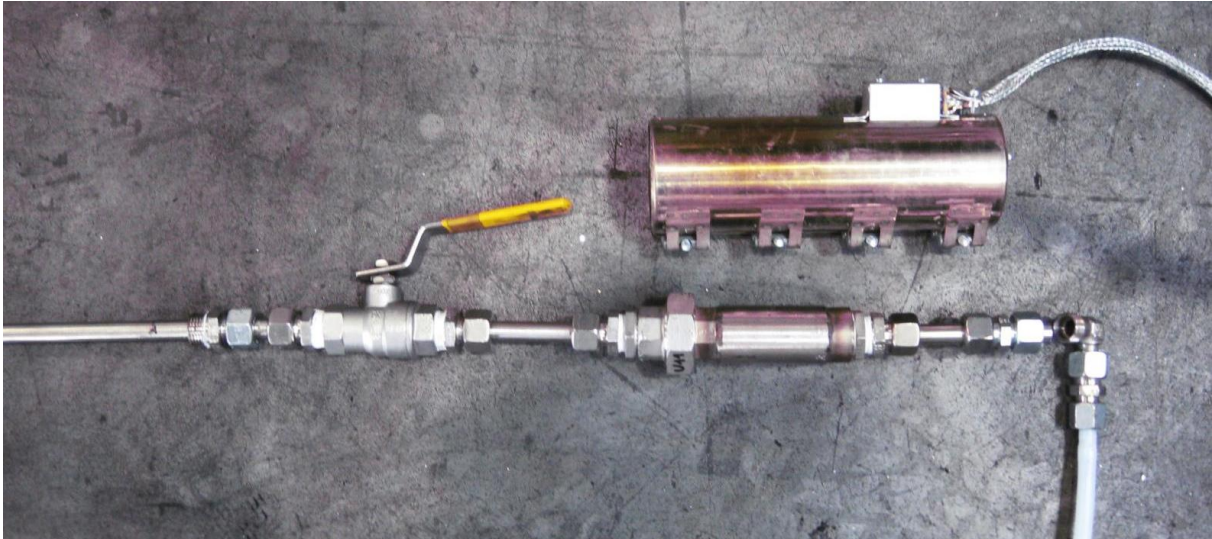


Abbildung 44: Aufbau der Absaugsonde

Im Filtergehäuse befindet sich die Filterhülse. Diese besteht aus einem zylinderförmigen Edelstahlrohr, welches mit der chemisch reinen Glaswolle gefüllt ist.

4.5.2 Rauchgasabsaugschrank „Miraculix“

Die Rauchgasabsaugung und Konditionierung ist eine Eigenbaulösung der KWB-GmbH und in einem Aluminiumkasten vormontiert. Abbildung 45 stellt die Frontansicht dieses Gasmessschrankes dar.

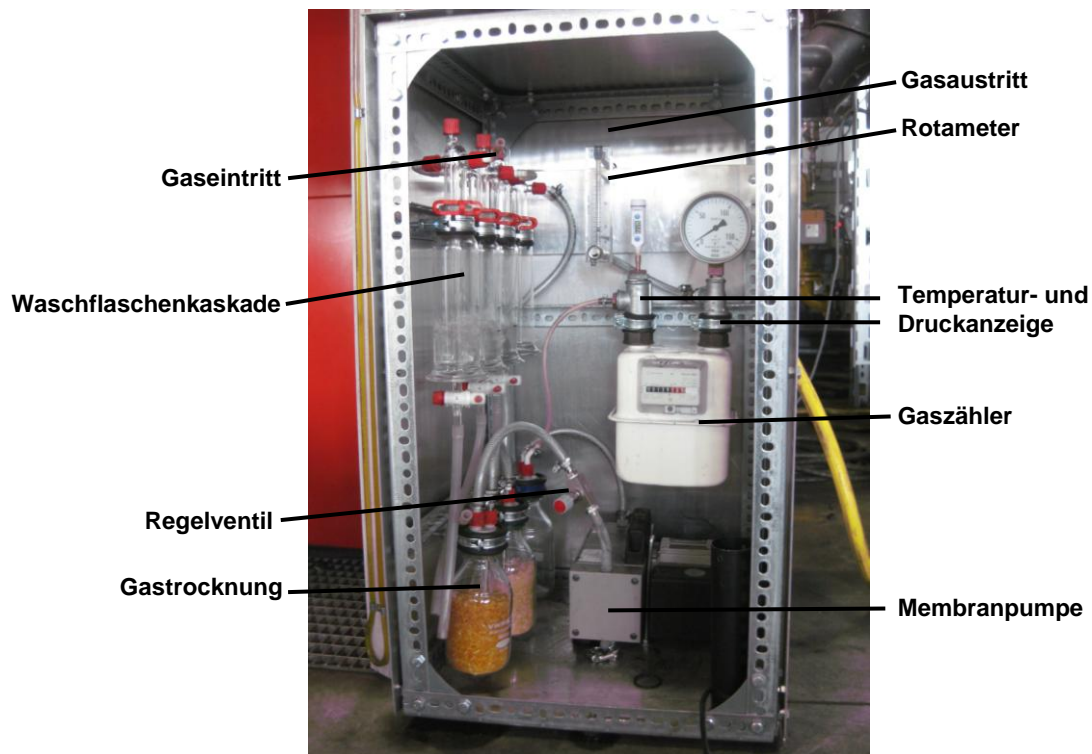


Abbildung 45: Gasmessschrank

Die abgesaugten Rauchgase strömen vom Filter durch einen Teflonschlauch zu den Waschflaschen. Um das Gas von Teeren zu befreien passiert es dabei vier Waschflaschen wobei drei davon mit Isopropanol gefüllt sind. Die letzte dient als Abscheideflasche für mitgerissenes Isopropanol. Anschließend muss das Gas durch weitere, mit Silicagel gefüllten, Laborflaschen fließen, um dem Rauchgas die restliche Feuchtigkeit zu entziehen. Vor dem Eintritt in die Membranpumpe kann über ein Regelventil der Volumenstrom eingestellt werden. Um auf die abgesaugte Menge bei Normbedingungen schließen zu können, ist es sehr wichtig, die Temperatur sowie den Druck direkt am Gaszähler zu dokumentieren. Vor der Freileitung in die Umgebung befindet sich ein Rotameter. An diesem kann der unmittelbare Volumenstrom abgelesen werden.

4.5.3 Wägung

Vor Beginn der Absaugung müssen die vorbereiteten Waschflaschen sowie Filterhülsen eingewogen werden. Den Filterhülsen samt Filtergewebe muss im Trockenschrank die Feuchtigkeit der Umgebung entzogen werden. Danach kühlen die Hülsen im Exsikkator ab. Eine Gewichtsbestimmung ohne vorangegangenes Abkühlen würde aufgrund der natürlichen Konvektion an der Filterhülsenoberfläche falsche Messwerte liefern. Das Silicagel-Granulat im unteren Bereich des Exsikkators hält die Luft im Inneren trocken während die Hülsen auf Umgebungstemperatur abkühlen. Die Messung muss sehr rasch von statten gehen, da die Gewichtszunahme aufgrund der feuchten Umgebungsluft die Messung sichtlich beeinflusst.

Nach Beendigung des Absaugvorganges wird das Sondenrohr ausgebaut und von dem Filtergehäuse getrennt. Um eine nachträgliche Verunreinigung des Filters zu vermeiden wird das Filtergehäuse mit zwei Blindstopfen vorne und hinten sicher verschlossen. Wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben, muss die abgeschiedene Staubmenge im Sondenrohr miteinbezogen werden. Aus diesem Grund wird die Sonde mit Isopropanol, C_3H_8O , in eine zuvor eingewogene Laborflasche gespült. Isopropanol hat den Vorteil, sich als vielseitiges Lösungsmittel rückstandsfrei zu verflüchtigen. Die Laborflasche (Abbildung 46 rechts) sowie die Filterhülse (Abbildung 46 links) müssen nach der Absaugung wieder für 24 Stunden in den Trockenschrank und anschließend im Exsikkator abkühlen. Die Summe der Massendifferenzen von Waschflasche und Filterhülse ist somit die abgesaugte Gesamtstaubmenge.



Abbildung 46: Filterhülse mit Filtergewebe (links), Laborflasche (rechts)

4.5.4 Abgasanalysegerät

Während der Absaugung wurde die Temperatur sowie die Rauchgaszusammensetzung stichprobenartig mit einem Rauchgasanalysegerät der Firma MRU erfasst. Hierfür wurde im Bereich der Absaugrohrspitze eine seitliche Bohrung in das Kaminrohr angebracht, in welches das Messrohr des Rauchgasanalysegeräts gesteckt wurde. Dieses ermittelt die Temperatur, den CO-Gehalt, NO_x-Emissionen, sowie den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases. Abbildung 47 zeigt das verwendete Abgasanalysegerät.



Abbildung 47: Abgasanalysegerät von MRU [40]

Die im Vordergrund befindliche Handsonde wird mit dem Konus in der Bohrung des Kaminrohres fixiert. Der Absaugschlauch führt von diesem zum Auswertegerät in dem sich die Messmodule befinden. Dieses Gerät kann sowohl für Kontrollmessungen sowie für Dauermessungen verwendet werden. Tabelle 9 spiegelt die technischen Daten sowie die Genauigkeit des verwendeten Abgasanalysegerätes wieder. Für die Messungen wurden nur die Emissionen in Hinblick des Reststauerstoff-, CO-, NO_x-Gehaltes und der Rauchgastemperatur betrachtet.

Tabelle 9: Technische Daten des MRU Vario plus industrial [40]

Bezeichnung	elektrochemische Messzellen:	Infrarot 3-Gas-Messmodul
T-Gas		0 ... 1.700 °C
T-Luft		0 ... 100 °C
Kaminzug Differenzdruck		-100 ... +100 hPa, Genauigkeit ±0,02 hPa
Durchflussmessung		1m/s ... 100 m/s, Genauigkeit ±1m/s
O ₂	0 ... 21,0 Vol.-%, Genauigkeit: ±0,2 Vol.%	
CO (H ₂ -kompensiert)	0 ... 2.000 ppm Genauigkeit: <200 ppm, ±10 ppm >200 ppm, ±20 ppm	0 ... 10.000 ppm Genauigkeit ±40 ppm
CO (very high)	0 ... 4,00 % Genauigkeit ±0,02 %	
CO ₂		0 ... 3 % Genauigkeit ±0,5 %
CH ₄ (Methan)		0 ... 10.000 ppm Genauigkeit ±60 ppm
C ₃ H ₈ (Propan)		0 ... 2.000 ppm Genauigkeit ±30 ppm
NO	0 ... 1.000 ppm Genauigkeit ±5 ppm	
NO ₂	0 ... 200 ppm Genauigkeit ±5 ppm	
SO ₂	0 ... 2.000 ppm Genauigkeit ±10 ppm	
H ₂ S	0 ... 50 ppm Genauigkeit ±5 ppm	
H ₂	0 ... 1 % Genauigkeit ±0,02 %	

4.6 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse und Erkenntnisse der letzten Versuche mit einer Staubmessung zusammengefasst.

4.6.1 Versuch am 15.10.13

Der Versuch am 15.10.2013 war der erste Versuch bei dem Staubmessungen vorgenommen werden sollten.

Das **Hackgut** wurde aus dem Zwischenbehälter einer Vergasungsanlage der Firma Cleanstgas entnommen und in den Hackgutbehälter gefüllt. Es besteht im Wesentlichen aus Fichtenholz und hat einen sehr geringen Rindenanteil. Wie in Abbildung 48 ersichtlich, handelt es sich um ein qualitativ sehr hochwertiges Fichtenhackgut, welches in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielt.



Abbildung 48: Qualitätshackgut vom 15.10.2013

Neben einer durchgeführten Wassergehaltsbestimmung wurde von einer chemischen Analyse sowie von einer Aschegehaltsbestimmung des Brennstoffes abgesehen. Der Wassergehalt der entnommenen Hackgutprobe von 620 g hat sich nach Gl. 4-6 auf **23,4%** errechnen lassen.

$$w = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Gesamt}}} = \frac{m_{EW} - m_{AW}}{m_{EW} - m_{TARA}} = \frac{1482,2 - 1337,2}{1482,2 - 863,2} = 23,4 \text{ [\%]} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Die Zusammensetzung des Hackgutes, auf die Trockenmasse bezogen, wurde anhand des optischen Eindruckes mit 99% Fichtenholz, sowie 1% Fichtenrinde festgelegt. Daraus ergibt sich ein unterer Heizwert von 3,84 kWh/kg_{Bf} und bei einer angestrebten feuerungstechnischen Wärmeleistung von 50 kW ein erforderlicher

Brennstoffmassenstrom von 13 kg/h. Die Brennstoffförderleistung der Hackgutaustragungsschnecke bei 100% Einschaltdauer ergab eine Menge von 22,1 kg/h und eine daraus folgende Einschaltzeitdauer von 35,3 Sekunden bei einer Periodendauer von einer Minute.

Aufgrund der Verbrennungsrechnung mit in Abbildung 38 gezeigtem Berechnungstool, ergibt sich bei einem primären Luftverhältnis von 0,25 und Restsauerstoffgehalt des Rauchgases von 6% ein Primärluftmassenstrom von 13 kg/h und ein Sekundärluftmassenstrom von 73,5 kg/h. Weiters wurde von der Rückführung eines Rezirkulationsgases abgesehen und die Rostvorschubgeschwindigkeit von etwa 25 mm/min eingestellt. In Abbildung 49 ist der Verlauf der Schachttemperaturen sowie der Primärluftmassenstrom dargestellt. Die Primärluft wurde innerhalb dieser Phase sukzessive von 14 kg/h bis auf 20 kg/h gesteigert, während sich die Schachttemperaturen auf 480 °C bis 600 °C erhöhten. Im Unterschied zum Startvorgang aus Abbildung 40 ist der Temperaturunterschied zwischen TC3 und den Schachttemperaturen wesentlich größer. Die Ursache für diesen Effekt kann durch den wesentlich geringeren Primärluftmassenstrom unmittelbar beim Zündvorgang begründet werden.

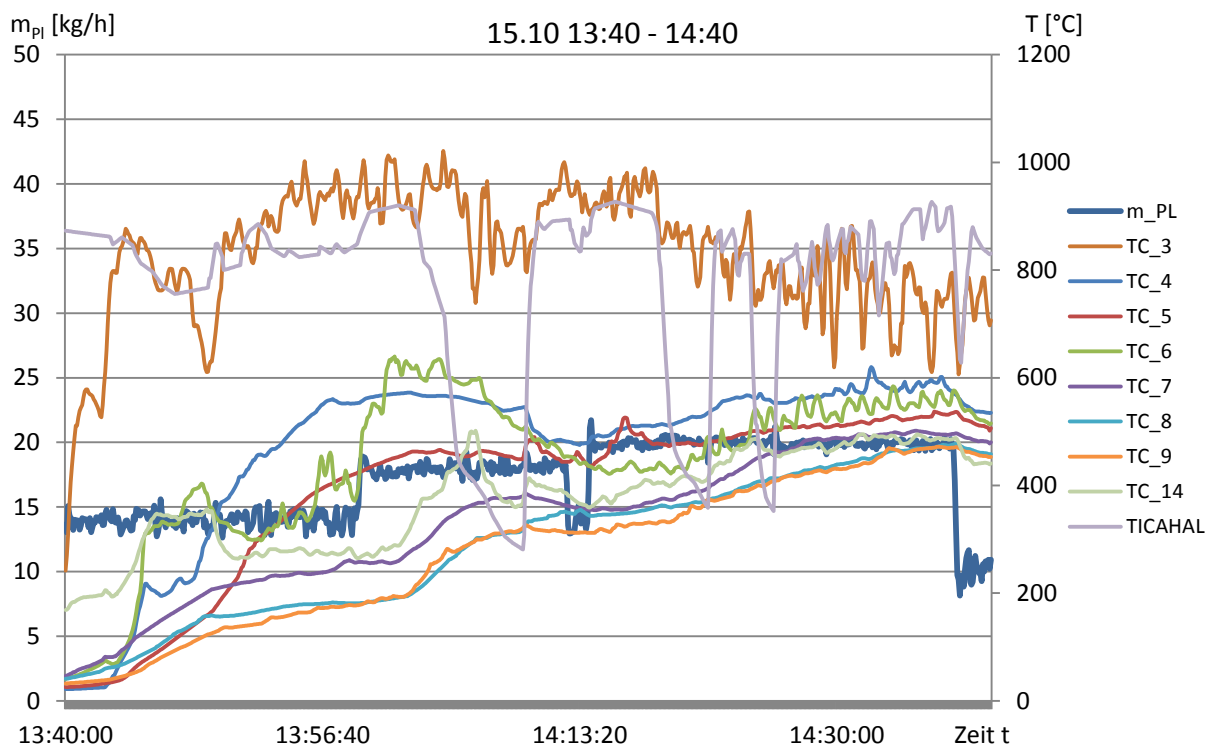


Abbildung 49: Temperaturverlauf der Startphase am 15.10

Da die Flamme in der Sekundärverbrennungszone mit Hilfe des Gasbrenners stabilisiert wurde, konnte die Primärluft schlagartig auf 10 kg/h reduziert werden.

Diese drastische Reduktion hat den Vorteil, dass die Brennstoffbetthöhe rasch steigt und sich den gewünschten Vergasungsbedingungen schnell nähert. Weiters kann man bei Rücknahme der Primärluft das Absinken der Schachttemperaturen am Ende des Betrachtungszeitraumes sehr gut erkennen. Aufgrund der trägeren Systemeigenschaften dauert es in der Regel ein bis zwei Stunden, bis sich ein annähernd stationärer Zustand eingestellt hat. Bleiben die Schachttemperaturen bzw. die Kesselwärmeleistung konstant oder pendeln sie sich um ein gleiches Niveau ein, kann dieser Zustand als stationär angenommen werden. In diesem Fall konnte die erste Staubabsaugung erst nach 1,5 h begonnen werden. Die drei Staubmessungen wurden im stationären Betrieb in der Zeit von 16:08 bis 18:09 Uhr durchgeführt.

Abbildung 50 stellt den Temperaturverlauf während der Messungen dar. TC6 ist im vorderen Bereich des Schachtes angebracht. Aufgrund des geringeren Druckverlustes wegen einer dünneren Ascheschicht strömt in diesem Bereich mehr Primärluft und es wird somit mehr Brennstoff umgesetzt. Dies führt nicht nur zu einem vertikalen sondern auch zu einem horizontalen Temperaturgradienten. Die Temperatur an dieser Stelle sinkt im Folgenden, da sich die Durchbrandlöcher in diesem Bereich durch das nachrieselnde Hackgut zunehmend verschließen. Jede Messung nimmt in etwa ½ Stunde excl. Filterwechsel in Anspruch.

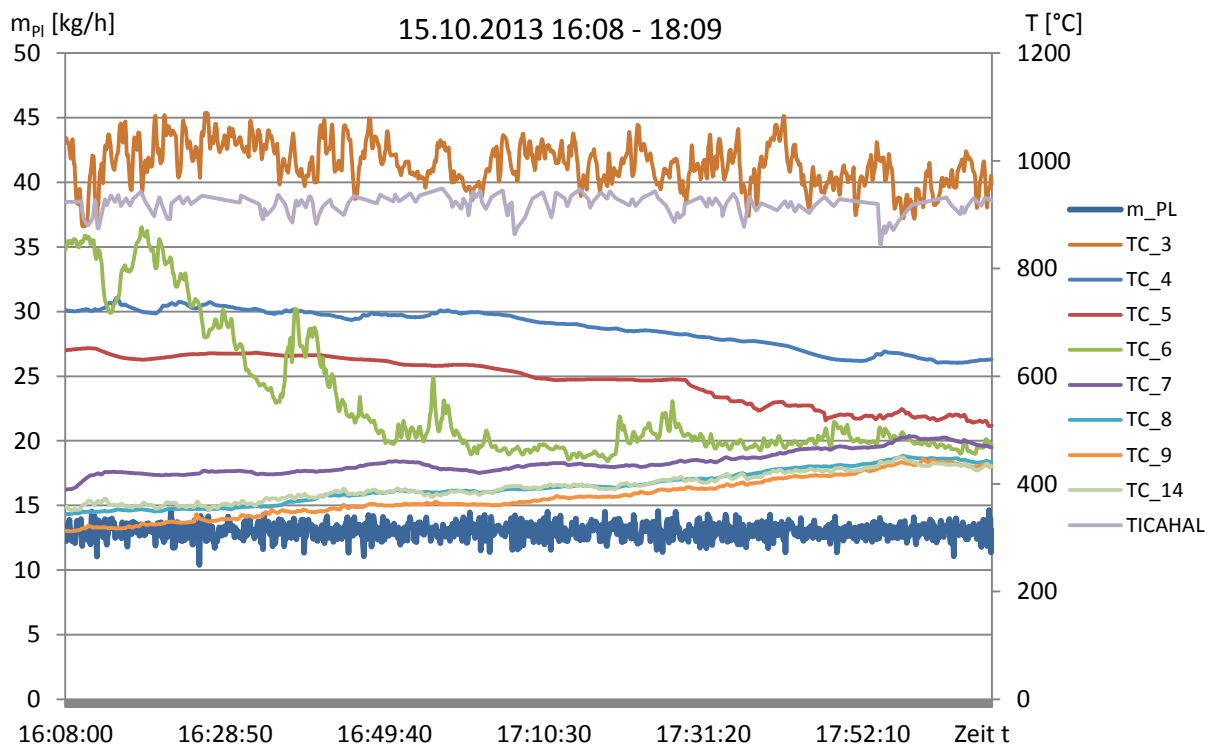


Abbildung 50: Temperaturverlauf während der Staubmessungen

Bei Beendigung der Staubmessungen wurde ein **Messfehler** entdeckt. Wird Rauchgas aus dem Kaminrohr abgesaugt, sind in den Waschflaschen aufsteigende Gasblasen deutlich zu erkennen. Nachdem der Volumenstrom auf 3 l/min gedrosselt wurde, kam die Blasenbildung zum Erliegen. Dies ist ein Indiz, dass die Gaskonditionierungsanlage ein Leck aufweist und somit Falschlufft in der Höhe von 3 l/min ins System eindrang. Das Potential der Falschlufftmenge wurde anschließend in einer Messreihe evaluiert und ein Messfehler von 61,5% ermittelt. Die Messwerte wurden zwar um diesen Betrag korrigiert, dürfen allerdings für einen weiteren Vergleich unterschiedlicher Messreihen nicht verwendet werden.

Im Anschluss wurden die Daten der Messungen aufbereitet und pro Messung ein Durchschnittswert der jeweiligen Messgröße gebildet. Aus dem aufgezeichneten Primärluft-, Sekundärluftmassenstrom sowie dem Restsauerstoffgehalt kann auf den tatsächlich eingetragenen Brennstoffmassenstrom, das tatsächliche Primärluftverhältnis, das Sekundärluftverhältnis und unter Zuhilfenahme der Kesselwärmeleistung auf den Kesselwirkungsgrad rückgerechnet werden. Das Excel-Berechnungstool, in Abbildung 38 dargestellt, wurde um eine zusätzliche Funktion erweitert. Die arithmetischen Mittelwerte von Primärluft, Sekundärluft, Restsauerstoffgehalt und Kesselwärmeleistung werden im roten Feld im rechten oberen Bereich der Grafik eingetragen. Eine Solver-Funktion verändert die zuvor definierten Werte wie feuerungstechnische Wärmeleistung, primäres Verbrennungsverhältnis, gesamt Verbrennungsverhältnis und Kesselwirkungsgrad, sodass die eingangs berechneten Luftmassenströme, der Restsauerstoffgehalt und die Kesselwärmeleistung mit den ausgewerteten übereinstimmen. Es ergeben sich für jede Messung somit eindeutige Verbrennungs-/Vergasungsbedingungen.

Tabelle 10 fasst diese Ergebnisse zusammen. Die Staubwerte sind auf einen Normkubikmeter Rauchgas mit einem Sauerstoffgehalt von 13% bezogen. Die Normbedingungen sind, wie in DIN 1343 definiert, bei 0 °C, 1013 mbar und 0% Luftfeuchtigkeit angewendet. Die Sekundärluftmenge nimmt während der drei Messreihen von 74 kg/h auf 64 kg/h ab. Bei konstantem Primärluftmassenstrom muss sich somit das Primärverbrennungsverhältnis erhöhen. Im Gegensatz zu einem niedrigen Primärluftverhältnis, bei dem sich ein hohes Brennstoffbett ausbildet, ist der Temperaturgradient der Schachttemperaturen wesentlich höher als bei großem Primärluftverhältnis. Demzufolge muss also bei steigendem Primärluftverhältnis der Temperaturgradient sinken. Vergleicht man die Messwerte der Thermoelemente des unteren Schachtteiles so ist zu erkennen, dass die Temperaturen während der Messungen leicht sinken. Im Gegenzug steigen die Temperaturen der oberen Thermoelemente. Der Temperaturgradient sinkt und es bestätigt sich die zuvor aufgestellte Annahme.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Messergebnisse vom 15.10

15.10.2013	1510-11	1510-06	1510-08	Ø Wert
m_{PL} [kg/h]	13,0	13,0	13,0	13,0
m_{SL} [kg/h]	74,1	72,7	64,6	70,5
Rest O ₂ [%]	6,2	6,2	5,8	6,1
P_{Wasser} [kW]	37,7	38,1	34,9	36,9
TC_3 [°C]	1013	994	961	989
TC_4 [°C]	725	695	634	685
TC_5 [°C]	640	598	527	588
TC_6 [°C]	724	475	480	560
TC_7 [°C]	418	434	474	442
TC_8 [°C]	356	396	440	397
TC_9 [°C]	332	376	429	379
TC_14 [°C]	365	397	432	398
TICAHAL [°C]	919	924	915	919
λ_{prim}	0,23	0,23	0,25	0,24
λ_{ges}	1,51	1,51	1,47	1,50
CO [ppm]	-	-	-	-
NOx [mg/Nm ³]	-	-	-	-
Staub [mg/Nm ³ 13% O ₂]	26,3	26,7	15,5	22,8
Kesselwirkungsgrad	79,0%	81,0%	79,7%	79,9%

4.6.2 Versuche am 24.10 und 30.10

Für die weiteren Versuche war es wichtig ein Standardhackgut mit 25-30% Wasser und mehr Rinden- und Feianteil zu verwenden. Aus diesem Grund wurden vom Biomassehof in St. Margarethen an der Raab drei Bigbags Standard-Hackgut bestellt. Abbildung 51 zeigt das Hackgut und lässt sofort den qualitativen Unterschied zum zuvor verwendeten Hackgut erkennen.



Abbildung 51: Standard Hackgut vom 24.10 und 30.10.2013

Bei dieser Charge wurde neben einer Wassergehaltsbestimmung auch der Aschegehalt bestimmt. Der Wassergehalt wurde analog zu dem vorherigen Versuch ausgewertet und liegt bei **30,25%**. Der Aschegehalt wurde im Labor bei Cleanstgas ermittelt und liegt bei **1,78%** auf die trockene Hackgutmasse bezogen. Der relativ hohe Aschegehalt liegt zum einen am höheren Rindenanteil des Hackgutes und zum anderen ist das Hackgut mit Erdpartikeln verunreinigt. Die chemische Zusammensetzung wurde nicht analysiert.

Die Holzarten des Hackgutes wurden wieder durch den optischen Eindruck auf 70% Fichtenholz, 10% Fichtenrinde, 19% Buchenholz und 1% Buchenrinde geschätzt. Der Heizwert liegt somit bei etwa 3,4 kWh/kg_{Brf}.

Ziel dieser Versuchsreihe ist es, die Feinstaubbelastung über verschiedene Primärluftverhältnisse zu ermitteln. Daher wurde am 24.10 ein Betrieb bei λ_{prim} bei 0,3 angestrebt und am 30.10 sollte ein λ_{prim} von ca. 0,25 und nahe 0,2 realisiert werden. Die Berechnung der einzustellenden Parameter, sowie der Startvorgang

sind mit dem Versuch vom 24.10 ident. Der Temperaturverlauf während der drei Staubmessungen sieht, wie in Abbildung 52 dargestellt, aus. Er ist wesentlich stationärer, wobei die Schwankungen der Einzeltemperaturen größer sind. Eine mögliche Ursache könnte das aufgrund des größeren Primärluftverhältnisses niedrigere Brennstoffbett und die Einwirkung von Rostbewegung und Brennstoffeintrag sein. Das erste Thermoelement, TC3, liegt auf ähnlichem Niveau, wobei die Schachttemperaturen sehr eng beisammen liegen und auf kein ausgeprägtes Brennstoffbett deuten. Diese Annahme bestätigte sich bei einem Blick durch das Schauglas auf den Wanderrost. Es waren teilweise Flammen zu erkennen. Das Brennstoffbett ist vermutlich zwar höher als im normalen Rostbetrieb, aber durch den zentrisch angeordneten Einwurf mittig gehäuft. An der Schachtwand bildete sich sichtlich noch kein ausgeprägtes Brennstoffbett aus, da es in diesem Bereich niedergebrannt war.

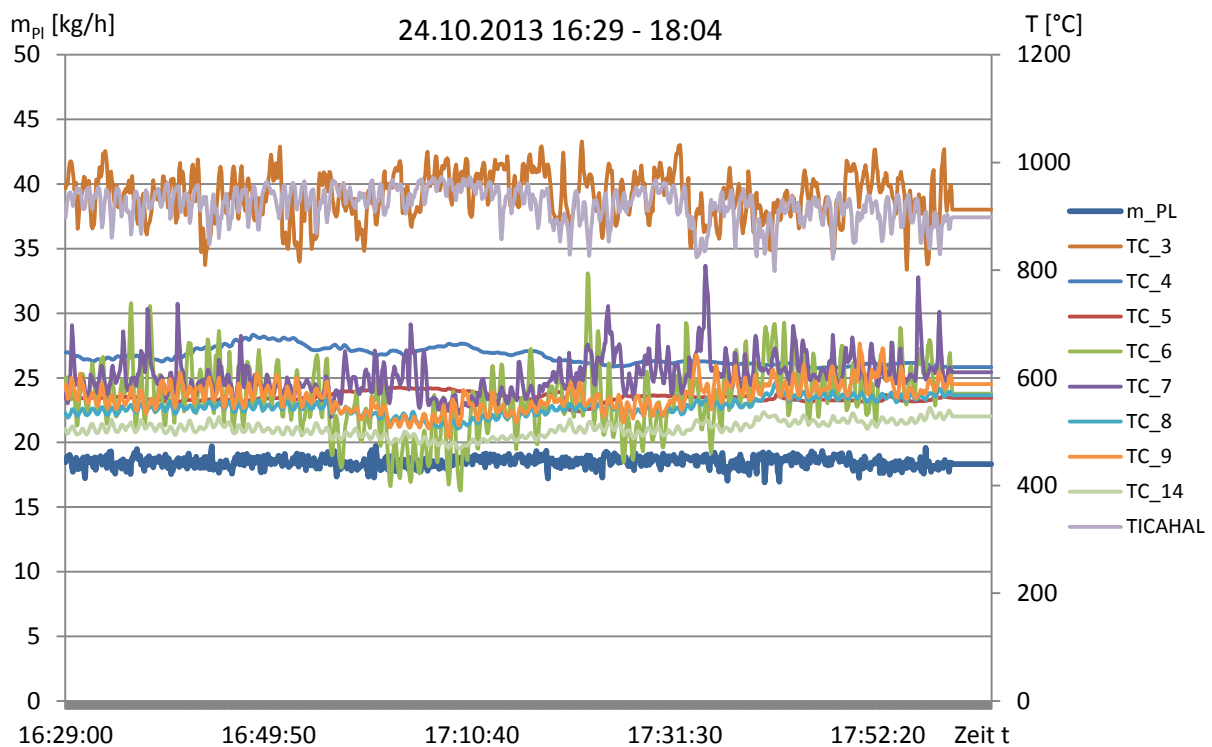


Abbildung 52: Temperaturverlauf während der Staubmessungen

Tabelle 11 fasst die Messergebnisse vom 24.10 bei einem nachträglich errechneten Primärverbrennungsverhältnis von ca. 0,28 zusammen. Die Staubemissionen von 34,6 mg/Nm³ stellt im Vergleich zu bestehenden Kesseln bei gleicher Hackgutqualität eine geringfügige Verbesserung dar, würden allerdings die 20 mg/Nm³ Grenze der 1. BImSchV bei weitem überschreiten.

Bei diesem Versuch stand die Abgasanalyse der Fa. Cleanstgas zur Verfügung und so konnten die CO- und die NO_x-Emissionen mit aufgezeichnet werden. Die in Tabelle 11 angegebene Werte sind für jede Messreihe gemittelt. Kaliumverbindungen werden bei Temperaturen am Wanderrost um 940 °C zersetzt. Aufgrund der geringen Schüttung können diese nicht am überlagerten Brennstoffbett kondensieren und zu Kaliumcarbonat (Pottasche) reagieren. Sie werden über den Gasstrom aus dem Vergaserschacht ausgetragen und begründen mitunter diese erhöhten Gesamtstaubbelastungen.

Der Kesselwirkungsgrad von ca. 80% bestätigt die Werte vom Versuch am 15.10. Dieser, im Vergleich zu normalen Hackgutfeuerungen, niedrige Wirkungsgrad kann durch das Fehlen einer Wärmedämmung des Kesselkörpers, sowie des Brennerkastens liegen. Die Abstrahlverluste des Brennerkastens mit einer Oberflächentemperatur von 315 °C können als beträchtlich eingestuft werden.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Messergebnisse vom 24.10

24.10.2013		2410-U1	2410-U2	2410-U3	Ø Wert
m _{PL}	[kg/h]	18,5	18,6	18,4	18,5
m _{SL}	[kg/h]	80,3	86,4	77,4	81,4
Rest O ₂	[%]	5,8	6,0	6,0	5,9
P _{Wasser}	[kW]	43,7	45,9	42,1	43,9
TC_3	[°C]	932	959	929	940
TC_4	[°C]	652	639	624	638
TC_5	[°C]	562	564	560	562
TC_6	[°C]	573	540	601	571
TC_7	[°C]	594	595	621	604
TC_8	[°C]	543	534	565	547
TC_9	[°C]	567	547	589	568
TC_14	[°C]	505	495	521	552
TICAHAL	[°C]	929	930	901	920
λ _{prim}		0,28	0,27	0,29	0,28
λ _{ges}		1,48	1,51	1,50	1,50
CO	[ppm]		56		56
NOx	[mg/Nm ³]		576		576
Staub	[mg/Nm ³ 13% O ₂]	34,6	36,1	33,2	34,6
Kesselwirkungsgrad		80%	81%	81%	81%

In Abbildung 53 oben sind die Laborflaschen und darunter die zugehörigen Filterhülsen zu sehen und mit der entsprechenden Messnummer gekennzeichnet. Die Laborflaschen befinden sich auf unterschiedlich eingefärbtem Papier, um weiße sowie schwarze Partikel auf einen Blick darstellen zu können. Die weißen Partikel lassen auf die verdampften und später kondensierten Kaliumverbindungen schließen, während es sich bei den dunkleren Partikeln eher um mitgerissene Flugaschepartikel handelt. Die Laborflaschen, aber im speziellen die Filterhülsen enthalten, verglichen mit den folgenden Messungen, einen sehr großen Anteil an Grobstaub. Die nicht den Erwartungen entsprechenden Messergebnisse könnten im Mitreißen von Brennstoffpartikeln zur Sekundärverbrennung erklärt werden. Aufgrund der höheren Primärluft und des größeren Brennstoffumsetzungsgrades im Vergaserschacht stellt sich zwangsläufig ein größerer Gasvolumenstrom ein. Während bei kleinerem Primärverbrennungsverhältnis (Versuch vom 30.10) die Temperatur am Hackguteintritt bei ca. 240 °C das Hackgut im Wesentlichen nur trocknet, gast es bei den hier vorhandenen Temperaturen von rund 550 °C (TC14) schon vollständig aus und verliert, wie in Abbildung 3 dargestellt, fast 80% der Gesamtmasse. Mit sinkendem Gewicht steigt das Potential des Mitreißens. Diese Tatsache korreliert mit der Beobachtung glühender Flugaschepartikel durch ein zusätzliches Schauglas am Gasbrenner mit Blick in die Sekundärverbrennungszone.

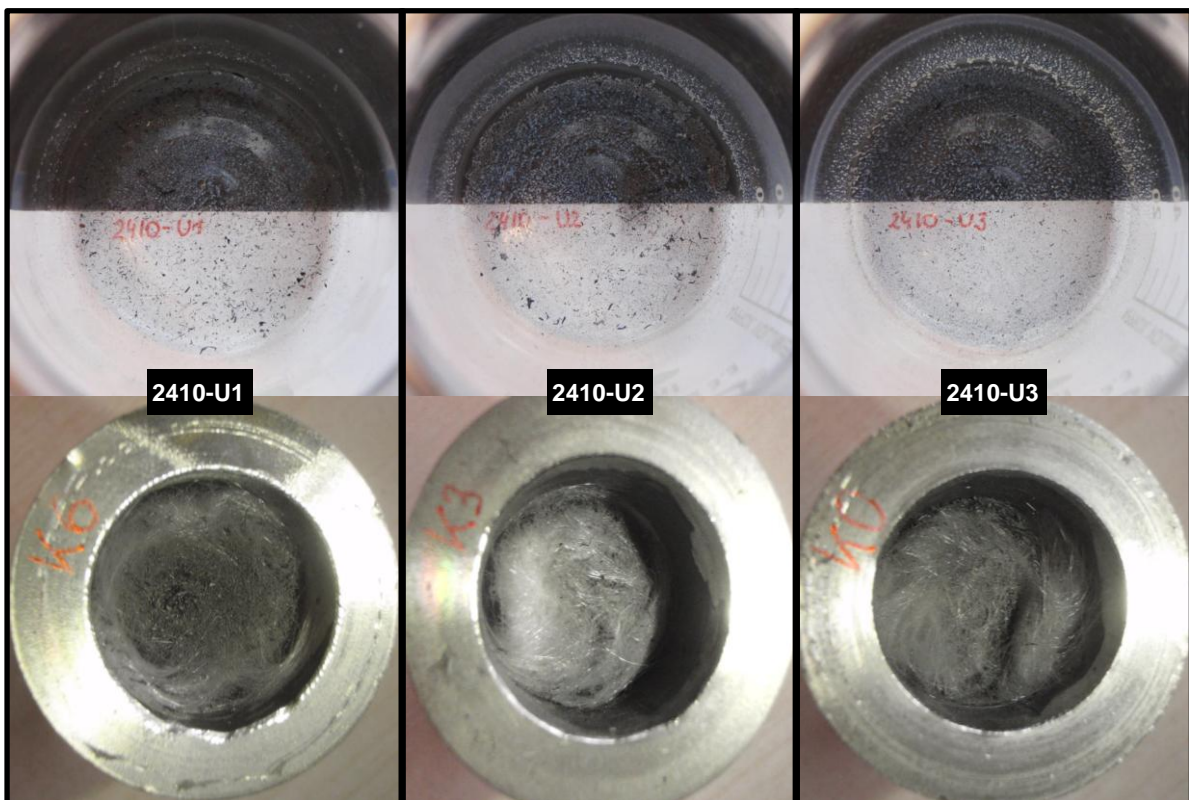


Abbildung 53: Foto der Laborflaschen und zugehörigen Filterhülsen

Bei den **Versuchen am 30.10.13** wurde Hackgut derselben Charge verwendet. Der Wasser- und Aschegehalt, sowie die Hackgutzusammensetzung konnten gleich wie zum 24.10 angenommen werden.

Der Unterschied zu den bisherigen Versuchsläufen war, dass auf die Stützflamme des Gasbrenners verzichtet wurde. Durch den Start in den Rostbetrieb bei großen Primärluftverhältnissen erwärmte sich die Anlage und die Temperatur in der Sekundärverbrennungszone pendelte zwischen 650 °C und 820 °C. Die Befürchtung, dass sich die Flamme bei diesen niedrigen Temperaturen und vergleichsweise hohem Wasseranteil nicht von selbst ausbildet, konnte nicht bestätigt werden. Der Übergang in die Vergasung wurde durch eine Reduktion der Primärluft eingeleitet und ließ die Sekundärverbrennungstemperatur auf über 900 °C ansteigen, sowie die Schachttemperaturen absinken.

Zirka zwei Stunden später um 15:21 konnte ein stabiler Vergasungsbetrieb realisiert werden. Die große Wartezeit, bis sich ein stationärer Zustand ausgebildet hat, ist beträchtlich und lässt auf die große Trägheit des Systems schließen.

Der Temperaturverlauf während der ersten drei Staubmessungen ist in Abbildung 54 dargestellt. Besonders bemerkenswert ist die große Temperaturschwankung des Thermoelements TC6. Dieses misst die Temperatur im vorderen Bereich des Vergasungsschachtes. Auch TC7 und TC9 sind in der vorderen Hälfte angeordnet. All diese Thermoelemente weisen im Vergleich zu den Thermoelementen in der hinteren Hälfte größere Temperaturschwankungen auf. Diese Tatsache könnte mit der von vorne nach hinten dicker werdenden Ascheschicht und dem daraus resultierenden sinkenden Gasvolumenstrom erklärt werden. Weiters haben die Rostbewegung sowie der Hackguteinwurf einen direkten Einfluss auf die Temperatur. Eine Bewegung zerrüttet die Schüttung in diesem Bereich und lässt die Temperaturen sinken.

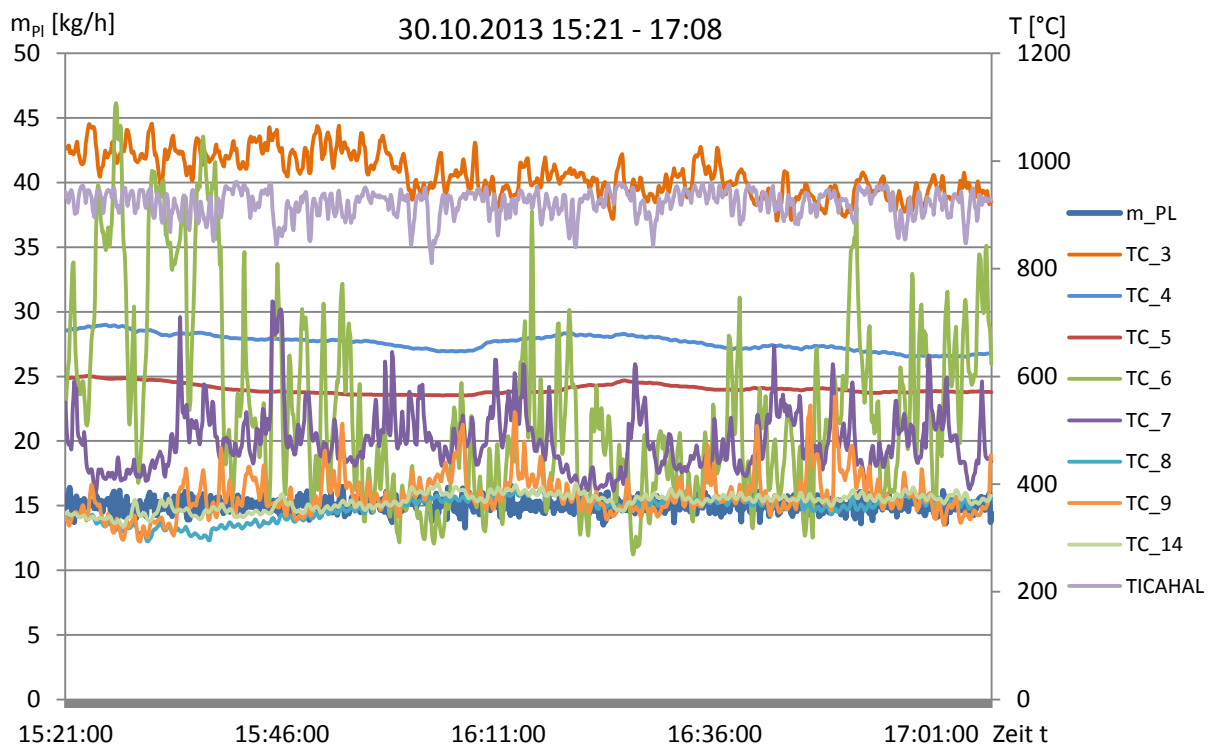


Abbildung 54: Temperaturverlauf während der ersten drei Messungen

Gegen Ende der dritten Staubmessung um 17:05 Uhr ist der Rost stecken geblieben und die Asche wurde nicht mehr ausgetragen. Der Druckverlust im hinteren Schachtteil steigt, sodass dieser von immer weniger Primärluft beaufschlagt wird. Ein Großteil der Primärluft strömt im vorderen Bereich. Als Indiz dafür können die steigenden Temperaturen in der vorderen Vergaserschachthälfte angenommen werden.

Nach Beendigung der Messung wurde der Rost mit dem Rezirkulationsgas gekühlt, bis sich der Wanderrost bei maximalem Drehmoment wieder in Bewegung setzte.

Die Ascheschicht wurde anschließend zur Ascheschnecke gefördert und senkte somit den Druckverlust zwischen Brennerkasten und Übergangsteil.

In Tabelle 12 sind die Messergebnisse zusammengefasst. Die Staubemissionen sind von 34,6 mg/Nm³ auf 13,9 mg/Nm³ drastisch gesunken. Ebenfalls konnten die CO-Emissionen auf etwa die Hälfte reduziert werden. Die Wärmetauscherrohre wurden vom 24.10 zum 30.10 gereinigt. Die Auswirkungen machten sich unmittelbar in einem gestiegenen Kesselwirkungsgrad und niedrigeren Rauchgasaustrittstemperaturen bemerkbar. Die Verbrennungstemperatur nach der Sekundärluftdüse hat sich durch die Reduktion des Primärluftverhältnisses nicht wesentlich verändert. Im Gegensatz dazu ist die Eintrittstemperatur zur Sekundärverbrennungszone von 550 °C auf ca. 370 °C gefallen. Während das Gesamtluftverhältnis annähernd konstant gehalten wurde, konnte das Primärluftverhältnis von 0,28 auf 0,24 reduziert werden. Die Temperatur in unmittelbarer Nähe zum Wanderrost ist durch die geringere Kühlwirkung des reduzierten Primärluftmassenstromes um 30 °C gestiegen.

Tabelle 12: Zusammenfassung der ersten Messreihe vom 30.10

30.10.2013		3010-U4	3010-U5	3010-U6	Ø-Wert
m_{PL}	[kg/h]	15,1	15,1	15,0	15,1
m_{SL}	[kg/h]	82,9	78,3	81,3	80,8
Rest O₂	[%]	6,1	6,0	6,0	6,0
P_{Wasser}	[kW]	43,4	41,8	43,3	42,8
TC_3	[°C]	1017	961	939	972
TC_4	[°C]	677	666	647	663
TC_5	[°C]	583	575	574	577
TC_6	[°C]	684	438	544	555
TC_7	[°C]	482	475	484	480
TC_8	[°C]	327	372	364	354
TC_9	[°C]	362	387	385	378
TC_14	[°C]	349	380	375	368
TICAHAL	[°C]	920	918	922	920
λ_{prim}		0,23	0,24	0,23	0,24
λ_{ges}		1,51	1,50	1,50	1,50
Staub	[mg/Nm ³ 13% O ₂]	15,7	11,7	14,3	13,9
CO	[ppm]	22	30	-	26
NOx	[mg/Nm ³]	-	-	-	-
Kesselwirkungsgrad		82,3%	83%	83%	83%

Im Vergleich zu Abbildung 53 zeigen die Laborflaschen von Abbildung 55 einen geringeren Grobstaubanteil. Die Filterhülsen sind mit nur wenigen, mit dem freien Auge ersichtlichen, Staubpartikeln verunreinigt. Auch die Laborflaschen weisen im weißen Bereich einen wesentlich geringeren Anteil an „dunklen“ Partikeln auf.



Abbildung 55: Foto der Laborflaschen und zugehörigen Filterhülsen

Zirka zwei Stunden später hat sich wieder ein stationärer Betrieb bei einem $\lambda_{\text{prim_SOLL}}$ von 0,2 eingestellt. Abbildung 56 zeigt, dass die Schachttemperaturen in der Schüttung gestiegen sind, während die Temperaturen oberhalb der Schüttung von 368 °C auf 249 °C sanken. Der Temperaturgradient innerhalb des Brennstoffbettes ist gestiegen, welches mit einem kleineren Primärluftverhältnis korreliert. Im Besonderen sind die sehr geringen Temperaturen im Eintritt zum Sekundärluftstein mit einer Temperatur von ca. 250 °C hervorzuheben. Diese Temperatur lässt darauf schließen, dass das hineinfallende Hackgut erst trocknen muss aber parallel schon in die Pyrolyse übergeht. Im Unterschied zur Vergasung bei λ_{prim} von 0,24 bis 0,28, besteht das Brennstoffbett nicht nur aus Pyrolysekoks, sondern auch aus einem größeren Teil an „frischem“ Hackgut.

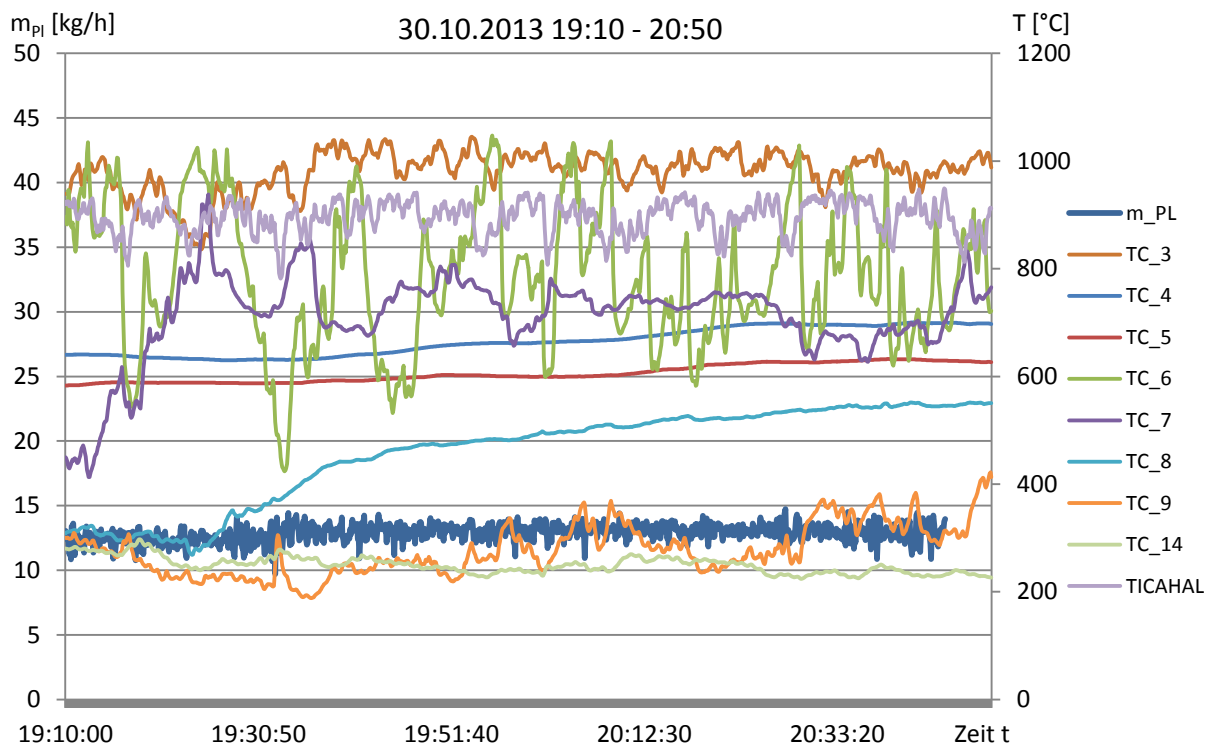


Abbildung 56: Temperaturverlauf während der zweiten drei Messungen

Tabelle 13 fasst die Messwerte der zweiten Messreihe zusammen. Die Kesselleistung ist bei gleichem Brennstoffeinschub leicht gesunken. Diese Tatsache könnte auf ein Ansteigen des Brennstoffbettes hinweisen. Weiters konnten neben den CO-Emissionen die Gesamtstaubbelastung bei einem realisierten Primärluftverhältnis von 0,22 um 25% auf 10,3 mg/Nm³ reduziert werden. Die CO-Emissionen verringerten sich um 65% und lassen auf einen sehr guten Ausbrand schließen. Die geringen CO-Emissionen können durch eine verhältnismäßig bessere Durchmischung des Produktgases mit der Sekundärluft und eine längere Verweilzeit im heißen Verbrennungsbereich erklärt werden.

Tabelle 13: Zusammenfassung der zweiten Messreihe vom 30.10

30.10.2013		3010 – U7	3010 – U8	3010 – U9	Ø-Wert
m _{PL}	[kg/h]	12,5	13,1	13,0	12,9
m _{SL}	[kg/h]	74,4	77,9	79,2	77,2
Rest O ₂	[%]	6,0	6,1	6,1	6,1
P _{Wasser}	[kW]	37,2	40,0	39,8	39,0
TC_3	[°C]	946	995	992	978
TC_4	[°C]	634	662	697	665
TC_5	[°C]	588	602	628	606
TC_6	[°C]	791	795	781	789
TC_7	[°C]	685	744	706	711
TC_8	[°C]	337	490	540	456
TC_9	[°C]	241	282	315	279
TC_14	[°C]	264	246	237	249
TICAHAL	[°C]	889	894	897	893
λ _{prim}		0,22	0,22	0,21	0,22
λ _{ges}		1,50	1,51	1,51	1,51
Staub	[mg/Nm ³ 13% O ₂]	9,9	11,9	9,1	10,3
CO	[ppm]	-	10	8	9
NOx	[mg/Nm ³]	-	-	-	-
Kesselwirkungsgrad		79%	82%	80%	81%

Beim Vergleich der Ansichten in Abbildung 57 mit den Messwerten in Tabelle 13 lässt sich eine Korrelation feststellen. Speziell bei Betrachtung der Flasche U8 und der Filterhülse K8 ist ein größerer Teil an schwarzen Flugaschepartikeln zu erkennen. Dieser optische Eindruck wird durch eine ausgewogene Staubmenge von 11,9 mg/Nm³ bestätigt. Im Gegenzug dazu sind in der Laborflasche U9 und dem Filter 3o fast keine schwarzen Verunreinigungen zu erkennen. Der weiße Belag der zugehörigen Waschflasche ist weniger stark ausgeprägt und korreliert ebenfalls mit der niedrigsten gemessenen Staubmasse von 9,1 mg/Nm³.

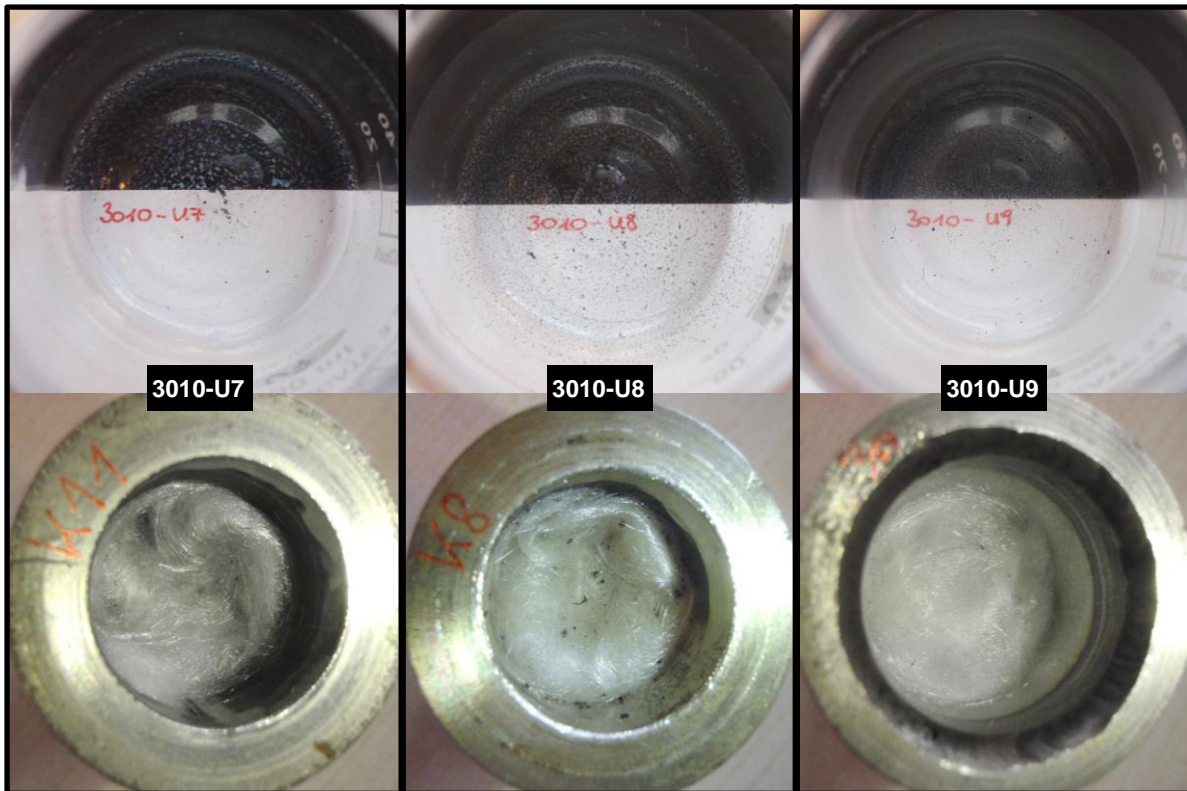


Abbildung 57: Foto der Laborflaschen und zugehörigen Filterhülsen

Bei näherer Betrachtung der \emptyset -Schachttemperaturen fallen, mit steigender Schachthöhe, ein Absinken und ein späteres Ansteigen auf. Diese Tatsache stimmt mit den theoretischen Erkenntnissen aus Kapitel 1.2 nicht überein. Die Temperaturen müssten ausgehend von der Oxidations- über die Reduktions- und die Pyrolysezone bis zum Bereich der Hackguttrocknung stetig fallen. Bei näherer Betrachtung der Position der Thermoelemente fällt auf, dass die Thermoelemente, TC4 und TC5, im hinteren Bereich des Schachtes angeordnet sind und die „kühle“ Stelle im Schacht kennzeichnen. Die folgenden heißeren Thermoelemente, TC6 und TC7, sind hingegen eher dem vorderen Bereich zuzuordnen. Diese ungleiche Verteilung deutet wieder auf eine ungleichmäßige Durchströmung der Primärluft hin. Die Rostelemente treten unverschmutzt in den vorderen Bereich des Vergaserschachtes ein und die Primärluft kann ungehindert in das Brennstoffbett eindringen. Im hinteren Bereich hingegen hat sich eine Ascheschicht auf dem Rostelement durch den abgebrannten Brennstoff aufgebaut. Der Druckverlust steigt und der Primärluftmassenstrom durch das Rostelement nimmt zwangsläufig ab. Somit wird das Brennstoffbett im vorderen Bereich mit mehr Primärluft beaufschlagt.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 58 grafisch dargestellt. Die geringste Schüttungshöhe wurde im Durchbrandloch des vorderen Bereichs mit 175 mm ermittelt. Im hinteren Bereich hingegen konnte sich ein 325 mm hohes Brennstoffbett aufbauen. Die ausgetragene Asche weist aufgrund der schlechten Durchströmung im hinteren Bereich einen erhöhten Restkohlenstoffgehalt auf.

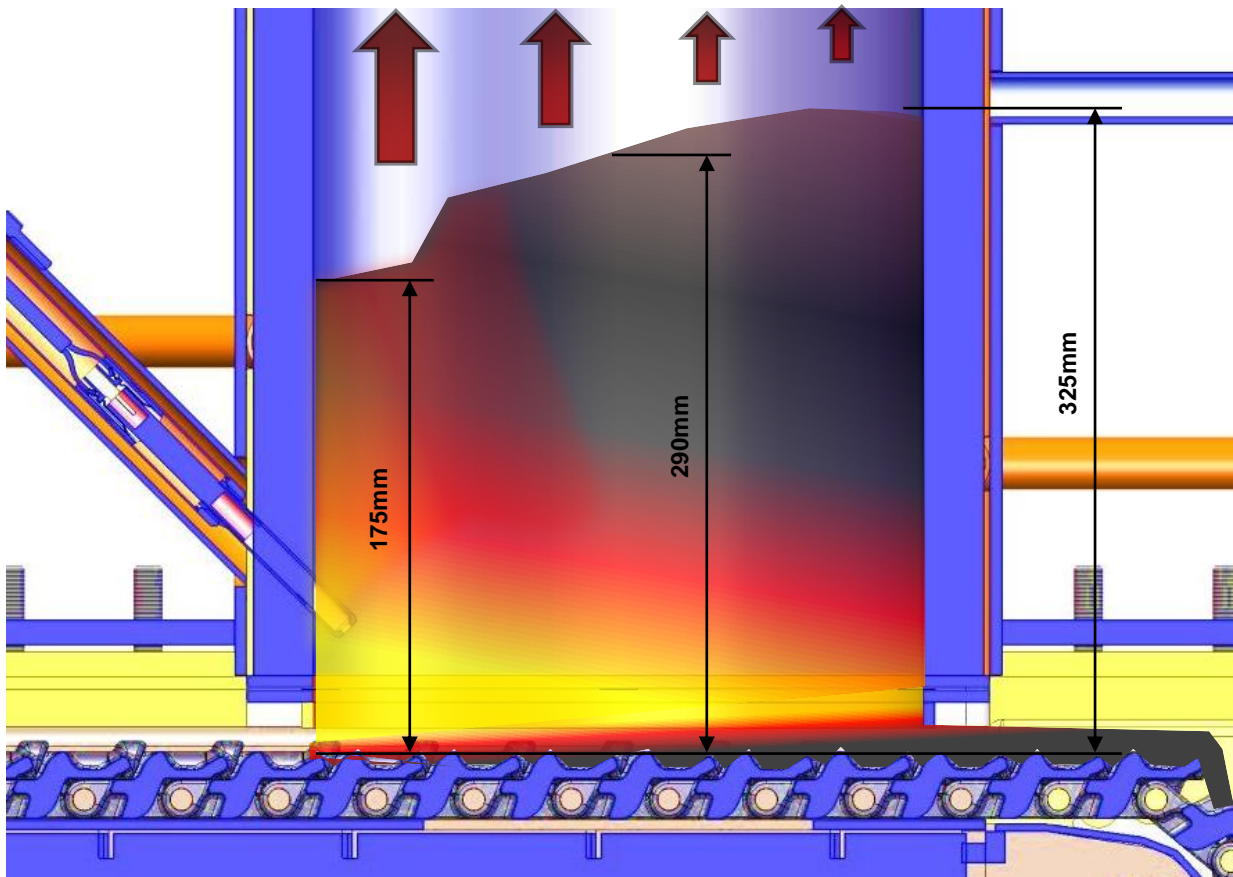


Abbildung 58: Detailansicht des Vergaserschachtes

Um das Brennstoffbett in diesem Zustand zu analysieren und mit den theoretischen Einschätzungen vergleichen zu können, ist es notwendig, dieses so gut wie möglich zu „konservieren“. Dies geschah im letzten Versuch, indem der Brennstoffeintrag sowie die Primär- und Sekundärluftzufuhr abgestellt wurde. Zusätzlich wurde der gesamte Brennerkasten und Stokerkanal mit Stickstoff gespült, sodass keine weiteren Reaktionen mehr stattfinden konnten. Das Ausgasen des restlichen Brennstoffes, durch die noch immer sehr hohen Temperaturen im Schacht, kann jedoch nicht unterbunden werden. Bei der Analyse des Brennstoffbettes muss bedacht werden, dass die Brennstoffbetthöhe während des Abstellvorganges zu einem gewissen Grad sinkt.

Nach dem Ausbau des Sekundärluftsteins kann man direkt auf das Brennstoffbett blicken. Abbildung 59 zeigt den Aufbau des Brennstoffbettes. Der Drehflügelgeber,

zur Begrenzung des Füllstandes ragt von rechts aus der Schachtwand. Die Thermoelemente, TC9 und TC10, sind deutlich zu erkennen. TC12 ist als Erhebung im linken oberen Bildteil, von Kohlenstoffpartikeln bedeckt, zu erkennen. Das Brennstoffbett zeigt im vorderen Teil, also beim Rosteintritt ein ca. 7 cm langes und 3 cm breites Durchbrandloch. Das Thermoelement, TC6, befindet sich bei diesem Durchbrandloch direkt am linken Rand und erklärt somit die erhöhten Temperaturen in diesem Bereich.

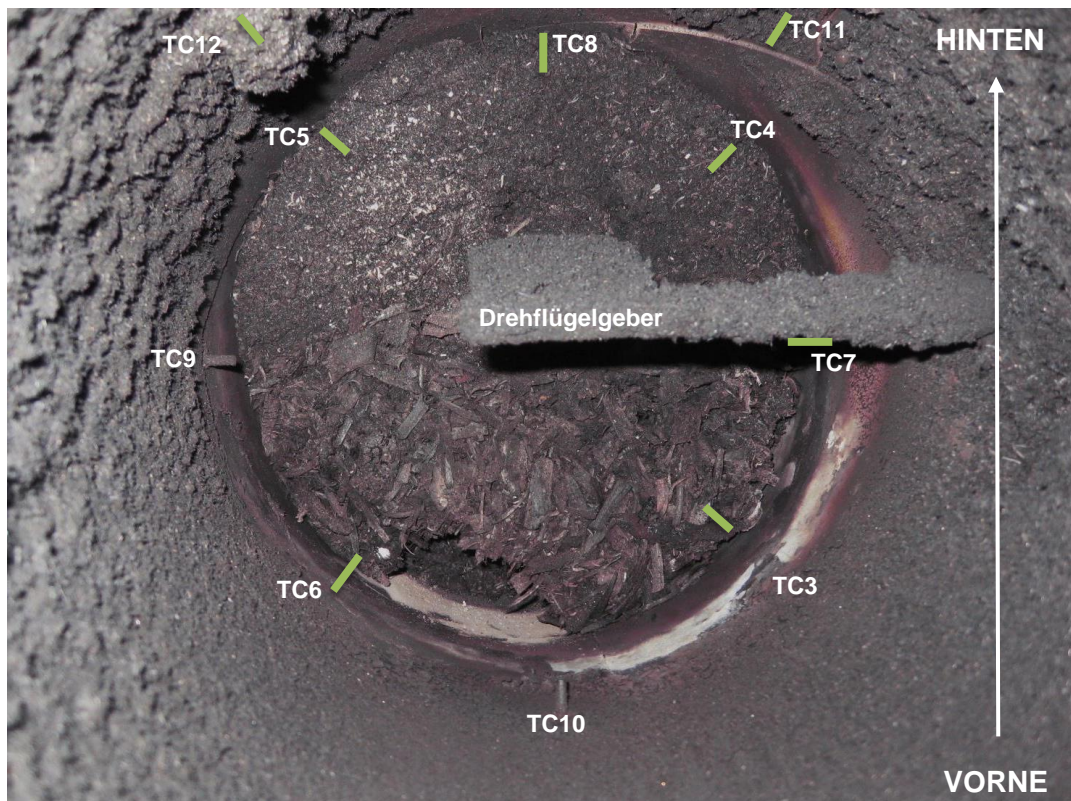


Abbildung 59: Blick von oben auf das Brennstoffbett im erkalteten Zustand

Der Belag des Vergaserschachtes besteht aus schwarzen, kohlenstoffhaltigen, kristallartigen Partikeln. Die dicke dieser Schicht nimmt von vorne nach hinten zu und kann nur bei vorheriger Abstückung des Kessels beobachtet werden. Im Falle eines Standard-Abstellvorganges bleibt der Kohlenstoffbelag nicht bestehen, da dieser abgebrannt wird. Der Verlauf der Belagdicke korreliert mit dem Temperaturverlauf. Die heißeren Temperaturen im vorderen Bereich lassen chemische Reaktionen schneller ablaufen wodurch weniger Kohlenstoffpartikel an der Schachtwand haften bleiben.

Abbildung 60 (links) zeigt den Zustand der Kohlenstoffpartikel an der Schachtwand, während der rechte Teil den Pyrolysekoks der Schüttung nach dem Abstickvorgang zeigt. Die Bruchfläche eines Pyrolysekoksstückes (Abbildung 60 rechts oben) zeigt, dass dieses bis ins Innere, durch die längere Temperatureinwirkung, nur mehr aus Kohlenstoff besteht und die Pyrolyseprodukte vollständig ausgegast sind. In kälteren Bereichen, wie dem Hackguteinschub und dem Flansch zum Drehflügelgeber, konnten auskondensierte Teeranhaftungen beobachtet werden.

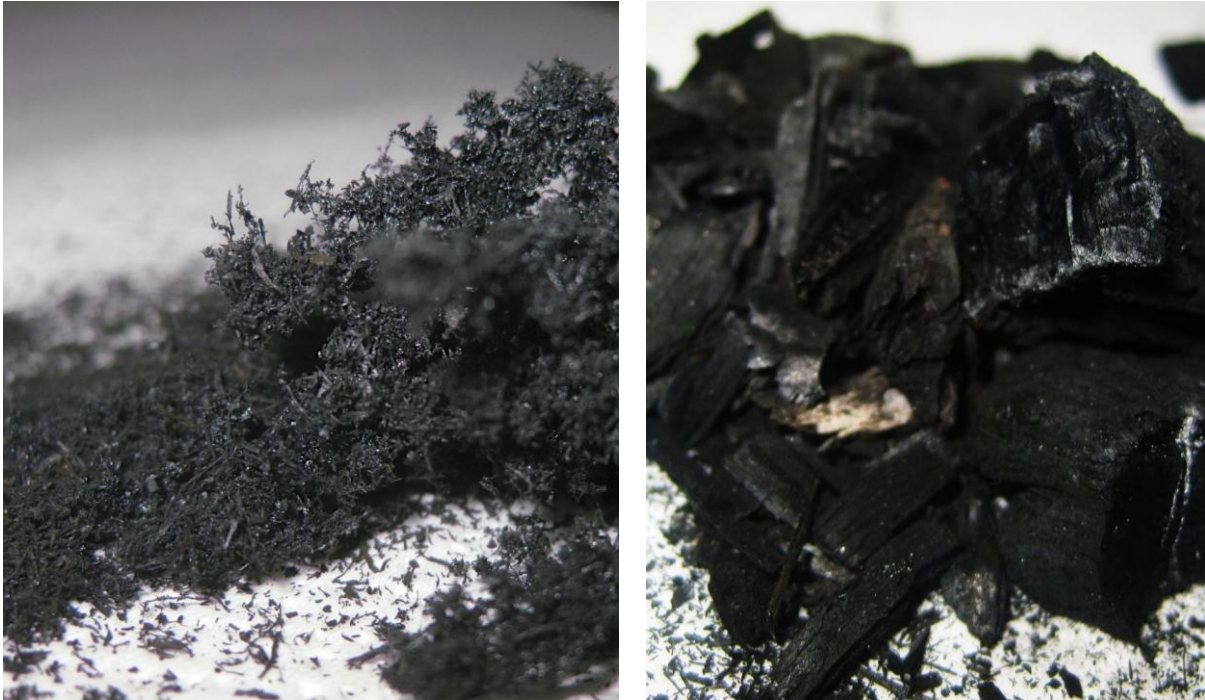


Abbildung 60: Belag aus Kohlenstoffpartikel (links), Pyrolysekoks (rechts)

Abbildung 61 stellt die Zusammenfassung der Staubmesswerte über das erzielte Primärluftverhältnis dar. Messung 1 stellt die Ergebnisse vom 24.10 dar und Messung 2 und Messung 3 sind vom 30.10. Es ist zu erkennen, dass mit sinkendem Luftverhältnis die Staubemissionen um etwa 70% des Ausgangswertes von 34 auf 10 mg/Nm³ gesenkt werden konnten. Durch eine Extrapolation der linearen Trendlinie Richtung kleinerer Primärluftverhältnisse kann darauf geschlossen werden, dass noch geringere Gesamtstaubemissionen realisiert werden könnten. Der Primärluftmassenstrom kann jedoch nur bis zu einem gewissen Grad abgesenkt werden. Die Untergrenze ist bei Erreichen einer instabilen Verbrennung durch zu geringe Temperaturen in der Oxidationszone gekennzeichnet.

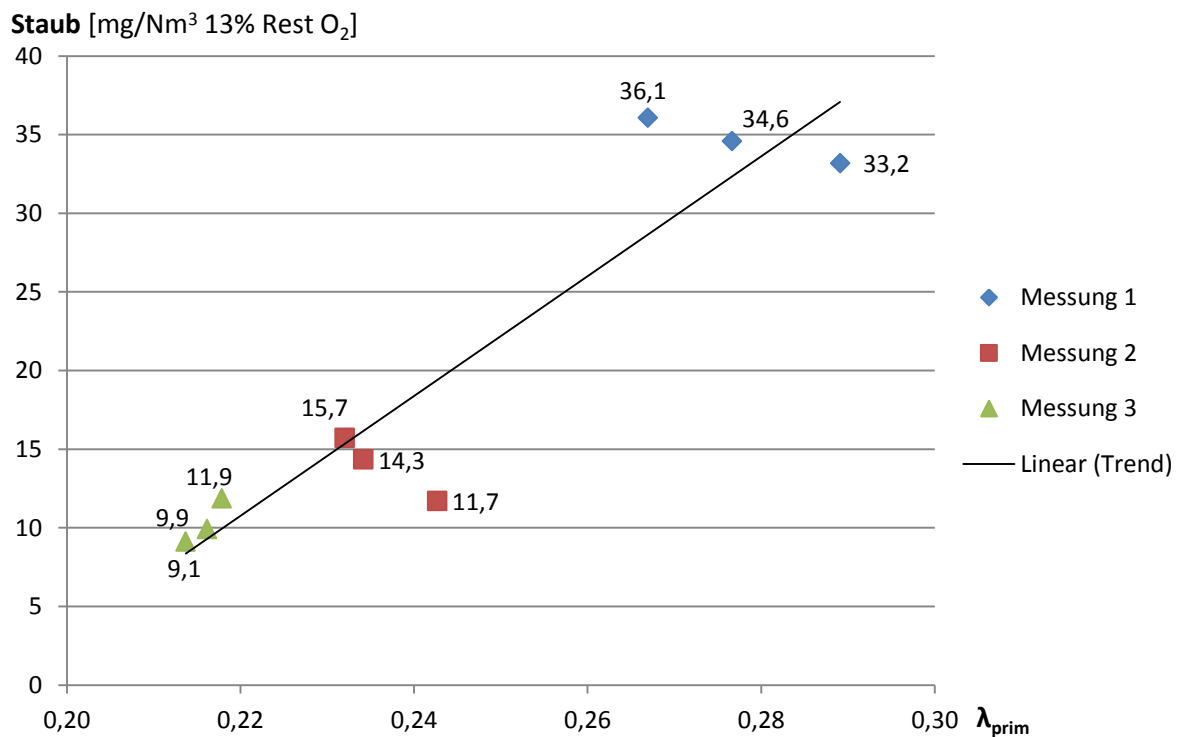


Abbildung 61: Zusammenfassung der Staubmesswerte über das Primärluftverhältnis

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die bisher gemachten Erfahrungen in der Reduktion des Gesamtstaubgehaltes im Rauchgas durch Vergasung des Hackgutes und anschließende Verbrennung des Produktgases bestätigen die Theorie aus Kapitel 1. Zum einen wirkten sich die wesentlich niedrigeren Temperaturen und der geringere Sauerstoffgehalt in der Primärverbrennungszone mit einem geringeren Anteil an leicht zersetzbaren Oxiden aus. Diese stellen eine Vorläufersubstanz für Aerosole $<1 \mu\text{m}$ dar. Ein weiterer Grund für niedrigere Gesamtstaubemissionen stellen die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten im Brennstoffbett durch einen kleineren Primärluftmassenstrom und der somit mitgerissenen Flugasche dar. Die Staubmessungen erfolgten bei einem Primärluftverhältnis von 0,28, 0,24 und 0,22. Bei großem Primärluftverhältnis war die Verschmutzung der Gewebefilter sowie der Waschflaschen durch ausgetragene Flugasche sowie der Salze am größten. Die geringste Gesamtstaubbelastung des Rauchgases wurde bei einem Primärluftverhältnis von 0,22 mit $10,3 \text{ mg/Nm}^3$ bei 13% Rest- O_2 erreicht. Es ist darauf hinzuweisen, dass handelsübliches Fichtenhackgut mit ca. 30% Wassergehalt und etwa 1,8% Aschegehalt verfeuert wurde. Dem optischen Eindruck zufolge war das Hackgut zusätzlich mit einem geringen Anteil an Erde verunreinigt.

Zusätzlich zur Reduktion der Staubbildung konnten die CO-Emissionen wesentlich verbessert werden. Die größten CO-Frachten wurden bei verhältnismäßig großem primärem Lambdawert emittiert und reduzierten sich mit der Rücknahme der Primärluft von 56 ppm ($\lambda_{\text{prim}}=0,28$) auf 8 ppm ($\lambda_{\text{prim}}=0,22$). Die Stickoxidemission konnten nicht für alle Versuche ermittelt werden.

Die an die Staubmessungen angeschlossenen Analysen des Brennstoffbettes sowie der konstruktiven Ausführung des Versuchsstandes, gaben sehr gute Aufschlüsse über mögliche Verbesserungen. Das Brennstoffbett wurde durch ein Unterbrechen der Luftzufuhr und durch Eindüsen von Stickstoff konserviert und konnte nach einer Abkühlphase analysiert werden. Zum einen wirkt sich die asymmetrische Ascheentnahme durch den Wanderrost negativ auf den Brennstoffbettaufbau aus. Entlang des Wanderrostes baut sich eine Ascheschicht auf. Dadurch steigt der Druckverlust und führt infolge zu einer ungleichmäßigen Durchströmung des Brennstoffbettes. Eine zu hohe Rostgeschwindigkeit verstärkt diesen Effekt, indem die bewegten Rostelemente die Koksstücke aus dem vorderen Bereich des Vergasungsschachtes unter das Brennstoffbett im hinteren Bereich schieben und

das Brennstoffbett dadurch in die Höhe drückt. Dadurch entstehen speziell im vorderen Schachtbereich Durchbrandlöcher. Diese führen zu einer ungleichmäßigen Durchströmung der Primärluft und zusätzlich zu einem unterschiedlichen Primärluftverhältnis auf der Brennstoffbettoberfläche. Die dort verhältnismäßig hohen Temperaturen und höherer Sauerstoffgehalt oxidieren und zersetzen Kaliumverbindungen, und setzen diese in den Rauchgasstrom frei. Weiters sind in diesen Bereichen turbulente Strömungsbedingungen und ein erhöhter Austrag an Flugasche bzw. sich nicht zersetzenden Ca-Stäuben anzunehmen.

Der sehr hoch gelegene Brennstoffeinwurf erhöht das Grobstaubpotential, speziell bei großen Primärluftströmen, enorm. Bei Brennstoffen mit großem Feinanteil konnten vermehrt glühende Flugaschepartikel zum Zeitpunkt des Brennstoffeinschubes durch ein Schauglas nach der Sekundärverbrennungszone erkannt werden. Diese Tatsache bestätigt die negative Auswirkung eines zu hoch positionierten Hackguteinwurfes.

Mit Einführung eines symmetrischen Ascheabzuges wie z.B. eines Drehkegelrostes und dem Aufschub des Brennstoffes direkt auf das Brennstoffbett können die Staubemissionen noch weiter abgesenkt werden.

Die Sekundärluftflamme brennt gegen die Erwartungen auch bei sehr kleinen Produktgaseintrittstemperaturen sehr stabil, allerdings muss auch das Wiederzünden einer ausgegangenen Flamme infolge eines Not-Stoppes bzw. eines Stromausfalles ohne zusätzlichen Gasbrenner möglich sein. Dies könnte mit einem Glühelement, eines glühenden Sekundärverbrennungssteines oder eventuell einer im Bypass geführten Zündflamme realisiert werden.

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Unimodale Größenverteilung von PM_1 unter Einfluss des Gesamtluftverhältnisses [3].....	12
Abbildung 2: Reaktion und Zwischenprodukte bei der Biomasseverbrennung [5].....	13
Abbildung 3: Gewichtsverlust von trockenem Buchenholz unter Temperatureinwirkung [5]..	15
Abbildung 4: Zusammenfassende Darstellung der Entstehungspfade von Partikeln im Rauchgas von Biomassefeuerungen [7]	17
Abbildung 5: CO_2 und CO Verlauf einer handbeschickten Naturzugfeuerung [5]	18
Abbildung 6: CO_2 und CO Verlauf einer automatisch beschickten Gebläsefeuerung [5]	19
Abbildung 7: Abscheidegrad von Partikeln bei Nasenatmung (links) und bei Mundatmung (rechts) [1, 11]	24
Abbildung 8: Nationale Ziele des Anteils an erneuerbaren Energieträgern bis 2020 [13]	27
Abbildung 9: Einkammer-Zellradschleuse der Firma ETA [19].....	31
Abbildung 10: Kesselschnitt von Fröling T4 [21]	34
Abbildung 11: Kesselschnitt vom HDG Bavaria Compact 50 [22]	35
Abbildung 12: Guntamatic Powerchip 40/50 - links Kesselschnitt; rechts Stufenrost samt Hackguteintragsbereich [23]	36
Abbildung 13: Kesselschnitt Gilles HPK-RA 15-160 [24].....	37
Abbildung 14: Kesselschnitt Heizomat HSK-RA [25]	38
Abbildung 15: Kesselschnitt KWB Multifire [27]	39
Abbildung 16: Solarfocus Therminator 2 [28].....	40
Abbildung 17: Vergasungsverfahren im Festbett [30]	45
Abbildung 18: Prinzipskizzen möglicher Versuchsstandaufbauten.....	47
Abbildung 19: rechts: Wanderrost, links Walzenrost.....	48
Abbildung 20: Schnitt Multifire II – 35-50kW	50
Abbildung 21: Überblick des Versuchsstandes	51
Abbildung 22: Hackgutbehälter.....	53
Abbildung 23: Einkammerzellradschleuse mit anschließender Stokerschnecke	54
Abbildung 24: Überblick des Vergasungsbereiches.....	55
Abbildung 25: Detailansicht des Vergaserschachtes	56
Abbildung 26: Aufheiz-Diagramm des Zündelementes	57
Abbildung 27: Drehflügelgeber [36]	58
Abbildung 28: Wanderrost	59
Abbildung 29: Wanderrostelemente in Schrägansicht [37].....	60
Abbildung 30: Schnittdarstellung dreier Rostelemente [37].....	61
Abbildung 31: Rostkasten Draufsicht.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 32: Sekundärverbrennungszone	65
Abbildung 33: Rohrbündelwärmetauscher des MF 2 [37]	67
Abbildung 34: Softwareumgebung AutomationX.....	71
Abbildung 35: Rissbildung der Schachtwand.....	72
Abbildung 36: Vergaserstein von oben (links), unten (rechts)	73
Abbildung 37: Unterer Heizwert über den Wassergehalt für Nadel- und Laubholz [5].....	75
Abbildung 38: Ansicht des Excel-Berechnungstools	77
Abbildung 39: Flammenfront bei großem Primärverbrennungsverhältnis.....	78
Abbildung 40: Primärluftmassenstrom und Schachttemperaturen im Startzyklus.....	79
Abbildung 41: Übergang vom Rostbetrieb in die Vergasung.....	81
Abbildung 42: Messaufbau nach VDI 2066 [39].....	82
Abbildung 43: Messstelle (links), Blick entlang der Absaugsonde (rechts) [39].....	83
Abbildung 44: Aufbau der Absaugsonde	84
Abbildung 45: Gasmessschrank	84
Abbildung 46: Filterhülse mit Filtergewebe (links), Laborflasche (rechts).....	86
Abbildung 47: Abgasanalysegerät von MRU [40].....	86
Abbildung 48: Qualitätshackgut vom 15.10.2013.....	88
Abbildung 49: Temperaturverlauf der Startphase am 15.10.....	89
Abbildung 50: Temperaturverlauf während der Staubmessungen	90
Abbildung 51: Standard Hackgut vom 24.10 und 30.10.2013	93
Abbildung 52: Temperaturverlauf während der Staubmessungen	94
Abbildung 53: Foto der Laborflaschen und zugehörigen Filterhülsen.....	96
Abbildung 54: Temperaturverlauf während der ersten drei Messungen	98
Abbildung 55: Foto der Laborflaschen und zugehörigen Filterhülsen.....	100
Abbildung 56: Temperaturverlauf während der zweiten drei Messungen	101
Abbildung 57: Foto der Laborflaschen und zugehörigen Filterhülsen.....	103
Abbildung 58: Detailansicht des Vergaserschachtes	104
Abbildung 59: Blick von oben auf das Brennstoffbett im erkalteten Zustand	105
Abbildung 60: Belag aus Kohlenstoffpartikel (links), Pyrolysekoks (rechts).....	106
Abbildung 61: Zusammenfassung der Staubmesswerte über das Primärluftverhältnis	107

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Art der Wasserbindung [5]	14
Tabelle 2: Schmelz-,Siede- und Zersetzungstemperaturen von ausgewählten Kaliumverbindungen [7]	20
Tabelle 3: Schmelz-,Siedetemperaturen von ausgewählten Calciumverbindungen [7]	21
Tabelle 4: Luftqualitätsrichtlinie der EU [13].....	28
Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte für die Verfeuerung von holzartigen Brennstoffen nach der FAV [16]	28
Tabelle 6: Auszug der Emissionsgrenzwerte aus dem 1. BImSchV für holzartige Brennstoffe [17]	29
Tabelle 7: Vergleich bestehender Hackgutfeuerungen inkl. Typenprüfwerten der Rauchgasemissionen [18].....	43
Tabelle 8: Elementare Hackgutzusammensetzung [5]	76
Tabelle 9: Technische Daten des MRU Vario plus industrial [40].....	87
Tabelle 10: Zusammenfassung der Messergebnisse vom 15.10	92
Tabelle 11: Zusammenfassung der Messergebnisse vom 24.10	95
Tabelle 12: Zusammenfassung der ersten Messreihe vom 30.10	99
Tabelle 13: Zusammenfassung der zweiten Messreihe vom 30.10.....	102

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] T. Nussbaumer und P. Hasler, „Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen,“ *Holz als Roh- und Werkstoff*, Nr. 57, pp. 13-20, 1999.
- [2] T. Nussbaumer, „Relevance of aerosols for the air quality in Swizerland,“ in *Aerosols from biomass combustion*, Zürich, 2001.
- [3] M. Oser, T. Nussbaumer, P. Müller, M. Mohr und R. Figi, „Influences on aerosol formation in automatic wood furnaces,“ in *Aerosols from biomass combustion*, Zürich, 2001.
- [4] C. Hochenauer, Skriptum für Wärmetechnik 2, Graz, 2012.
- [5] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Energie aus Biomasse, Bd. 2, Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [6] L. S. Johansson, C. Tullin, B. Leckner und P. Sjövall, „Particle emissions from biomass combustion in small combustors,“ *Biomass and Bioenergy*, Nr. 25, pp. 435-446, 2003.
- [7] M. Oser, T. Nussbaumer, P. Müller, M. Mohr und R. Figi, „Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen,“ Bundesamt für Energie, Bern, 2003.
- [8] T. Brunner, I. Obernberger, M. Jöller, A. Arich und P. Pölt, „Behaviour of ash forming compounds in biomass furnaces - measurement and analyses of aerosol formed during fixed-bed biomass combustion,“ in *Aerosols from biomass combustion*, Zürich, 2001.
- [9] I. Obernberger, T. Brunner und M. Jöller, „Characterisation and formation of aerosols an fly-ashes from fixed-bed biomass combustion,“ in *Aerosols from biomass combustion*, Zürich, 2001.
- [10] I. M. Kennedy, „The health effects of combustion-generated aerosols,“ *Proceedings of the Combustion Institute*, Nr. 31, pp. 2757-2770, 2007.
- [11] J. Heyder, J. Gebhart, G. Rudolf, C. F. Schiller und W. Stahlhofen, „Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005-15µm,“ *Journal of Aerosol Science*, Bd. 17, Nr. 5, pp. 811-825, 21 12 1986.
- [12] F. Ellner-Schuberth, H. Hartmann, P. Turowski und P. Roßmann, „Partikelemissionen aus Kleinf Feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen,“ Technologie und Förderzentrum, Straubing, 2010.
- [13] J. Villeneuve, J. H. Palacios, P. Savoie und S. Godbout, „A critical review of emission standars and regulations regarding biomass combustion in small scale units,“ *Biorexource Technology*, Nr. 111, pp. 1-11, 2012.
- [14] Bundeskanzleramt Österreich, „Bundeskanzleramt,“ Bundeskanzleramt , 2004. [Online]. Available: <http://www.bka.gv.at/site/4890/default.aspx>. [Zugriff am 19 11 2013].

- [15] Statistik Austria, 19 7 2013. [Online]. Available: http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/. [Zugriff am 19 11 2013].
- [16] Bundesrepublik Österreich, *Feuerungsanlagen Verordnung FAV*, 2013.
- [17] Bundesrepublik Deutschland und Bundesministeriums der Justiz, *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes*, 2010.
- [18] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Abteilung Öffentlichkeitsarbeit, „Hackschnitzelheizungen Marktübersicht,“ Gülzow-Prüzen, 2012.
- [19] ETA Heiztechnik GmbH, 05 02 2013. [Online]. Available: http://www.eta.co.at/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=uploads/media/HACK20-200_Prospekt_DE_01.pdf&t=1383842164&hash=f21e554d377edcf585944480b16529e8. [Zugriff am 06 02 2013].
- [20] B. Golubovic, Interviewee, *Funktionsweise einer Lambdasonde*. [Interview]. 25 08 2013.
- [21] Fröhling GmbH, 18 11 2011. [Online]. Available: http://www.froeling.com/images/stories/pdf/prospekte/de/p0530313_prospekt%20t4_rev04_mail.pdf. [Zugriff am 06 02 2013].
- [22] HDG Bavaria GmbH, 31 10 2010. [Online]. Available: <http://www.hdg-bavaria.com/inc/file.inc.php?id=39>. [Zugriff am 13 02 2013].
- [23] Guntamatic Heiztechnik GmbH, 18 06 2012. [Online]. Available: http://www.guntamatic.com/uploads/tx_sbdownloader/Folder_POWERCHIP.pdf. [Zugriff am 06 02 2013].
- [24] Gilles GmbH & Co KG, 22 09 2009. [Online]. Available: http://www.gilles.at/images/pdf/GILLES_Hackgutkessel_Prospekt_2013_72.pdf. [Zugriff am 06 02 2013].
- [25] Heizomat GmbH, 19 02 2010. [Online]. Available: http://www.heizomat.at/pdf/hsk_DE.pdf. [Zugriff am 07 02 2013].
- [26] G. Hofmeister, Interviewee, *Eigenschaften der bestehenden Unterschubfeuerung bei KWB*. [Interview]. 3 2013.
- [27] KWB GmbH, 12 11 2012. [Online]. Available: http://www.kwb.at/fileadmin/media/Österreich/Downloads/Technik_Planung/TP_Multifire_2013_Low.pdf. [Zugriff am 07 02 2013].
- [28] Solarfocus GmbH, 19 12 2012. [Online]. Available: <http://www.solarfocus.at/assets/Uploads/Therminator-IIHackgut08-2013ANSICHT.pdf>. [Zugriff am 06 02 2013].
- [29] G. Hofmeister, Interviewee, *Ablauf einer Typenprüfung und kurzfristige Einflussgrößen*

- auf die Gesamtstaubemissionen.* [Interview]. 07 2013.
- [30] F. Lettner, P. Haselbacher und H. Timmerer, „Festbett Vergasung - Stand der Technik im Überblick,“ in *Thermo-chemische Biomassevergasung für eine effiziente Strom-/Kraftstoffbereitstellung*, Leipzig, 2007.
- [31] H. Timmerer, Interviewee, *Rostbelastung bei Gleichstromvergasungsanlagen.* [Interview]. 03 2013.
- [32] H. J. Brandt, „Feuerung für die Verbrennung von Feststoffen“. Europa Patent EP2397756A2, 21 12 2011.
- [33] C. Hochenauer, H. Timmerer, P. Haslbacher, A. Weissinger, G. Hofmeister und A. Zöchbauer, „Workshop zur Entwicklung eines Laborreaktors für die Reduktion des Partikelgehaltes im Rauchgas,“ 22 03 2013.
- [34] Dassault Systems, „Solidworks,“ Waltham, 2012.
- [35] AutomationX GmbH, „AutomationX,“ Grambach, 2009.
- [36] Cleanstgas GmbH, *Schnittzeichnung eines Drehflügelgebers*, St. Margarethen a. d. Raab, 2013.
- [37] KWB GmbH, *CAD-Modelle aus bestehender Konstruktion des Multifire 2*, St. Margarethen a.d. Raab, 2013.
- [38] H. Eichelseder, in *Thermodynamik*, Graz, TU-Graz, 2008, pp. 169-170.
- [39] Verein deutscher Ingenieure, „VDI 2066,“ Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 2006.
- [40] MRU - Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH, [Online]. Available: http://www.mru.at/industrielle-abgasanalyse/27-mru-vario-plus-industrial#magictabs_TPOnt_3. [Zugriff am 04 11 2013].
- [41] A. Williams, J. M. Jones, L. Ma und M. Pourkashanian, „Pollutants from the combustion of solid biomass fuel,“ *Progress in Energy an Combustion Science*, Nr. 38, pp. 113-137, 2012.
- [42] T. Launhardt, R. Hurm, V. Schmid und H. Link, „Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen,“ Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, 1998.
- [43] H. Landolt, R. Börnstein, W. Martienssen und K. H. Hellwege, „Numerical data an functional relationships in science an technology,“ Springer-Verlag, Berlin, 1961.
- [44] R. Warnecke, „Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier,“ *Biomass and Bioenergy*, Nr. 18, pp. 489-497, 2000.