



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Schlussbericht: 30. Mai 2015

**Optimierter emissionsarmer Retrofit-Holzgas-Brenner (20 kW) mit
grossem Regelbereich**

--- Untersuchung Holzgasbrenner und Status (Phase I) ---

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Eigenleistungen FHNW
Liebi LNC AG, CH-3753 Oey-Diemtigen
Klimastiftung
BAFU - UTF

Auftragnehmer:

Fachhochschule Nordwestschweiz
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Klosterzelgstrasse 2
CH-5210 Windisch
www.fhnw.ch

Industriepartner:

Liebi LNC AG
Burgholz 18
CH-3753 Oey-Diemtigen
<http://www.liebilnc.ch>

Autoren:

Josef Wüest, FHNW, josef.wueest@fhnw.ch
Timothy Griffin, FHNW
Dieter Winkler, FHNW
Stefan Mathys, FHNW
Marc Keusch, FHNW
Meike Liebau, FHNW
Thomas Schaber, FHNW
Jan-Marc Kaiser, FHNW

BFE-Bereichsleiter: Sandra Hermle
BFE-Programmleiter: Sandra Hermle
BFE-Vertragsnummer: SI/500933-01
BFE TP-Nummer.: 810000980
BFE Bestellnummer: 8100070

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	3
2	Abstract	4
3	Symbolverzeichnis.....	6
4	Einleitung.....	7
4.1	Nutzung der Biomasse in der Schweiz	7
4.2	Zielsetzungen.....	8
4.3	Lösungsweg.....	8
4.4	Arbeitspakete	9
5	Prüfstand	11
5.1	Holzgasbrenner von Pyro-Man	11
5.2	Dimensionierung Prüfstand	13
5.3	Aufbau Prüfstand und Instrumentierung	17
6	Eigenschaften, Funktionsweise und Emissionen	18
6.1	Brennstoff-Parameter	18
6.2	Verbrennungsluft-Parameter	20
6.3	CO-Emissionen.....	21
6.4	NOx-Emissionen	23
6.5	Emissionen der unverbrannten Kohlenwasserstoffe	25
6.6	Holzgasanalyse-System	26
6.7	Aufbau beheizte Gasentnahmen-Sonde.....	27
6.8	Energetische Effizienz.....	28
6.9	Untersuchungen am Rost.....	28
6.10	Asche-Analyse	29
6.11	Untersuchungen Oberflächentemperaturen.....	32
6.12	Kennfeld.....	33
6.13	Start-und Ausbrandphase	34
6.14	Optimierung der Betriebsphasen (Standard-Holzpellets)	36
7	Theoretische Analysen	37
7.1	Vergaser-Modell.....	37
7.2	Analyse des Holzgases	43
7.3	Luftstrahlpumpe	46
7.4	Pyro-Man Strömung	47
8	Funktions-Analyse	48
8.1	CAD und CFD	48
8.2	Systemanalyse.....	48
8.3	Schwachstellen	51
8.4	Sicherheitsanforderungen	52
8.5	Ausblick offener Punkte.....	54
9	Marktanalyse	55
9.1	Marktanalyse & Strategie	55
9.2	Schlussfolgerung Firma Liebi LNC	56
10	Schlussfolgerung Phase I	57
10.1	Ergebnisse Meilenstein 1	57
10.2	Ergebnisse Meilenstein 2	58
11	Projektstand und Ausblick	59
12	Literaturverzeichnis	60
13	Verzeichnisse	60
13.1	Tabellenverzeichnis.....	60
13.2	Abbildungerverzeichnis.....	60

2 Abstract

Die gestufte Verbrennung ist auch bei Biomassefeuerungen eine bewährte Methode, um Emissionen, insbesondere Staub-, CO- und OGC-Emissionen (alle unverbrannten Kohlenwasserstoffe) zu reduzieren. In der konsequentesten Art ist diese Technik für Pellets aus unserer Sicht in einem Prototyp der Fa. Pyro-Man, ein Spinoff der University of Eastern Finnland, umgesetzt worden [1]. Anhand dieses Gerätes soll die Technik erforscht und verstanden werden und damit Pellet-Brenner- und Kesselherstellern in der Schweiz zur eigenen Nutzung zugänglich gemacht werden.

Dazu wurde das Projekt "Holzgasbrenner" (HGB) gestartet, welches in die drei Phasen *Grundlagen*, *Optimierung* und *Industrialisierung* unterteilt ist.

Schwerpunkte der hier dokumentierten Projektphase I lagen:

- a) im Bau einer Versuchsanlage für den Pyro-Man-Brenner,
- b) in der qualitativen und quantitativen Bestimmung der Eigenschaften und Emissionen,
- c) in der detaillierten Analyse des Vergasungsprozesses und des Holzgases und
- d) in der Funktions-Analyse der einzelnen Bestandteile der Systems.

Parallel dazu wurde eine Marktanalyse durchgeführt, um die Kundenbedürfnisse für ein solches System sowie sein Marktpotential abzuklären.

Projektübersicht Holzgasbrenner- Übersicht Projekt Status					2013				2014			
Phase	WP	Arbeitspaket	Titel	Status	1. Projektjahr				2. Projektjahr			
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Phase I	1.1	Projektleitung und Informationsaustausch	Projektleitung und Steuerung	wird bearbeitet								
	1.2		Informationsaustausch	wird bearbeitet								
	1.3		Vorbereitung für Projektphase II	erledigt								
	2.1	Aufbau Prüfstand	Konstruktion und Aufbau Prüfstand	erledigt								
	2.2		Inbetriebnahme	erledigt								
	2.3		Instrumentierung und Messdatenerfassung	erledigt								
	3.1	Untersuchung HGB Status	Analyse Brenneraufbau und Funktionsweise	erledigt								
	3.2		Ermitteln der Emissionen	erledigt								
	3.3		Analyse Syngas	erledigt								
	3.4		Analyse Ascherückstände	erledigt								
	3.5		Energetische Effizienz	schieben in Phase 2								
	Meilenstein 1		Status Prüfstand aufgenommen	erledigt								
	4.1	Theoretische Analyse I	Optimierung Vergasungsprozess	teilw. erledigt								
	4.2		Optimierung Luftführung, Durchmischung	teilw. erledigt								
	5.1	Optimierung Prüfstand I	Anpassung Variierbarkeit Versuchsbrenner	erledigt								
	5.2		Syngas bei Luftvariation	schieben in Phase 2								
	5.3		Optimierung Betriebsphase	teilw. erledigt								
	6.1	Marktforschung	Marktforschung	erledigt								
	Meilenstein 2		Stand erster Betriebsoptimierungen	erledigt								

Abbildung 1 Übersicht aller Arbeitspakte der Phase I

Der Prüfstand im Verbrennungslabor des Instituts für Biomasse und Ressourceneffizienz (IBRE) ermöglicht es, den HGB durch Beobachtungen und Messungen im Vergaserraum und im Feuerraum (Flamme) sowie mit systematischen Emissionsmessungen zu untersuchen. Neben der Abgasanalyse wurden auch Temperaturen an verschiedenen prozessrelevanten Stellen gemessen, um die Vergasung und Verbrennung zu analysieren und die Brennerleistung zu bestimmen. Die ersten Versuche ergaben im stationären Betrieb sehr tiefe Messwerte für die Staub- und Abgasemissionen, die dank optimalem Feuerraum deutlich unterhalb der Hersteller-

angaben lagen: Bei 15 kW thermischer Leistung wurden ca. 4.4 mg CO /m³, 125 mg NO_X /m³ und 1.6 mg Staub /m³ gemessen (alle Angaben bei Normbedingungen, trocken, 13 Vol% O₂).

In umfangreichen Messreihen wurden die verschiedenen Brennerparameter variiert und somit ihr Einfluss und ihre Grenzen ermittelt.

Alle Bauteile des Brenners (Aschebehälter, Rüttelrost, Vergaser-Topf, Gebläse-Drehzahl, Sekundärluft-Eindüsung, Brenner und Kaminsystem) wurden einer System- und Funktions-Analyse unterzogen. Die wesentlichen Funktionen und Eigenschaften sind bekannt. Wichtige Parameter wie die Brennstoffzufuhr, der Zyklus des Rüttelrostes oder die Überwachungsfunktion des Flammen-Sensors sind bestimmt und teilweise in ihrem Einfluss ausgemessen. Die bei den Versuchen beobachteten Schwachstellen wurden analysiert, um eine optimale Auslegung und ein funktionales Design des Systems zu ermöglichen. Zudem wurde eine Systemanalyse angefertigt, in der alle Funktionen, Stärken, Schwächen und Abhängigkeiten der einzelnen Bauteile analysiert wurden. Dies bildet im weiteren Verlauf die Grundlage für die Bewertung und die designmässige Überarbeitungen der einzelnen Bauteile in Phase II.

Auf Wunsch der Stakeholder wurde die Marktanalyse als Bestandteil der Kommerzialisierung vorgezogen. Darin wurde das Marktpotential für Pelletbrenner bis 20 kW untersucht, sowie jenes für Pelletbrenner und Kessel von 20 bis 50 kW abgeklärt. Wegen der grossen Konkurrenz der Wärmepumpe im kleinen Leistungsbereich wird der Entwicklungsschwerpunkt auf einen Brenner im Bereich 20 – 50 kW ausgedehnt. Trotzdem sind in ländlichen und alpinen Gegenenden die Chancen für eine Lösung im kleinen Leistungsbereich intakt und sollen angegangen werden.

Damit wird es möglich, Biomasse zu Heizzwecken in immissionsbefrachteten (urbanen) Gebieten und bei Inversionslagen einzusetzen, auch wenn die Grenzwerte massiv gesenkt werden.

In der folgenden Projekt-Phase II sollen die Emissionen und die Brennerleistung des HGB optimiert und der Einfluss vom Wassergehalt und des Ascheanteils im Brennstoff untersucht werden. Im weiteren sollen die Emissionen der Start- und Stopp-Phasen reduziert und gemeinsam mit dem Industriepartner ein neuer Prototyp für 20 – 50 kW entworfen und konstruiert werden.

3 Symbolverzeichnis

arabisch	Einheit	Erklärung
CH_4	[–]	Methan
CO	[–]	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	[–]	Kohlenstoffdioxid
HGB		Holzgasbrenner
OGC	[–]	Organic gaseous carbon: Summe der Emissionen von organisch gebundenem Kohlenstoff, berechnet und angegeben als elementarer Kohlenstoff
F_R	[–]	Förderfaktor
F_D	[s]	Förderdauer
F_P	[s]	Förderpause
VD	[%]	Gebläse-Leistung in %
$H_{u,Pellets}$	[MJ/kg]	Heizwert Pellets
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
NO_x	[–]	Stickoxid Sammelbegriff
O_2	[–]	Sauerstoff
$P_{Vergaser}$	[W]	Leistung des Vergasers
L_{Prim}	[m^3]	Luftbedarf Primärluft
L_{Sek}	[m^3]	Luftbedarf Sekundärluft
P_{HGB}	[W]	Leistung HGB
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
t	[s]	Zeit
T	[K]	Temperatur
T_B	[K]	Brennkammer Temperatur
T_N	[K]	Normtemperatur
V	[m^3]	Brennkammervolumen
V_B	[m^3]	Benötigtes Volumen für Reaktion in Brennkammer
\dot{V}_{gas}	[m^3/s]	Abgasvolumenstrom
V_{tr}	[m^3/kg]	Trockenes Abgasvolumen bei Normtemperatur
$V_{tr,TB}$	[m^3/kg]	Trockenes Abgasvolumen bei Brennkammertemperatur
MRU	[–]	Mobiles Abgasmessgerät der Fa. MRU. Misst die Gaszusammensetzung
FID	[–]	Flammenionisationsdetektor. Misst unverbrannte organische Verbindungen
MS	[–]	Massenspektrometer. Misst die Masse von Atomen und Molekülen

4 Einleitung

4.1 Nutzung der Biomasse in der Schweiz

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 soll der Verbrauch von fossilen Energieträgern massiv reduziert werden, wobei der Energieverbrauch bis 2035 gegenüber dem Jahr 2000 um 43 % gesenkt werden soll. Da heute noch 38 % (2013) [2] des in der Schweiz verbrauchten Erdöls für Heizzwecke verwendet werden, ist die Substitution der Ölheizung durch eine saubere Biomasse-Heizung ein taugliches Mittel, um einen Beitrag zu leisten, dieses Ziel zu erreichen.

Biomasse aus Holz hat heute bei den Energieträgern für Gebäude-Heizungen einen Anteil von 12%. Dieser könnte aber massiv höher sein, da im Moment nur etwa die Hälfte des potentiell energetisch nutzbaren Holzes auch genutzt wird. Somit könnte man heute nur ein Teil der fossilen Brennstoffe durch regenerative Biomasse ersetzen. Da der Energiebedarf für Gebäude-Heizungen wegen der fortschreitenden Gebäudesanierung tendenziell sinkend ist, kann Heizöl langfristig sogar vollständig durch Biomassefeuerungen ersetzt werden.

Der Vorteil der direkten thermischen Umsetzung ist die Einfachheit der Lösung bei geringem Bedarf an Hilfsenergie und niedrigen Infrastrukturkosten. Somit senkt es die Brennstoffkosten (siehe Abbildung 2), den CO₂-Ausstoss und die Abhängigkeit bei der Energieversorgung und schafft lokale Wertschöpfung. Die praktische Form von Pellets bietet ähnliche Vorteile wie bei einer Ölheizung. Der Einbruch des Heizölpreises 2014 begünstigt diese Alternative aus ökonomischen Gründen im Moment jedoch nicht.

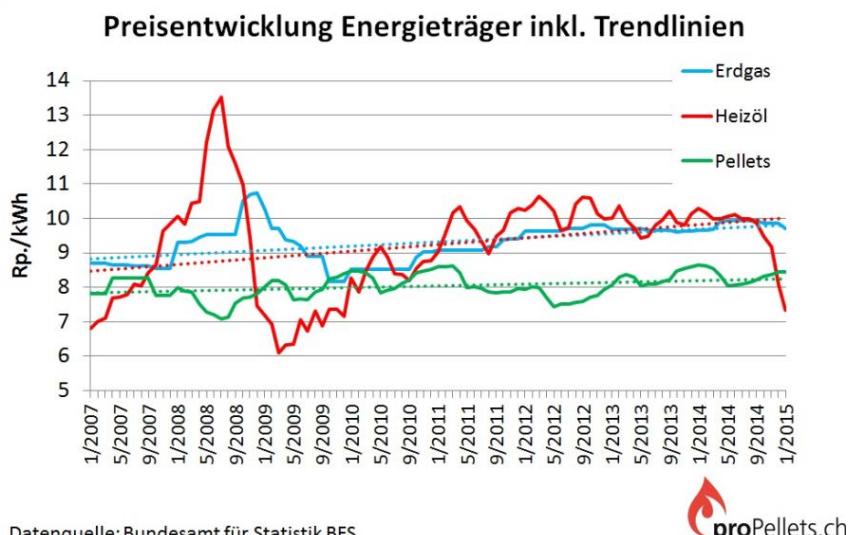


Abbildung 2 Preisentwicklung Energieträger [3]

Die Ziele im vorliegenden Projekt bestehen hauptsächlich in der Reduktion der Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Holz. Dies wird durch die Kombination aus Vergasung und gestufter Luftführung mit einer Vergasungsstufe erreicht. Das Vorhaben entspricht den Zielen des BFE Forschungskonzepts 2013 – 2016 für Biomasse und Holzenergie. Im thematischen Pfeiler a) "Wohnen und Arbeiten der Zukunft" sind konkret neue Konzepte von Feuerung und Regelung hervorgehoben. Des Weiteren steht unter c) "Energiesysteme der Zukunft" die Substitution fossiler Energieträger im Vordergrund. Dies soll durch die Entwicklung eines Retrofit-Brenners erreicht werden. Damit werden die durch Nussbaumer [10] beschriebenen „low hanging fruits“ dem Holzfeuerungsmarkt zugänglich gemacht.

4.2 Zielsetzungen

Im Projektantrag sind folgende Ziele formuliert:

Als Ergebnis der Gesamtentwicklung steht ein mit Pellets betriebener, optimierter Holzgasbrenner (HGB) mit einer thermischen Leistung modulierbar von 5 bis 20 kW zur Verfügung.

Folgende ambitionierte Emissionswerte sollen ohne Partikelabscheider erreicht werden:

mg/Nm³ (bezogen auf 13 % O₂)	über alle Betriebsphasen (von Zündung bis Abschalten)	In der stabilen Betriebsphase
CO-Emissionen	< 50 mg/Nm ³ (≈ 40 ppm)	< 20 mg/Nm ³ (≈ 16 ppm)
Staubemissionen (PM)	< 5 mg/Nm ³	< 5 mg/Nm ³
OGC-Emissionen	< 10 mg/Nm ³ (≈ 19 ppm)	kondensierend < 2 mg/Nm ³

Tabelle 1 Projekt-Ziele bezüglich Emissionen

Durch die deutliche Reduktion der Schadstoffe kann Biomasse zu Heizzwecken in kleinen Anlagen unbedenklich auch in immissionsbelasteten (urbanen) Gebieten und bei Inversionslagen eingesetzt werden. Hier wird teilweise der Betrieb von Holzfeuerungen verboten. Zudem wird der energetisch sinnvolle Einsatz in Kombination mit Kondensationskesseln angestrebt, woraus nicht nur bessere Wirkungsgrade resultieren, sondern auch der Einsatz von günstigeren Abgaskaminanlagen möglich ist, welche bei Öl- und Gasbrennwertkesseln bereits etabliert sind.

Der neu entwickelte HGB soll konform zur Europäischen Norm EN 15270 "Pelletbrenner für kleine Heizkessel" sein. Da die Norm allerdings nur für konventionelle Pelletbrenner entworfen wurde, muss geprüft werden, welche Inhalte der Norm auf den hier entwickelten, mit Pellets betriebenen HGB angewendet werden können. Ein Antrag zur Erweiterung der Norm auf Anlagen des hier behandelten Typs ist gegebenenfalls denkbar.

Die Einheit soll als Ergebnis weitere Vorteile aufweisen:

- Thermische Leistung, modulierbar von 5 bis 20 kW, geeignet für Ein- und Zweifamilienhäuser (bzw. 20 - 50 kW für kleine Gewerbeeinheiten und Mehrfamilienhäuser). Diese Leistungsmodulation von 25 - 100 % macht einen kostenintensiven Puffer-speicher überflüssig. Überdies ermöglicht sie längere Laufzeiten, wodurch die Anzahl "schmutziger" Start- und Stopp-Phasen reduziert werden kann. Daraus resultieren tiefe durchschnittliche Emissionswerte.
- Automatischer Betrieb (von Zünden über Leistungs- und Verbrennungsregelung bis zum Brennerstopp und Ascheaustrag), der Bedienungsfehler verhindert und niedrige durchschnittliche Emissionen gewährleistet.
- Durch den Retrofit-Einsatz des HGB als Ersatz für einen Ölbrenner könnten pro Jahr und Anlage rund 2000 l (fossiles) Öl durch CO₂-neutralen und in der Schweiz nachwachsenden Biomasse-Brennstoff substituiert werden. Um dies zu realisieren, muss das neue System die vorgenannten Vorteile besitzen und somit einer Ölheizung ähnlich sein.

4.3 Lösungsweg

Forschungsarbeiten im Bereich Verbrennungsoptimierung für Ölbrenner und Gasturbinen haben gezeigt, dass eine emissionsarme Verbrennung im Wesentlichen davon abhängt, ob der Brennstoff optimal mit der Verbrennungsluft durchmischt wird. Dies ist nur möglich, wenn der Brennstoff in gasförmiger Form vorliegt, respektive zuerst in den gasförmigen Zustand gebracht

wird. Im vorliegenden Projekt erfolgt dies durch vorgängige Vergasung von Holzpellets und anschliessende schadstoffarme, aerodynamisch stabilisierte Gasphasen-Verbrennung des erzeugten Holzgases (Syngas) bei optimalem Luftüberschuss.

Durch Recherchen und regelmässigen Teilnahmen an nationalen und internationalen Fachmessen wurde der Pelletbrenner der finnischen Firma Pyro-Man Oy (vgl. <http://www.pyro-man.net/> und [1]) gefunden, welcher nach dem Vergaserprinzip arbeitet und sich eignet, das Potential der Emissionsminderung für Biomasse-Kleinfelderungen zu untersuchen.

Der schematische Aufbau der Vergaseranlage mit Kessel ist in Abbildung 3 dargestellt:

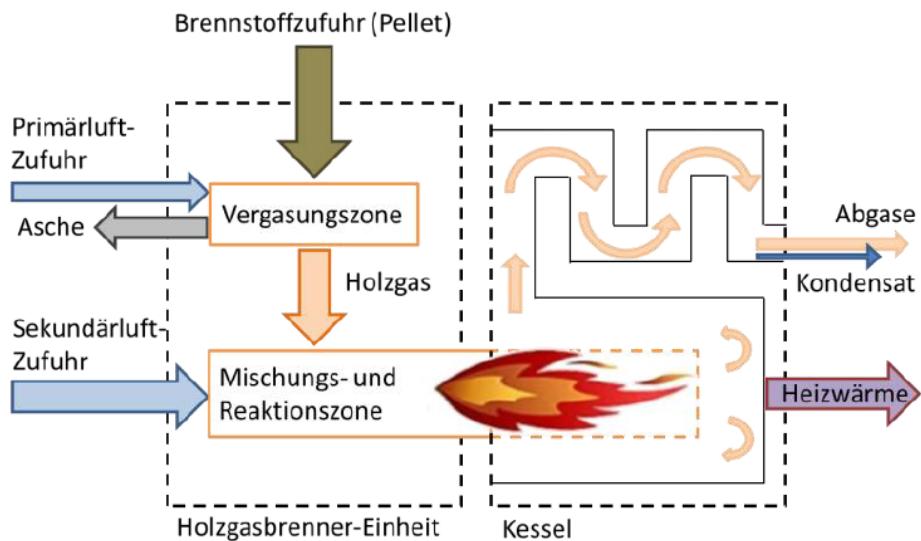


Abbildung 3 Schematischer Aufbau des HGB mit Kessel

4.4 Arbeitspakete

Das Projekt "Holzgasbrenner" wurde in mehrere Projektphasen und Arbeitspakete unterteilt. Dieser BFE-Schlussbericht umfasst die Projektphase I mit den Arbeitspaketen 2 bis 6 und schliesst mit Erreichen des Meilensteins 2 ab. Eine Übersicht der einzelnen Arbeitspakete der Projektphase I zeigt Abbildung 1, im Detail sind sie in der folgenden Tabelle 2 beschrieben.

2.1	<u>Konstruktion und Aufbau Prüfstand:</u> Der von Pyro-Man erworbene Brenner wird im Prüfstand im Verbrennungslabor am IBRE eingebaut. Die Brennkammer hat optische Zugänge, einen Kessel, Kühlkreislauf, Kaminanschluss und Pellet-Behälter.
2.2	<u>Inbetriebnahme:</u> Der Holzgasbrenner wird mit der finnischen Firma in Betrieb genommen.
2.3	<u>Instrumentierung und Messdatenerfassung:</u> Temperatur Vergasung und Verbrennung, Waage Pellet-Behälter, Abgasanalysegeräte, Volumenstrom Primär-, Sekundärluft + Abgas, Regelung Kühlkreislauf, Messdatenerfassung
3.1	<u>Analyse Brenneraufbau und Funktionsweise:</u> Der HGB ist konstruktiv analysiert, seine Abmessungen und Dimensionen sind für rechnerunterstützte Strömungssimulationen (CFD) erfasst. Die Funktionsweise und Einflussparameter der einzelnen Bauteile sind verstanden. Potentielle Schwachstellen sind eruiert.

3.2	<u>Ermitteln der Emissionen:</u> Alle relevanten Emissionen (CO, OGC, Staub-Partikel, NOx, etc.) sind bei drei Leistungspunkten (5 kW, 10 kW, 15 kW) bei definiertem Betriebszyklus (von Start bis Stop) erfasst. Brennstoff: Pellets. Ab Werk eingestellter Luftüberschuss (Luftzahl λ) und Temperaturverlauf in der Vergasungszone und im Brennraum sind ermittelt.
3.3	<u>Analyse Holzgas:</u> Für den Brennstoff (Pellets) wird die Zusammensetzung und Temperatur des erzeugten Holzgases in Funktion der Brennerleistung (5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW) analysiert. Dazu wird eine geeignete, beheizte Gasentnahmesonde gebaut und eingesetzt.
3.4	<u>Analyse Ascherückstände:</u> Die Zusammensetzung der Asche zur Beurteilung der Pellet-Verbrennung ist untersucht. Der Anteil an nicht oxidiertem Kohlenstoff ist bestimmt. Die Frage, ob der Ascheschmelzpunkt im Betrieb erreicht wird, ist beantwortet. Das Temperaturniveau im Reaktor ist gemessen.
3.5	<u>Energetische Effizienz:</u> Die Effizienz des Brenners ist beurteilt, die energetischen Schwachstellen sind analysiert und werden in den nachfolgenden Schritten (AP 5) optimiert. → konnte noch nicht realisiert werden, da auf Grund der aktuellen Konstruktion des finnischen Prototyps und seiner mangelhaften thermischen Isolation und auf Grund unseres Prüfstandaufbaus mit grossen Beobachtungsmöglichkeiten eine Bestimmung des direkten Wirkungsgrades nicht sinnvoll ist. Dieser wird bestimmt, sobald der neue Prototyp an einem entsprechenden Heizkessel eingebaut ist.
Meilenstein 1	<ul style="list-style-type: none"> Der Verlauf der Emissionen über die Betriebsphasen Start, Stationärer Betrieb und Stop sind in Abhängigkeit verschiedener Parameter ermittelt. Die Durchschnittswerte über die gesamte Betriebsphase sind bekannt (Betrieb mit Pellets). Die Optimierungsmöglichkeiten für den Vergasungsprozess sind zusammengestellt. Der Versuchsbrenner ist für weitere Versuchszwecke mit Sensorik ausgerüstet. Die Zusammensetzung des Holzgases ist in Abhängigkeit von Stöchiometrie und Brennstofffeuchtigkeit (für Pellets) bekannt.
4.1	<u>Optimierung Vergasungsprozess:</u> Der Prozess der Holzgaserzeugung soll mit Hilfe der Literatur charakterisiert und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Resultat: optimale Primärluftmenge, Verweilzeit, günstigstes Temperaturniveau in den jeweiligen Prozesszonen des Gaserzeugers.
4.2	<u>Optimierung Luftführung und Durchmischung:</u> Die gestufte Luftführung und Durchmischung mit Holzgas soll mit CFD optimiert werden (günstige Strömungsführung zur Absetzung von Feinstaub finden). Eine optimale Durchmischung des Holzgases mit der Verbrennungsluft soll über den gesamten Leistungsbereich gewährleistet werden. Optimierungen werden iterativ, zusammen mit Versuchen am Prüfstand ausgeführt. Luftführungssysteme zur Abgas-Rezirkulation (Emissionsreduktion in Start- und Stop-Phase) sollen überprüft werden.
5.1	<u>Anpassung Variabilität Versuchsbrenner:</u> Der Brenner ist für Versuchszwecke modifiziert und prozessrelevante Parameter werden variiert: Primär- und Sekundärluftmenge, Luftverdrallung (Variation der Anordnung und evtl. Anzahl der Düsen) und dadurch Durchmischung mit Holzgas usw.
5.2	<u>Syngas bei Luftvariation:</u> Die Zusammensetzung des Holzgases (Synthesegas) soll in Funktion des Primär-Luftüberschlusses und Wassergehalts der Pellets untersucht werden. Die Untersuchungen sind in verschiedenen Phasen des Projektes durchzuführen (vgl. 3.3), zuerst zu Beginn der Optimierungsphase zur Unterstützung der Modellierung des HGB → konnte noch nicht realisiert werden, da diese Analyse mit verschiedenen Brennstoffen (Pellets aus verschiedenen Holzarten) durchgeführt werden soll. Für Ende 2015 geplant.
5.3	<u>Optimierung Betriebsphase:</u> Die stationäre Betriebsphase (konstante Brennerleistung) soll zusammen mit CFD auf einen emissionsarmen Betrieb optimiert werden. Es soll eine bessere Strömungsführung, Luftverdrallung und Mischung entworfen werden, um Luftüberschussverhältnisse zu optimieren. Auch Verbesserungen der Betriebstemperatur des HGB sind angestrebt.

	<p>Optimierung Betriebsphase für Brennstoff (Standard-Holzpellets):</p> <ul style="list-style-type: none"> - 6 Leistungspunkte (in kW) 5, 8, 11, 14, 17, 20 - 7 Luftüberschusspunkte (in %) - 30, - 20, - 10, 0, + 10, + 25, + 50 - 5 Primär / Sekundär-Luft-Verhältnisse (in %): - 20, - 10, 0, + 10, + 25 <p>Bei diesem iterativen Prozess werden neben Simulationen, auch am Prüfstand folgende Emissions-Messungen (CO, OGC, Staub-Partikel, NOx, etc.) durchgeführt: Emissionen in Funktion der Brennerleistung, Luftüberschuss, Primär / Sekundär- Luftaufteilung, Stöchiometrie im Holzgaserzeuger. Die angestrebten Zielwerte sind unten bei Meilenstein 2 aufgeführt.</p>
6	<p>Es wurde eine Markanalyse durchgeführt, um die Marktentwicklung und Kundenbedürfnisse auf dem Schweizer Markt zu betrachten. Im Detail wurde der reale Bedarf am Markt in der Schweiz für einen HGB für Haushalte analysiert. Diese Arbeit wurde in einem studentischen Projekt durchgeführt.</p>
Meilenstein 2	<ul style="list-style-type: none"> • Die Marktanalyse liefert die erforderlichen Produkt-Eigenschaften und Massnahmen zur Verdoppelung des Marktpotentials für Pellet-Heizkessel, bzw. Pellet-Vergaser-Brenner. • Die Regelbarkeit des Vergasers ist aufgezeigt (Emissionskennlinien); erste Optimierungen in Bezug auf Luftstufung, Eindüsung und Durchmischung sind charakterisiert. • Das Ziel der Emissionen in der stabilen Betriebsphase ist erreicht: CO < 20 mg/Nm³, Staubemissionen ohne Partikelabscheider < 5 mg/Nm³ und OGC < 2 mg/Nm³ • Anfallende Ascherückstände sind analysiert und die Brennstoffausnutzung ist energetisch optimiert (teilweise zurückgestellt in Phase II). • Der Schlussbericht der Projektphase I ist geschrieben. Die Entwicklungskosten für die weiteren Projektphasen sind bestimmt und ein Gesuch für die weitere Entwicklung ist eingereicht.

Tabelle 2 Arbeitspakete und Meilensteine der Projekt-Phase I

5 Prüfstand

5.1 Holzgasbrenner von Pyro-Man

Die vom IBRE gekaufte Einheit der Firma Pyro-Man Oy aus Finnland wurde konzipiert, um kleinere Häuser zu beheizen. Dieser HGB wird als "Retrofit" angeboten. So sollen bestehende Öl-brenner ersetzt werden, ohne dass man die Kesseleinheit wechseln muss. Durch den Einsatz von Biomasse zu Heizzwecken wird ein CO₂ neutraler Brennstoff eingesetzt. Mit der mehrstufigen Verbrennung der Biomasse können darüber hinaus die Partikelemissionen gesenkt werden. Laut Hersteller wird durch die vorstufige Vergasung eine sehr saubere Verbrennung ermöglicht. Dadurch entstehen weniger Ablagerungen und Verschmutzungen im Brennraum. Zudem ist der Wärmeübergang besser.

Der HGB ist gemäss Hersteller für eine maximale Brennerleistung von 15 kW ausgelegt. Er kann im Bereich von 30 - 100 % der maximalen Brennerleistung betrieben werden, ohne dass sich die Emissionswerte oder die Effizienz verschlechtern. Als Brennstoffe eignen sich z. B. Pellets. Diese sollten einen Durchmesser von 6 - 8 mm und eine Länge von 15 - 20 mm haben. Eine gewisse Grösse der Pellets ist wichtig, um eine gute Förderbarkeit mit der Schnecke zu gewährleisten. Die Einheit ist mit 53 x 38 x 33 cm sehr kompakt und mit 25 kg gut zu handhaben. Der Betriebsunterdruck im Brennraum soll zwischen 10 und 20 Pa liegen.

Der HGB fällt unter die Sicherheitsstandards nach der Norm EN 15270, die für Pelletbrenner für kleine Heizkessel gilt. Zum Sicherheitskonzept des HGB gehört unter anderem ein Photowiderstand als Flammensensor über dem Vergaser, welcher die Flamme überwacht und die Zufuhr von neuem Brennstoff regelt. Eine Analyse der Sicherheitsanforderungen nach EN ISO 12100 folgt in Kapitel 8.4.

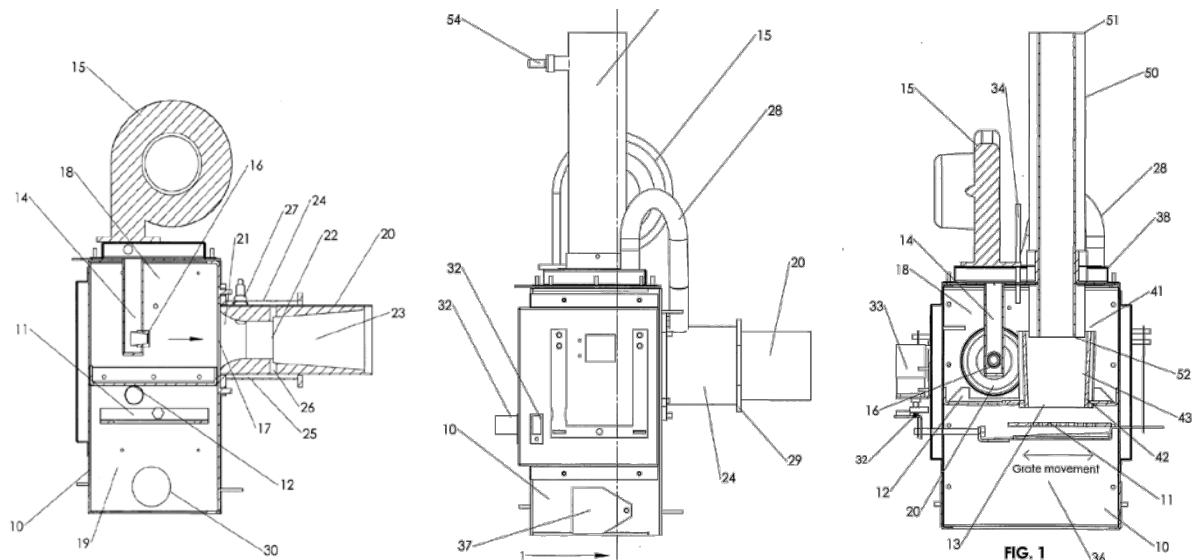


Abbildung 4 PyroMan Pellet-Vergaser: Längsschnitt, Seitenansicht und Querschnitt aus der Patentanmeldung (EP2314918A2)

In Abbildung 5 ist der Holzgasbrenner in zwei Schnittansichten schematisch dargestellt. Die wichtigsten Komponenten werden in der anschliessenden Tabelle 3 beschrieben.

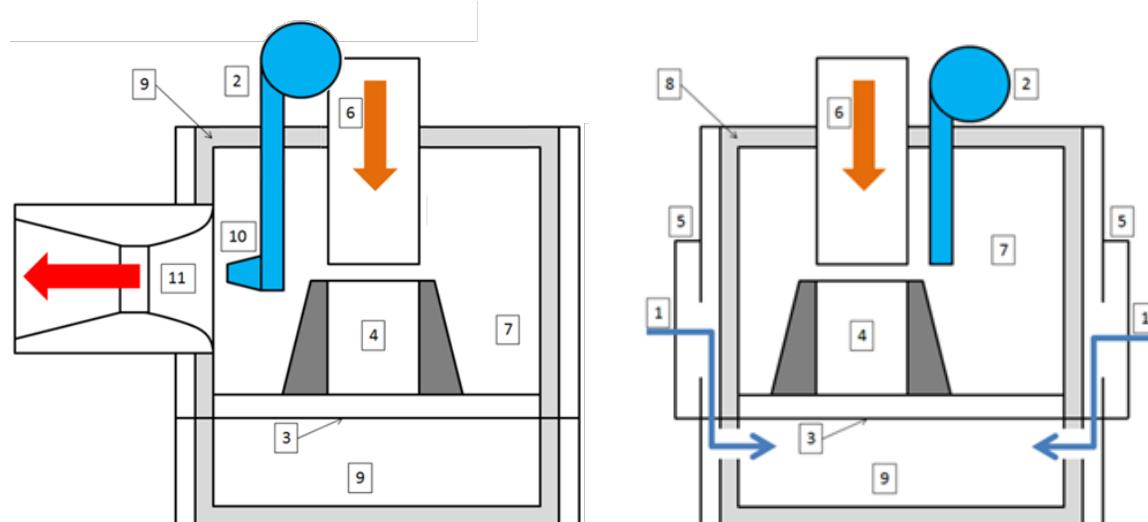


Abbildung 5 Schnittansichten der Vergasereinheit

Nr.	Funktion
1	Primärluftzufuhr von aussen. Beim Einströmen dient die Luft zur Kühlung des Gehäuses und wird dabei etwas vorgewärmt. Die Luft strömt dann von unten her durch die Schüttung im Reaktor (4) nach oben. Da die Brennstoffzufuhr von oben her erfolgt und das Gas oben austritt, spricht man hier von einem Gegenstromvergaser.
2	Über das Gebläse wird Sekundärluft zugeführt, mit welcher das Produktgas oxidiert wird.
3	Die Position (3) stellt den Rost unter dem Reaktor dar. Auf ihm liegt die Pelletschüttung. Der Rost kann über einen Mechanismus gerüttelt werden, um die entstandene Asche in die Aschenschublade (9) zu befördern.

-
- 4 Der Reaktor ist aus einem speziellen feinen Beton hergestellt. In ihm finden das Trocknen und Aufheizen, die pyrolytische Zersetzung und die Vergasung des Brennstoffs statt.
 - 5 Die Aufhängung und Rückstellfeder des Rostes ist mit einem dünnen Stahlblech realisiert. Um den Rost zu rütteln, wird ein Elektromagnet in kurzen Abständen an- und abgeschaltet.
 - 6 Die Pelletzufuhr erfolgt von oben in den Reaktor. Am oberen Ende dieses Stahlrohrs wird ein Kunststoffschlauch verwendet, um den Holzgasbrenner mit der Förderschnecke aus dem Pelletvorrat zu verbinden.
 - 7 Das produzierte Produktgas sammelt sich in diesem Raum, bevor es weiter befördert wird.
 - 8 Isolation und Aussenwand des Holzgasbrenners.
 - 9 Aschebehälter, er kann durch zwei Öffnungen im Sockel des Holzgasbrenners entleert werden.
 - 10 Hier wird die Sekundärluft in den Holzgasbrenner eingeleitet und nimmt das Gas in Richtung der Venturidüse (11) mit, wo es zündet.
 - 11 Das Gas zündet und strömt durch die Venturidüse aus dem Holzgasbrenner in die Brennkammer. Über der Düse wird parallel zum Verbrennungsgas noch Tertiärluft zugeführt. Diese Luft hat vor allem die Aufgabe die Flamme horizontal auf gleicher Höhe zu halten. Die Venturidüse sorgt für Unterdruck im Brennraum.
-

Tabelle 3 Komponenten und Funktionen des Holzgasbrenners

5.2 Dimensionierung Prüfstand

Die Brennkammer hat im vorliegenden Fall mehrere Funktionen:

- A) Den Gasen Platz und Zeit zum Reagieren zu geben. Dafür mussten die passenden Dimensionen gefunden werden.
- B) Sie muss die Möglichkeit bieten, Sichtfenster und Thermoelemente zu installieren.
- C) Eine weitere Funktion ist die Wärmedämmung gegen aussen. Die äussere Oberflächentemperatur sollte möglichst gering gehalten werden, um die Gefahr von Verbrennungen beim Arbeiten am Prüfstand zu verkleinern.
- D) Die innere Oberflächentemperatur sollte möglichst nahe an der adiabaten Verbrennungs temperatur liegen, um die Reaktion nicht durch Quench-Effekte zu stören.

Im Folgenden werden zuerst die Berechnungen zur Grösse des Brennraumes und anschliessend die Berechnungen zur Dimensionierung der Isolation behandelt.

Berechnung der Brennkammergrösse

Um eine bestimmte Leistung fahren zu können, ist ein entsprechender Volumenstrom des Brenngases notwendig. Um das Gas vollständig oxidieren zu lassen, darf dieses nicht zu schnell durch die Brennkammer strömen. Es muss genügend lang im heissen Bereich der Brennkammer verbleiben. Somit muss die Geschwindigkeit der Verbrennungsgase genügend klein sein, um die nötige Verweilzeit zu ermöglichen. Dies wird mit einer ausreichend grossen Brennkammer erreicht.

Volumenstrom: $\dot{V}_{Gas} = V_{tr,T_B} \frac{P_{Vergaser}}{H_u, Pellets}$ (Formel 1)

benötigtes Volumen: $V_B = \dot{V}_{Gas} t$ (Formel 2)

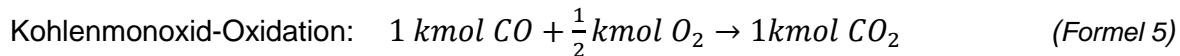
Volumen der Brennkammer: $V = \frac{d_B^2 \pi}{4} l_B$ (Formel 3)

In der Formel 1 muss das trockene Abgasvolumen für die herrschenden Temperaturen in der Brennkammer eingesetzt werden. Für die Umrechnung von Normtemperatur auf die Temperatur der Brennkammer kann die Formel 4 verwendet werden, welche aus der idealen Gasgleichung hervorgeht.

Umrechnung, Nm^3 auf m^3 bei T_B : $V_{tr,T_B} = \frac{T_B V_{tr}}{T_N}$ (Formel 4)

Neben dem Volumenstrom muss auch die Verweilzeit für das Gas in der Brennkammer bestimmt werden, bevor das Brennkammervolumen bestimmt werden kann. Zu diesem Zweck wird die chemische Reaktion analysiert, um dann mit einem geeigneten Ansatz auf die Verweilzeit zu schliessen.

Die Oxidation der Bestandteile des Produktgases erfolgt über mehrere Hundert von Elementarreaktionen, die als Reaktionsmechanismus bezeichnet werden. Hier wird, stark vereinfacht, nur eine Globalreaktion analysiert. Als massgebende Reaktion wurde die trockene Oxidation von Kohlenmonoxid (CO) mit Sauerstoff (O_2) zu Kohlendioxid (CO_2) nach der (Formel 5) angenommen:



Diese Reaktion tritt in Realität nicht so auf, doch wurde diese einfache Möglichkeit zur Abschätzung der notwendigen Verweilzeit eingesetzt. Sie berücksichtigt sozusagen den "Worst-Case" oder einfach die langsamste Reaktion. In der Realität läuft die Reaktion schneller ab.

Da bei dieser Reaktion zwei Edukte in ein Produkt umgesetzt werden, spricht man hier von einer bimolekularen Reaktion. Um die nötige Verweilzeit zu bestimmen, musste zuerst die Reaktionsgeschwindigkeit der als massgeblich betrachteten Reaktion bestimmt werden. Hierzu wurde die Formel 6 benutzt. Die Zeit t in der Formel entspricht der benötigten Reaktionszeit, um von den Anfangskonzentrationen $[A_0]$ und $[B_0]$ auf die Konzentration $[A_t]$ zu kommen. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist stark temperaturabhängig und auch druckabhängig. Hier wird die Druckabhängigkeit vernachlässigt, da die Verbrennung bei atmosphärischen Bedingungen abläuft. Die Temperaturabhängigkeit wird über die Arrhenius-Formel (Formel 6) berücksichtigt. Die Parameter E_A und A in der Arrhenius-Gleichung können experimentell bestimmt werden. Hier wurden zur Vereinfachung für die Reaktionsgeschwindigkeit k Werte aus veröffentlichten Experimenten benutzt. (Brabbs, Belles, & Brokaw)

Arrhenius-Gleichung: $k = A e^{-\frac{E_A}{RT}}$ (Formel 6)

Geschwindigkeitsgesetz für bimolekulare Reaktion aus (Wikipedia):

$$A_t = \frac{[A_0(A_0 - B_0)e^{(A_0 - B_0)kt}]}{[A_0e^{(A_0 - B_0)kt} - B_0]} \quad (\text{Formel 7})$$

Da man an der Endkonzentration von CO [A_t] interessiert war, wurde die Konzentration [A_0] als die Konzentration von CO im Produktgas angenommen und die Konzentration [B_0] als die Startkonzentration des O₂. Sämtliche Konzentrationen wurden auf einen Normkubikmeter [Nm³] bezogen. Also auf das Volumen, welches das trockene Gas bei 273.15 K und einem Druck von 1.013 bar einnimmt. Für die Berechnung wurde eine Produktgaszusammensetzung gemäss Tabelle 4 verwendet und mit einer (Sekundär) Luftzahl von $\lambda = 1.5$ oxidiert.

Wasserstoff (H ₂)	14 %
Kohlenmonoxid (CO)	20 %
Kohlendioxid (CO ₂)	10 %
Methan (CH ₄)	2.5 %
Stickstoff (N ₂)	53.5 %

Tabelle 4 Theoretische Zusammensetzung Produktgas für Verweilzeitabschätzung

Durch die Verdünnung des Produktgases mit der Sekundärluft weisst das Brenngasmisch am Eintritt in die Brennkammer eine CO-Konzentration von ca. 8 % auf. Die Startkonzentration von O₂ beträgt ca. 14 %. In der Abbildung 6 sind die Verläufe der Endkonzentrationen des CO in Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur und der Verweilzeiten aufgezeichnet. Die detaillierten Berechnungen und Daten sind in [6] aufgeführt.

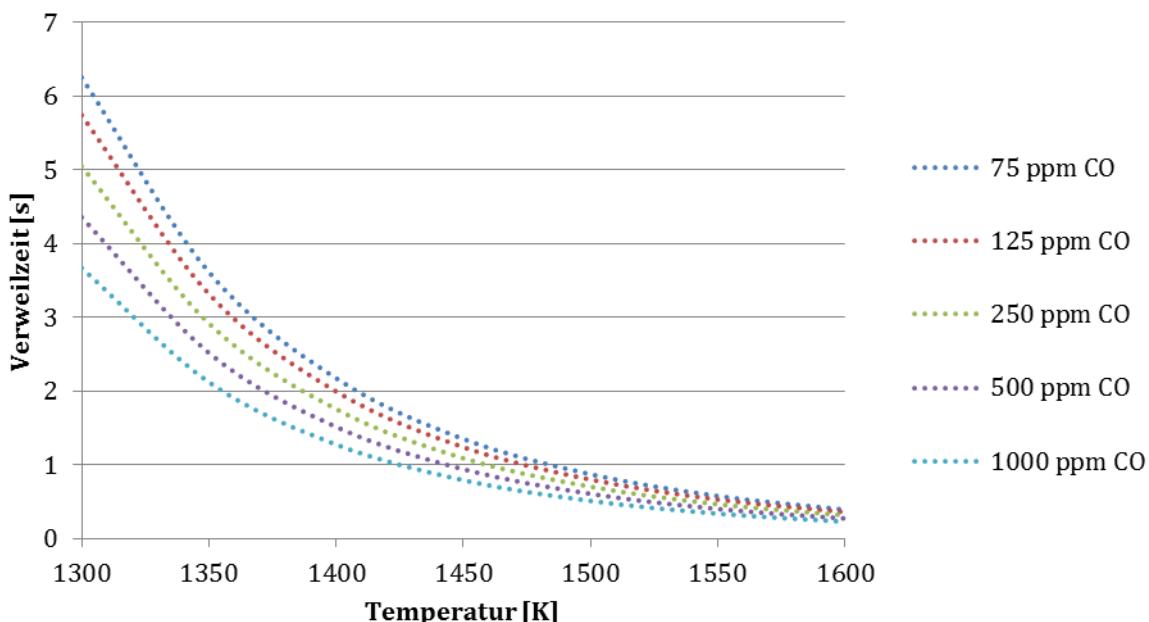


Abbildung 6 CO Konzentrationen in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit

Bei den Berechnungen, die auf die Verläufe in der Abbildung 6 führten, bleibt ein Restsauerstoff von ca. 5 % im Abgas. In den Normen werden aber CO-Konzentrationen immer auf einen Restsauerstoffgehalt von 13 % bezogen. Die korrigierten Resultate zeigt Abbildung 7. Dieser Verlauf wurde für eine CO-Konzentration von 250 ppm im Abgas bestimmt. Aus diesem Verlauf konnte dann auch die nötige Reaktionszeit, was der Verweilzeit in der Brennkammer entspricht, bestimmt werden. Da man bei diesen Berechnungen von trockenen Gasen ausgeht, sind Resulta-

te als sehr konservativ einzuschätzen. Auch die zu Beginn angenommene Luftzahl von 1.5 wurde als eher niedrig eingestuft. Durch die Erhöhung der Luftzahl kommen zwei Effekte zum Tragen. Einerseits wird die Reaktionstemperatur herabgesetzt, was die Reaktion verzögert und somit die Verweilzeit vergrößert. Andererseits wird durch die höhere Sauerstoffmenge der Reaktionsablauf begünstigt. Die Begünstigung der Reaktion durch die höhere Sauerstoffmenge überwiegt gegenüber der Reaktionsverzögerung durch die geringere Temperatur. Dies ist in der Abbildung 7 zu erkennen.

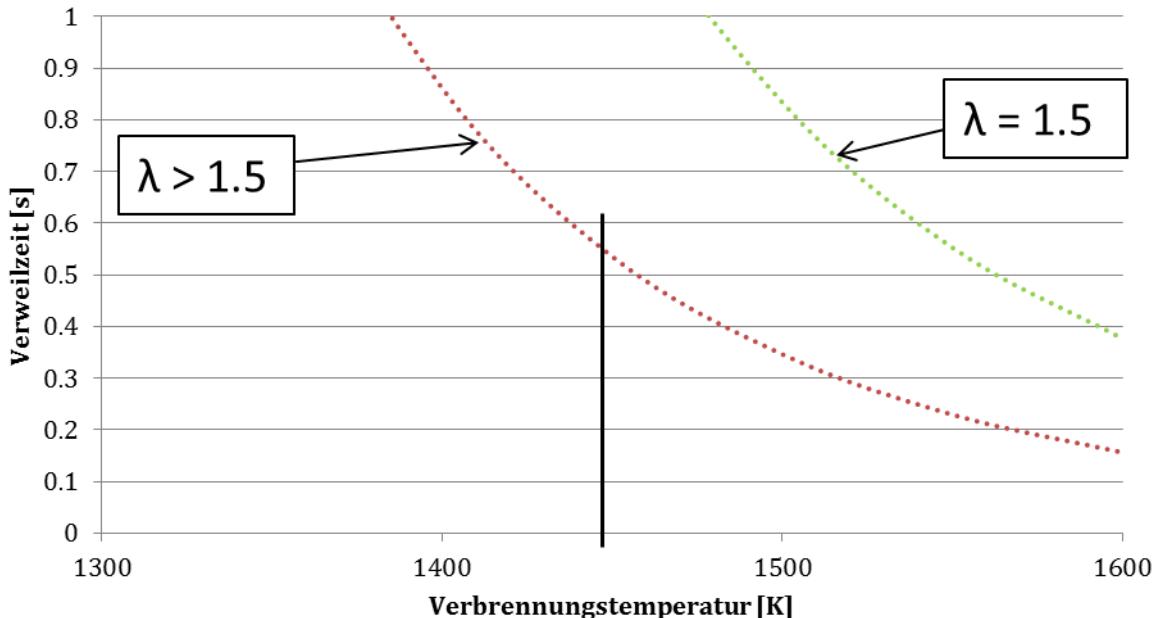


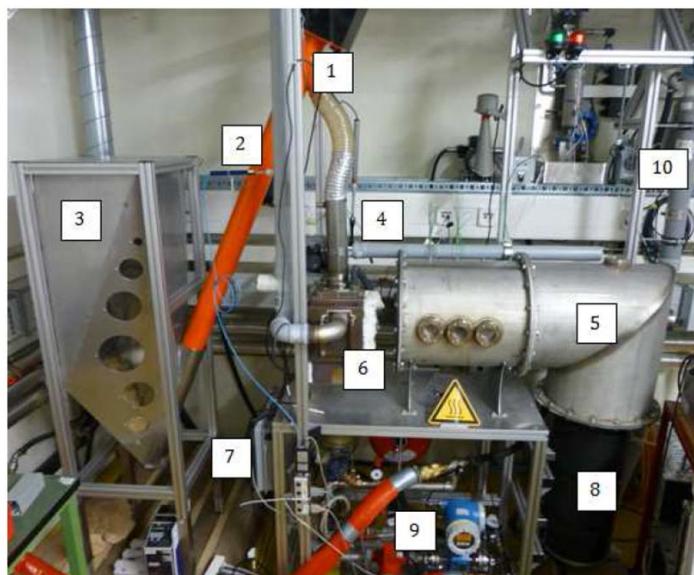
Abbildung 7 Benötigte Verweilzeit in Abhängigkeit von der Temperatur in der Brennkammer bei einer Kohlenmonoxid Endkonzentration von 250 ppm und Restsauerstoff von 13 %.

Der Hersteller des Holzgasbrenners schätzt die Verbrennungstemperaturen auf 1000 - 1200 °C. Mit diesen Angaben konnte man die benötigte Verweilzeit aus dem Verlauf in Abbildung 7 mit 0.55 s bestimmen.

Anhand dieser Reaktionszeit konnte man die benötigte Brennkammergrösse berechnen. Es wurde dazu eine Verbrennungsrechnung gemäss [8] für Pellets mit einer mittleren Zusammensetzung nach Tabelle 4 durchgeführt. Für die Pellets wurde ein Heizwert von 17 MJ/kg angenommen. Die Brennkammer wurde für die vom Hersteller angegebene maximale Leistung von 15 kW ausgelegt. Weiter wurde für die Berechnung ein innerer Durchmesser der Brennkammer von 0.2 m definiert. Beim Austritt des Verbrennungsgases aus dem Holzgasbrenner muss eine Querschnittserweiterung stattfinden. Ist dies nicht der Fall, könnte die Flamme nicht sicher stabilisiert werden. Diese Querschnittserweiterung wurde auch vom Hersteller empfohlen. Mit dem definierten Durchmesser errechnete man eine minimal notwendige Länge der Brennkammer von 0.44 m. Die detaillierten Berechnungen befinden sich in [6].

5.3 Aufbau Prüfstand und Instrumentierung

Der Prüfstand für den HGB wurde am IBRE aufgebaut (siehe Abbildung 8) und 2013 in Betrieb genommen.



Pos	Benennung
1	Pellet-Förderschnecke
2	Primärluft in Ansaugstrecke
3	Pellet-Tank
4	Sekundärluft in Ansaugstrecke
5	Brennkammer
6	Holzgasbrenner ohne Abdeckung
7	Abgesetzt installierte Steuerung
8	Kessel
9	Kühlwasserkreislauf
10	Abgasanlage

Abbildung 8 Prüfstand am IBRE

Die Messstellen am Prüfstand für den HGB sind in Abbildung 9 dargestellt. Zusätzlich dazu wurden auch mehrere Sensoren im Vergaser selbst eingebaut. Alle Messungen konnten in Betrieb genommen werden und liefern zufriedenstellende Messresultate. Dabei stellt die Atmosphäre im Vergaser besondere Anforderungen an die Materialbeständigkeit der Sensoren. Diese mussten mehrmals ersetzt werden, da sie durch den Betrieb in der reduzierenden und „aufkohlenden“ Atmosphäre spröde wurden und bei Umbauten des HGB zerstört wurden. Aus diesem Grund wurde eine neue, temporär einbaubare Temperaturmessung entworfen werden, mit der über verschiedene lange Thermoelemente in einem Bündel in der Mitte des Vergasertopfes in verschiedenen Höhen die Temperatur gemessen werden kann.

Im Weiteren wurde eine Sonde gebaut, mit der Holzgas aus dem Vergaser entnommen werden kann. Weitere Details sind in Kapitel 6 dokumentiert.

Zusätzlich wurden folgende Druckmessstellen eingebaut:

- Sekundärluft Einlass
- Primärluft Rost
- Vergaser
- Abgas

Diese werden benötigt, um die Simulation zu validieren und sind in Abbildung 9 nicht dargestellt.

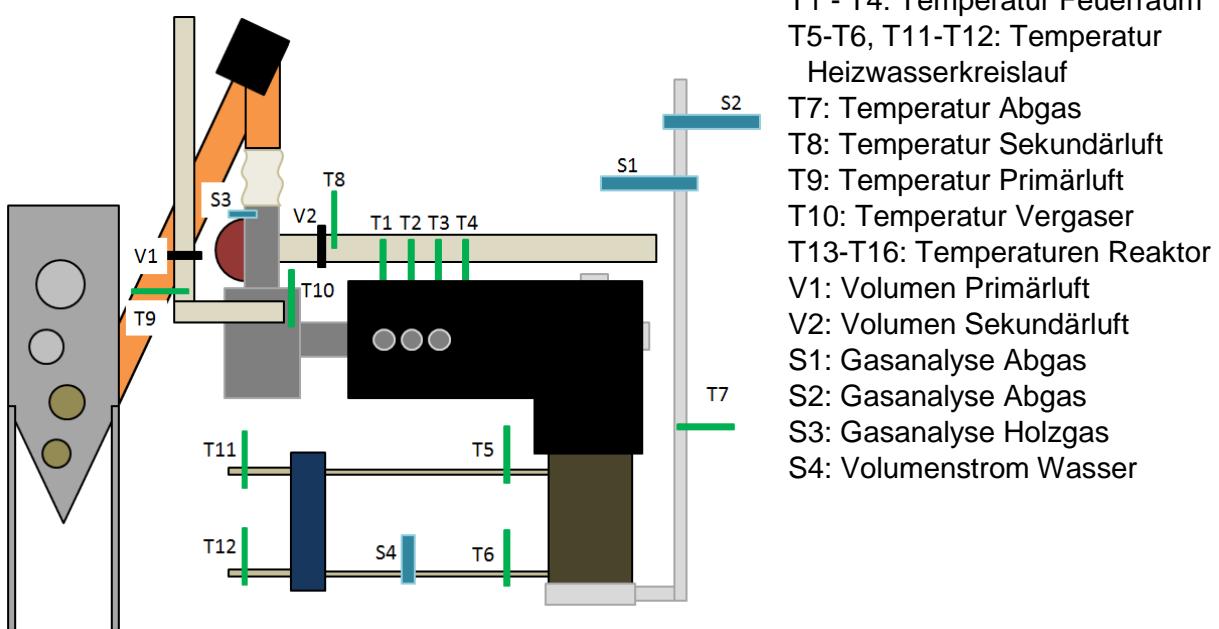


Abbildung 9 Sensorik am Prüfstand

6 Eigenschaften, Funktionsweise und Emissionen

6.1 Brennstoff-Parameter

Die Regelung des HGB erfolgt über eine extern am Gehäuse angebrachte Steuerung. Für den Prüfstand im Labor des IBRE wurde die Steuerung an einen PC angeschlossen, um alle Parameter auch durch die Datenerfassung zu erfassen.

Folgende drei Parameter lassen sich im „Run-Modus“ (stabiler Betriebsmodus) einstellen:

- Förderrate
- Förderdauer
- Gebläse-Drehzahl (Gebläse-Leistung)

Die verschiedenen Kombinationen aus jeweils 3 möglichen Förderdauern und Förderpausen ergeben die 3 möglichen Förderfaktoren.

Förderfaktor	Förderdauer [s]	Förderpause [s]
0.05	3	57
0.05	8	152
0.05	12	228
0.15	3	17
0.15	8	45
0.15	12	68
0.25	3	9
0.25	8	24
0.25	12	36

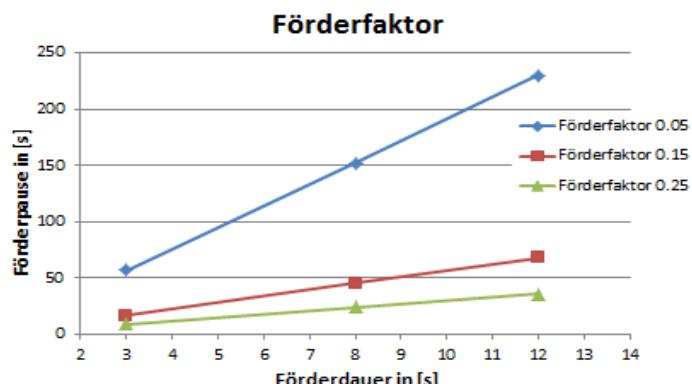


Abbildung 10 Förderfaktor

Der reale Förderfaktor folgt der tatsächlichen Förderdauer und entspricht zu 70 bis 100 % dem eingestellten Förderfaktor. Bei kleinen Förderfaktoren wird der eingestellte Förderfaktor erreicht. Bei einem hohen Förderfaktor von 0.25 ergeben sich Abweichungen bis 30 %.

Laut Messungen von [5] ist es mit dem vorliegenden Brenner momentan möglich, Brennerleistungen im Bereich von 5.5 bis 18.5 kW zu regeln. Es konnte festgestellt werden, dass bei allen Messungen im hohen Leistungsbereich die Förderrate durch den Infrarotsensor (Flammsensor) reduziert wurde, wodurch höhere Brennerleistungen als 18.5 kW bisher nicht erreicht werden konnten. Bei Förderraten unter 0.06 (entspricht einer Leistung von 5.5 kW) erreichte der Brenner keine stabile Betriebsphase.

Die Brennerleistung des HGB in kW berechnet sich näherungsweise aus Förderfaktor x 100.

Parameter	Einheit	Erklärung	Regelbereich
Förderdauer (F_D)	s	Dauer in Sekunden des Betriebes der Schnecke (Pellets werden gefördert)	3 s, 8 s, 12 s
Förderfaktor (F_R)	-	Ergibt sich aus der Förderdauer der Pellets und der Förderpause (Duty cycle der Förderschnecke) $Förderfaktor = \frac{\text{Förderdauer}}{\text{Förderdauer} + \text{Förderpause}}$	0.05, 0.15, 0.25
Förderpause (F_P)	s	Pause der Schnecke in Sekunden (es werden keine Pellets gefördert)	Ergibt sich aus F_D und F_R
VD	%	Leistung: Gebläse Sekundärluft	80, 60, 40

Tabelle 5 Förderparameter

6.2 Verbrennungsluft-Parameter

Der Brenner der Fa. Pyro-Man hat einige Voreinstellungen, die beim Testen teilweise übernommen wurden. So wird z.B. die Ventilator-Drehzahl mit drei voreingestellten Parametern 20, 40 und 60 eingestellt. Hierbei entspricht "20" einer realen Drehzahl bei 80 % Gebläse-Leistung, "40" einer realen Drehzahl bei 60% Gebläse-Leistung und "60" einer realen Drehzahl bei 40 % Gebläse-Leistung. In den folgenden Abbildungen ist jeweils nur die Gebläse-Leistung angegeben und nicht mehr der Pyro-Man Wert. Die dargestellten Messungen sind nur ungefähr und geben nicht die exakten Verhältnisse wieder, da eine grosse interne Leckage der Luftströme vorhanden ist (die Menge der Leckage ist unbekannt).

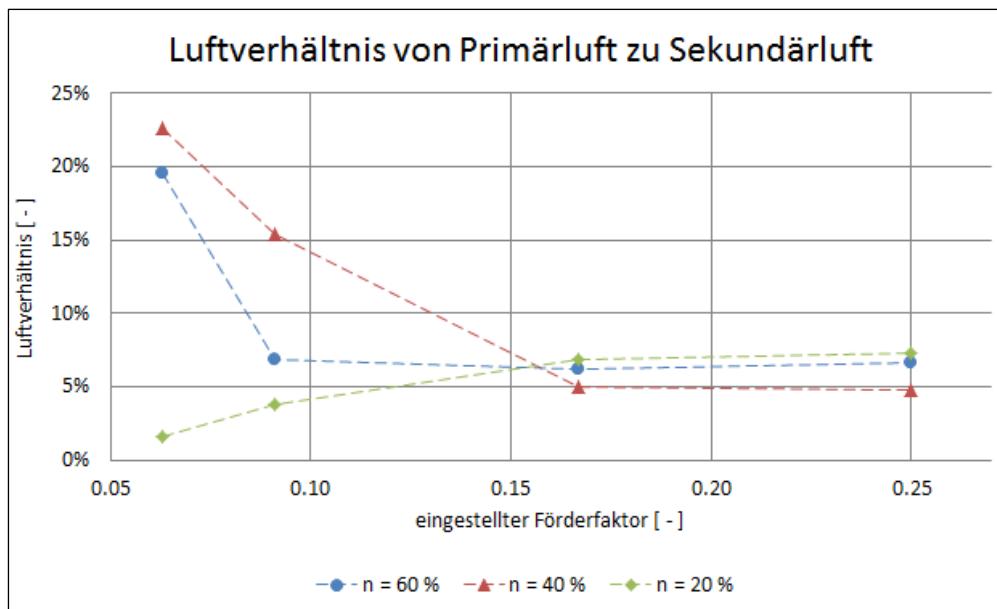


Abbildung 11 Luftverhältnis Primär- zu Sekundärluft (n = Drehzahl des Ventilators entspricht Gebläse-Leistung)

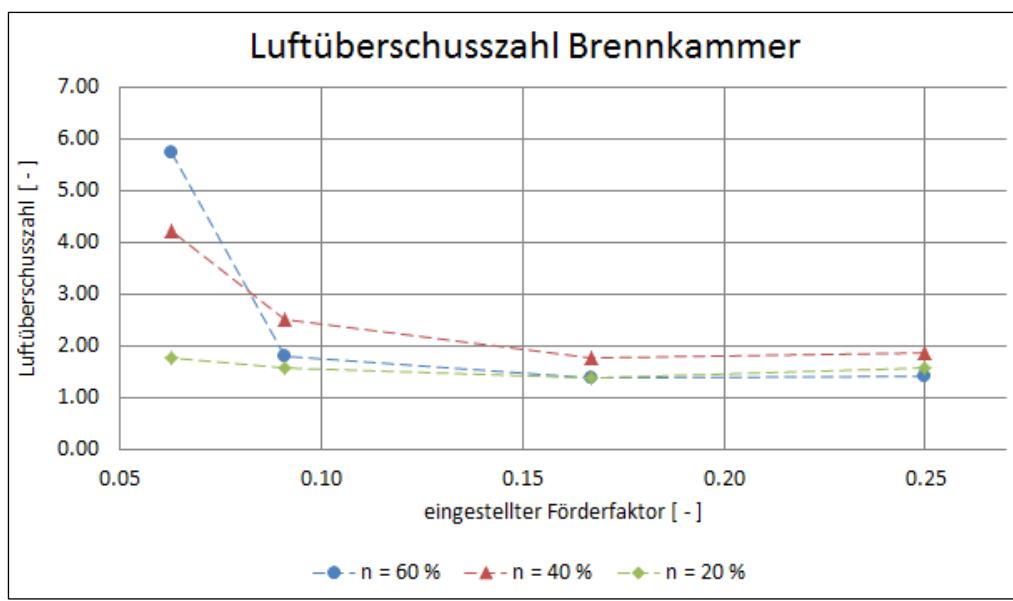


Abbildung 12 Luftüberschuss Brennkammer (n = Drehzahl des Ventilators entspricht Gebläse-Leistung)

Ein Schwerpunkt der bisherigen Versuche war, die Funktionsweise des Brenners zu verstehen und die Emissionen über alle Betriebspunkte zu ermitteln.

Im Vordergrund stand dabei, die vorhandenen variablen Parameter zu erfassen und ihre Auswirkungen zu verstehen. Die variablen Parameter "Förderrate", "Förderdauer", "Förderpause" und "Gebläse-Leistung" sind auch in Tabelle 5 erläutert. Es sollen für den gesamten Leistungsbereich des Brenners (5 - 20 kW) die optimalen Parameter für diese Regelgrößen gefunden werden, mit denen die tiefsten Emissionswerte erzielt werden können.

Bei den Messungen wurden die Messdaten der Betriebspunkte über eine Dauer von ca. 30 min aufgezeichnet. Die daraus gebildeten Mittelwerte sind in den folgenden Diagrammen dargestellt.

6.3 CO-Emissionen

Die Messresultate sind in ppm dokumentiert. Im Antrag werden die Zielwerte in mg/Nm³ angegeben, wobei der CO-Zielwert von < 50 mg/Nm³ (über alle Betriebsphasen) ca. 40 ppm entspricht (1 ppm = 1.251 mg/Nm³). Für stabile Betriebsphasen sind CO-Emissionen von < 20 mg/Nm³ (16 ppm) gefordert. In Abbildung 13 sind die CO-Emissionen des HGB über den Förderfaktor dargestellt. In Blau sind alle Versuche mit einer hohen Gebläse-Leistung von 80 % dargestellt. In Rot ist eine Gebläse-Leistung von 60 % gezeigt und in Grün eine kleine Gebläse-Leistung von 40 %. Zudem wurden bei jeder Gebläse-Leistung 3 verschiedene Förderdauern der Pellet-Schnecke getestet mit 3 Sekunden, 8 Sekunden und 12 Sekunden.

Vor allem im Bereich der kleinen Brennerleistungen wurden hohen CO-Emissionen gemessen (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Dies lässt sich durch Schwankungen im Holzgas bedingt durch grosse Zyklen beim Füllen erklären (siehe auch Kapitel 7). Dadurch ist der Anteil an brennbaren Gasen im Verbrennungsgemisch zeitweise geringer (bei erhöhtem Luftüberschuss), wodurch keine vollständige Verbrennung möglich ist.

Es ist sichtbar, dass oberhalb einer Brennerleistung von ca. 8 kW die gemittelten und normierten CO-Emissionen grösstenteils unter dem Zielwert von 16 ppm liegen. Bei Brennerleistungen unter 8 kW sind hingegen höhere CO-Emissionen bis zu 730 ppm gemessen worden.

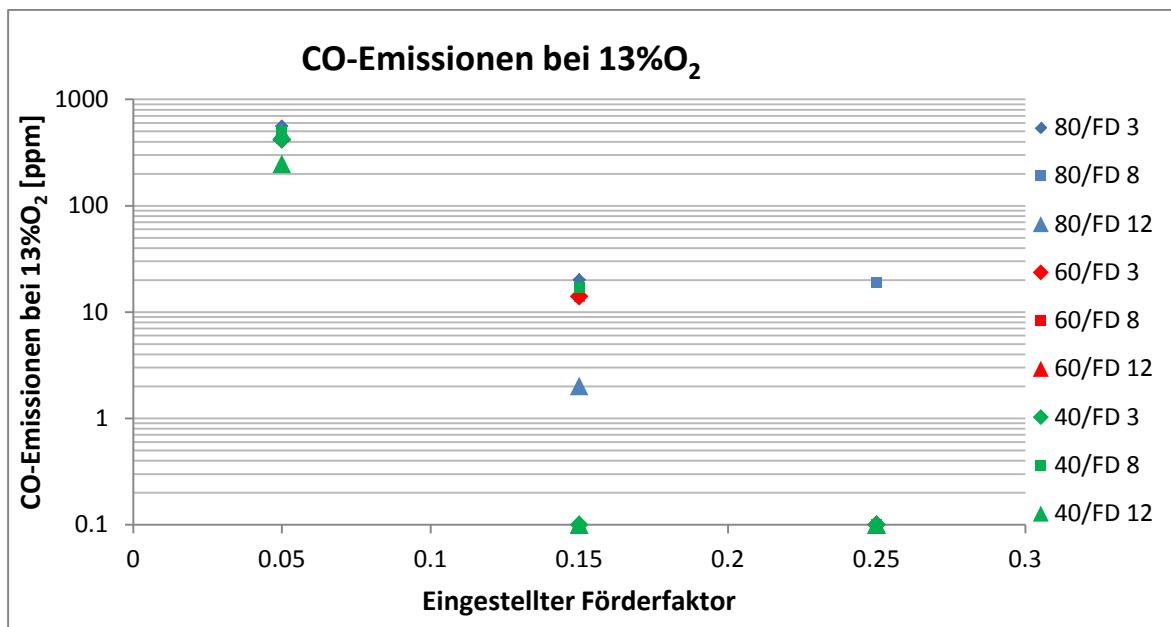


Abbildung 13 CO-Emissionen HGB in Abhängigkeit verschiedener Parameter (Gebläse-Leistung [%] / Förderdauer [s])

Folgende Gesetzmäßigkeiten können für diesen Versuchsaufbau für die Entwicklung der CO-Emissionen festgehalten werden:

- Kleiner Förderfaktor (kleine Brennerleistung) → hohe CO-Emissionen
- Viel Luft (hohe Gebläse-Leistung) → hohe CO-Emissionen
- Kurze Förderdauer (kurze Pausen) → hohe CO-Emissionen

Ausblick: In weiteren Versuchen soll nun ermittelt werden, bei welchem Lambda (Luftzahl) optimale (tiefste) CO-Emissionen erreicht werden können. Dies soll für verschiedene Lastbereiche durchgeführt werden.

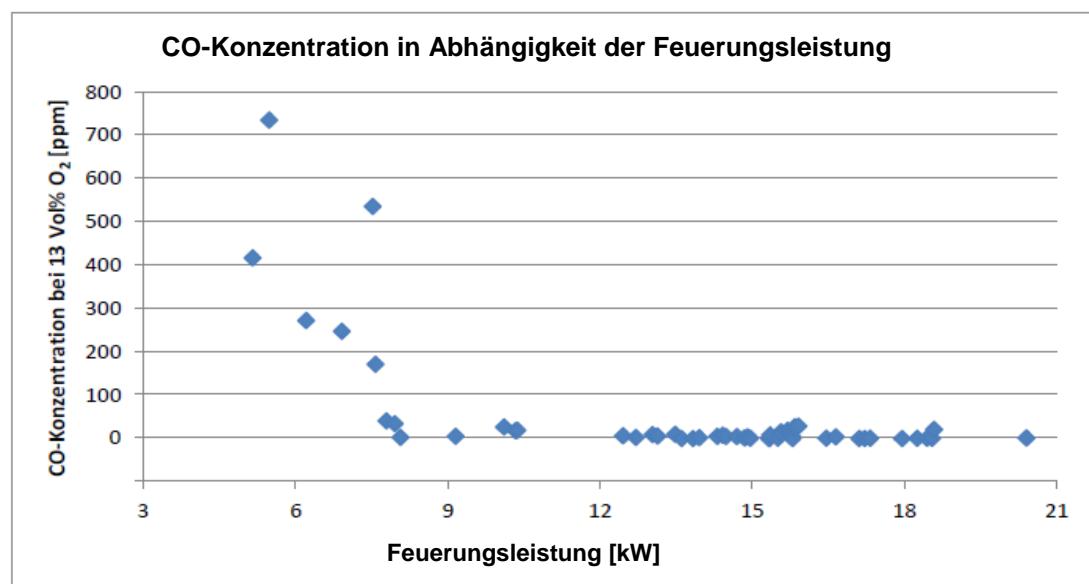


Abbildung 14 CO-Emissionen über der Feuerungsleistung

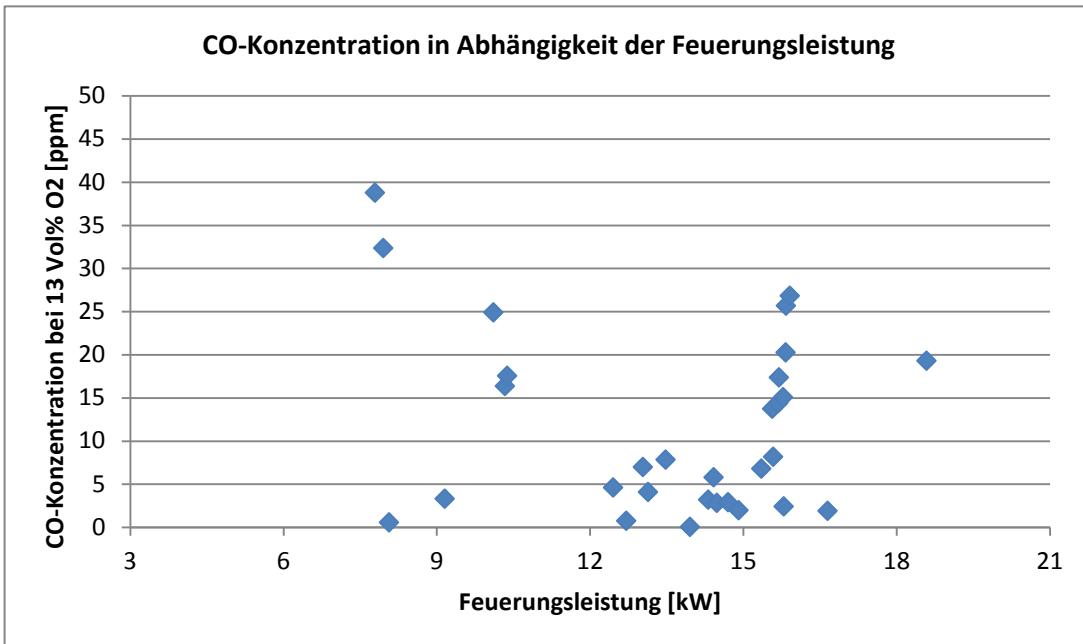


Abbildung 15 CO-Emissionen über der Feuerungsleistung (bis 50 ppm)

6.4 NOx-Emissionen

Für NOx-Emissionen gelten momentan noch keine Grenzwerte für kleine Anlagen. Trotzdem sollen der Vollständigkeit halber Annahmen getroffen werden. Eine geplante neue Richtlinie von Ecodesign sieht einen Grenzwert von 200 mg/Nm³ vor, welcher in der gewählten Darstellung der Abbildungen ca. 97 ppm bei 13 % O₂ entspricht (1 ppm = 2.054 mg/Nm³). Dieser Grenzwert konnte mit den bisherigen Versuchen eingehalten werden. In Abbildung 16 sind die NOx-Emissionen von allen Versuchen aufgeführt.

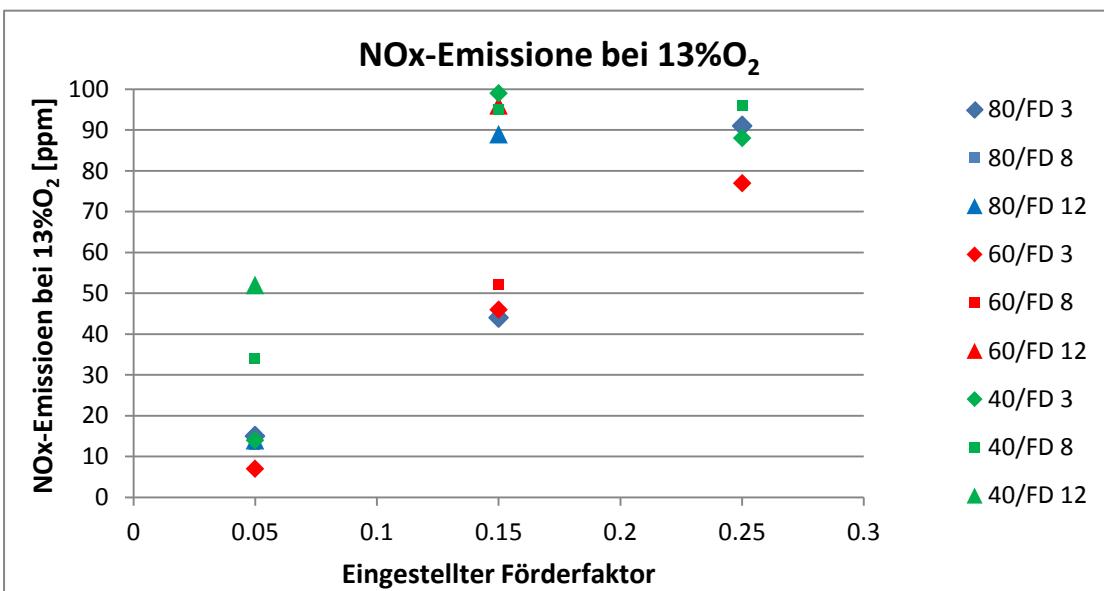


Abbildung 16 NOx-Emissionen HGB (Parameter: Gebläse-Drehzahl [%] / Förderdauer [s])

Folgende Gesetzmäßigkeiten können für diesen Versuchsaufbau für die Entwicklung der NOx-Emissionen festgehalten werden:

- Hoher Förderfaktor (hohe Brennerleistung) → hohe NOx-Emissionen
- Hohe Förderdauer → hohe NOx-Emissionen
- Kleine Gebläse-Leistung → hohe NOx-Emissionen

Das Diagramm in Abbildung 17 zeigt die NOx-Emissionen in Abhängigkeit der mittleren Flammtemperatur. Es ist zu erkennen, dass die NOx-Emissionen im Abgas mit zunehmender Temperatur leicht ansteigen und ab einer Temperatur von ca. 900 °C deutlich zunehmen.

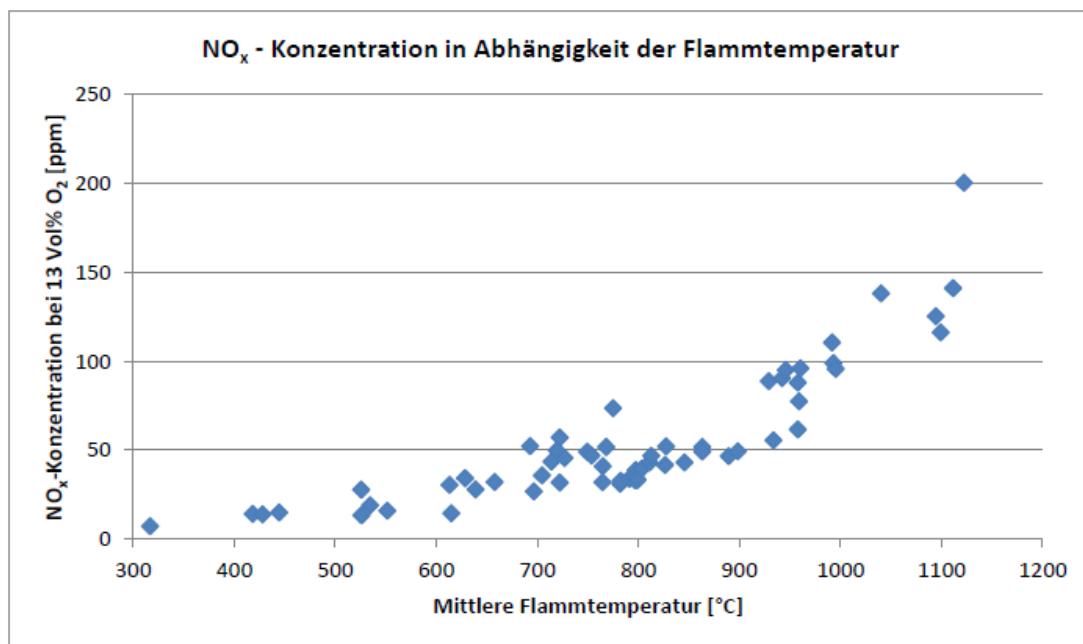


Abbildung 17 NOx-Emissionen über der mittleren Flammtemperatur

Im weiteren Projektverlauf wurden zudem erste Untersuchungen zum Einfluss einer Tertiärluft-Eindüsung durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass die Brennkammertemperatur und damit auch die NOx-Emissionen durch die Tertiärluft deutlich reduziert werden konnten (siehe Abbildung 18). Sie wurde dabei nach der Venturidüse beigemischt. Bei höherer Gebläse-Leistung nimmt der Einfluss der Tertiärluft zu, da mehr Luft zur Verfügung steht und somit die Kühlleistung durch die Tertiärluft steigt.

Als weiterer Vergleich wurden die NOx-Emissionen für alle Betriebspunkte mit und ohne Tertiärluft gemessen:

- gemittelte, auf 13% O₂ normierte NOx-Emissionen ohne Tertiärluft: 76.18 ppm
- gemittelte, auf 13% O₂ normierte NOx-Emissionen mit Tertiärluft: 44.25 ppm

Daraus folgt, dass durch die Tertiärluft die NOx-Emissionen um ca. 60 % verringert werden konnten. Diese Untersuchungen werden in Projektphase II weiter vertieft.

Bei den drei dargestellten Messpunkten wurde je eine unterschiedliche Förderdauer (3 s, 8 s, 12 s), je eine unterschiedliche Gebläse-Leistung (20 %, 40 %, 60 %) und zwei unterschiedliche Förderfaktoren (0.15, 0.25) getestet. Alle Versuche haben eine Reduktion der NOx-Emissionen gezeigt.

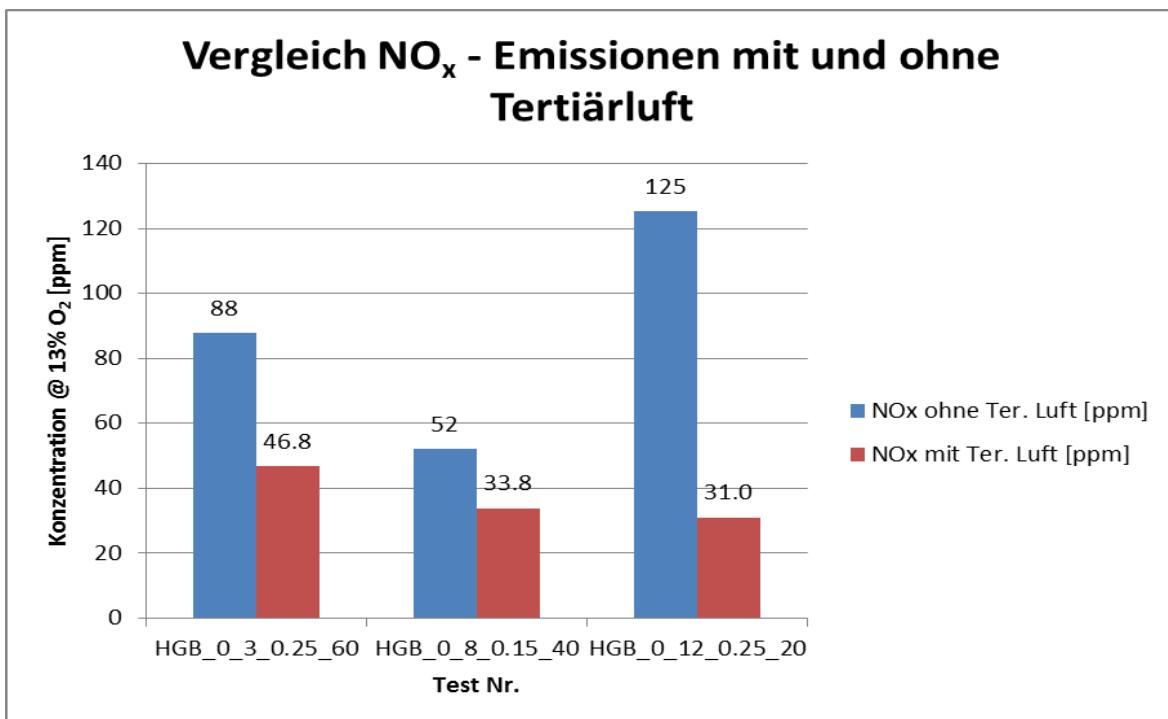


Abbildung 18 NOx-Reduktion bei Tertiär-Luft-Beimischung

6.5 Emissionen der unverbrannten Kohlenwasserstoffe

Bei den unverbrannten Kohlenwasserstoffen gilt es, einen Zielwert von 10 mg/Nm³ einzuhalten, welcher ca. 19 ppm entspricht (1 ppm Methanäquivalent = 0.54 mg/Nm³). Während allen Versuchen wurden keine nennenswerten CH₄-Emissionen erfasst. Allerdings wurde bisher auch nur mit einem Infrarot-Analysator gemessen, der nur CH₄ nachweisen kann, welche bei Pellet-Feuerungen bekanntlich ca. 30% - 40% des Gesamtkohlenwasserstoffs ausmacht. Um den Trend der sehr geringen Emissionen der unverbrannten Kohlenwasserstoffe < 2 ppm zu bestätigen, wird für zukünftige Versuche der vorhandene FID angeschlossen. In Anbetracht der geringen CO-Emissionen sind außer in der Startphase keine Kohlenwasserstoffe zu erwarten.

Fazit der Analyse der Emissionen ist, dass in einem zweiten Versuchsdurchgang nun die Kombination von Parametern gefunden werden muss, bei der sowohl CO- und NOx-Emissionen als auch Unverbrannte die Zielwerte einhalten. Es ist anzunehmen, dass dies bei einem Förderfaktor um 0.1 sein wird.

6.6 Holzgasanalyse-System

Um die effektive Gaszusammensetzung in der Vergasungszone messen zu können, wurde eine beheizte Gas-Entnahmeeinheit gebaut. Diese erlaubt es, die Holzgaszusammensetzung zu analysieren, ohne dass Bestandteile davon bei der Entnahme kondensieren.

Die Gasentnahmesonde wurde von oben vertikal in den Vergasertopf eingebaut und entnimmt einen Volumenstrom von 2 l/min Holzgas aus dem Reaktor. Die Sonde ist elektrisch beheizt (durch Eigenwiderstand) und auf 500 °C Gasaustrittstemperatur geregelt. In Strömungsrichtung hinter der Sonde befindet sich eine elektrische Isoliereinheit, welche das Gas in einen Verdünner leitet, wo es mit Stickstoff im Verhältnis 10 (N₂) : 1 (Holzgas) verdünnt wird. Dadurch senken sich die Partialdrücke und das Gas kann in einem auf 200 °C beheizten Schlauch zu den Messgeräten geführt werden, ohne dass einzelne Bestandteile kondensieren. In einer ebenfalls beheizten Verteileinheit wird das Gas auf drei Analysegeräte geleitet. Das MRU misst die Gaszusammensetzung (CO₂, O₂, CO, CH₄ und NOx), das FID misst unverbrannte Kohlenwasserstoffe und das MS kann die einzelnen Atom- und Molekülmassen messen.

Die elektrische Isoliereinheit erwies sich als zu wenig stabil und wurde undicht. Aus diesem Grund wurde die Ansteuerung umgepolzt und die elektrische Isolation auf die Aussenseite der Sonde verlegt und die Sonde fest mit dem geerdeten Verdünner verbunden.

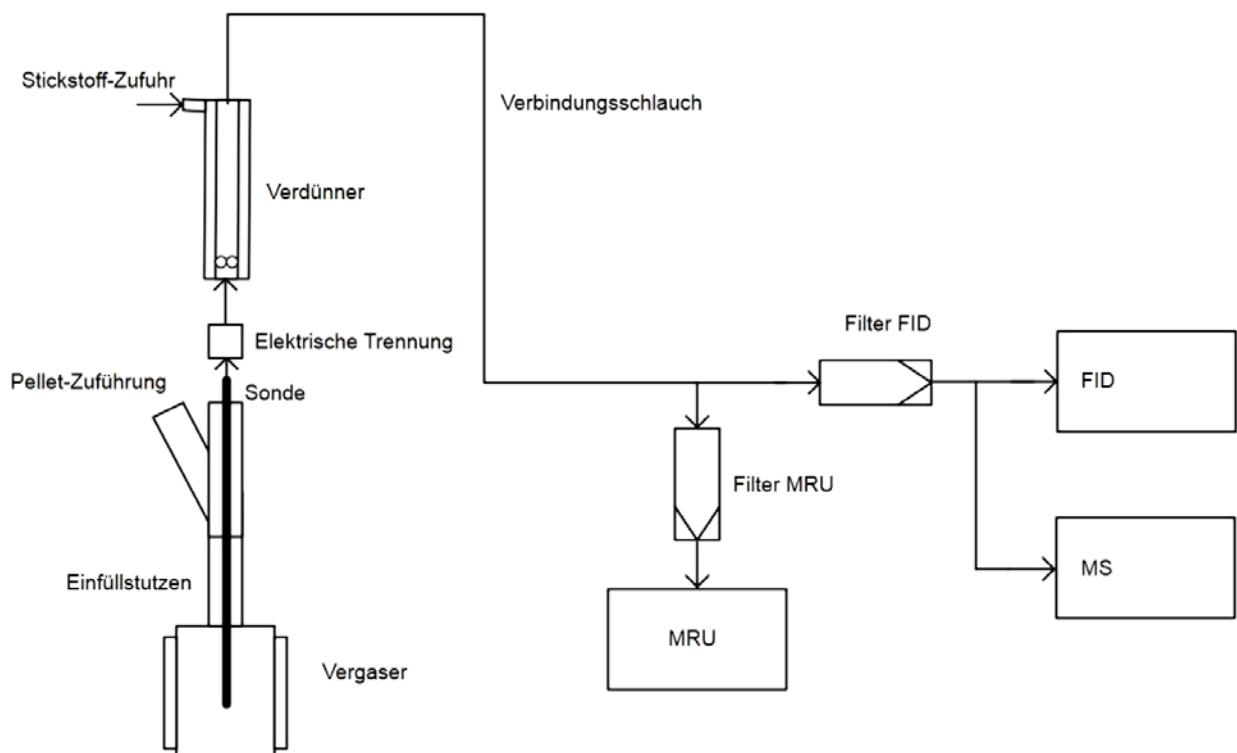


Abbildung 19 Aufbau Holzgas-Analysesystem

6.7 Aufbau beheizte Gasentnahmen-Sonde

Dimensionen:

- Durchmesser Aussenrohr: 18 mm
- Wandstärke Aussenrohr: 1.5 mm
- Durchmesser Innenrohr: 3 mm
- Wandstärke Innenrohr: 1 mm
- Länge: 765 mm

In Abbildung 20 ist die Sonde schematisch dargestellt. Im Innenleiter wird das Holzgas mit 400 bis 600 °C aus dem Reaktor abgesogen. Zwischen dem Ende des Innenleiters (rechts) und dem Ende des Aussenleiters (auch rechts) wird eine Spannung von 11 V angesetzt, wodurch ein Strom von 40 A fliesst. Da der elektrische Widerstand im Innenleiter 20-mal höher als im Aussenleiter ist, wird nur der Innenleiter stark aufgeheizt (bei Umgebungstemperatur werden ca. 500 °C erreicht). Somit kann verhindert werden, dass das Holzgas nach der Entnahme kondensiert (ca. 420 bis 450 °C).

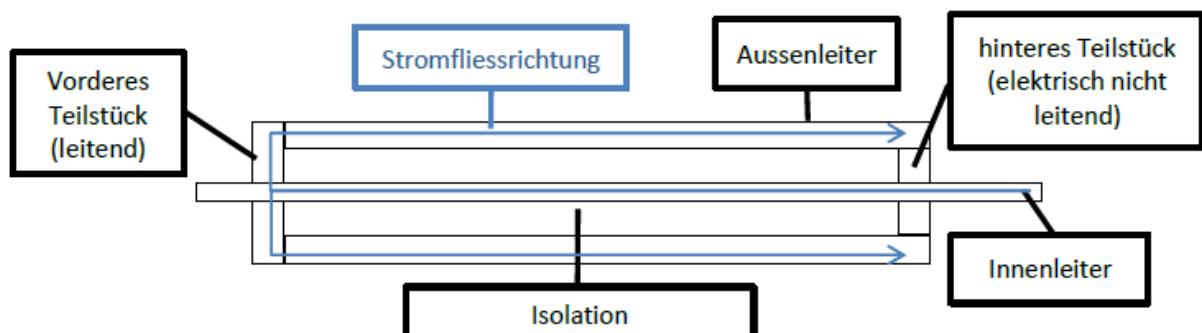


Abbildung 20 Schematischer Aufbau der Holzgasentnahmesonde

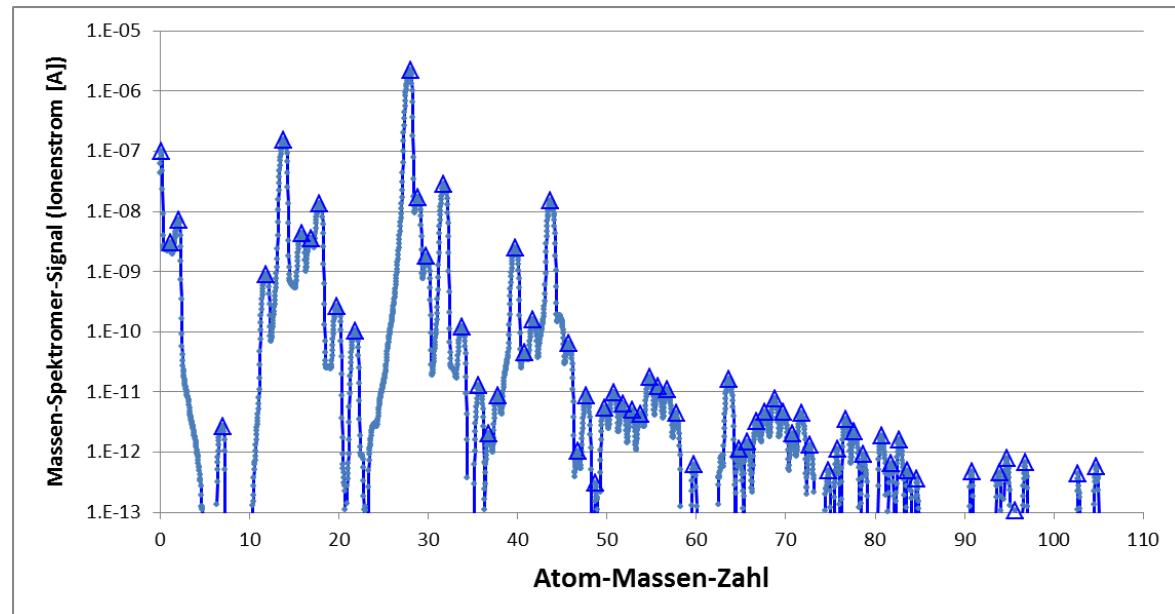


Abbildung 21 Analyse mit Massenspektrometer

Abbildung 21 zeigt die ersten Ergebnisse der Holzgas-Analyse des HGB im Normalbetrieb mit einem Massenspektrometer. Oberhalb von Molekül-Massen-Zahlen von 110 ist nichts mehr sichtbar, womit deutlich wird, dass die C_xH_y Moleküle scheinbar gut fraktioniert werden und keine langkettigen Moleküle vorhanden sind.

Weiter kann durch Versuche belegt werden [7], dass während der Start-Phase deutlich höhere Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen im Holzgas als im stationären Betrieb vorkommen. Während beim Start Konzentrationen von bis zu 8 Vol.-% gemessen werden konnten, beträgt die Konzentration im stationären Zustand nur noch 150 ppm. Beim Start entstehen so viele Kohlenwasserstoffe im Holzgas, weil die Temperaturen im Reaktor noch nicht genügend hoch sind, um die Kohlenwasserstoffe zu spalten. Mit dem Massenspektrometer konnte nachgewiesen werden, dass während dem Start Phenol (C_6H_6O , 94.11 g/mol) als hauptsächliche Teerkomponente produziert wird. Im stationären Zustand hingegen kann vermehrt Toluol (C_7H_8 , 92.14 g/mol) gemessen werden.

Die Konzentration an Kohlenstoffmonoxid beträgt während der stationären Phase zwischen 14 – 22 Vol.-%. Dies entspricht dem zu erwartenden Literaturwert.

Die Konzentration an Kohlenstoffdioxid von 8 - 13 Vol.-% ist im Allgemeinen minimal höher als der erwartete Wert.

6.8 Energetische Effizienz

Auf Grund der aktuellen Konstruktion des finnischen Prototyps und seiner mangelhaften thermischen Isolation sowie unseres Prüfstandaufbaus mit grossen Beobachtungsmöglichkeiten ist eine Bestimmung des Vergasungs-Wirkungsgrades wegen der grossen Wärmeverluste nicht sinnvoll. Dieser wird bestimmt, sobald der neue Prototyp an einem entsprechenden Heizkessel eingebaut ist.

6.9 Untersuchungen am Rost

Neben der bereits beschriebenen Analyse wurden in [5] noch weitere Untersuchungen zur Charakteristik des Rostes und zur Bewertung der Isolation des Gehäuses durchgeführt.

Beim Rost spielt die Grösse und die Geometrie der Öffnungen (Schlitze) eine entscheidende Rolle. Um einen möglichst kleinen Widerstand der von unten durch den Rost einströmenden Primärluft zu gewährleisten, sollten die Schlitze möglichst gross sein. Werden die Schlitze zu gross gewählt, können unverbrannte Pellets oder Ascheteile in den Aschebehälter gelangen. Hier soll im weiteren Projektverlauf an einer optimalen Lösung gearbeitet werden.

Beim bestehenden HGB kann der Rost gerüttelt werden. Um den Einfluss bzw. die Notwendigkeit dieser Rüttleinrichtung zu überprüfen, wurde der Brenner für ca. 1.5 Stunden ohne Rütteln des Rostes betrieben. Dabei wurde der HGB mit ca. 15 kW Brennerleistung gefahren. Im Anschluss wurde das Gewicht der Asche im Aschebehälter und auf dem Rost bestimmt. Dabei konnten keinerlei unverbrannte Pellets in der Asche erkannt werden. Nach diesem Versuch befanden sich 2 g Asche im Aschebehälter und 4 g Asche auf dem Rost.

Bei der anschliessenden Untersuchung war zu erkennen, dass fast alle Schlitze im Rost durch Asche verschlossen waren. Es ist anzunehmen, dass es beim weiteren Betrieb ohne Rütteln des Rostes innerhalb kurzer Zeit zu weiteren Verschliessungen der Schlitze durch Asche gekommen wäre. Dadurch würde die Primärluft-Zufuhr für die Vergasung blockiert und dies würde zu einem Ausfall des Brenners führen.

Um zu überprüfen, wie schnell sich der Rost durch Rütteln von Asche reinigen lässt, wurde der Rüttler nun mehrfach hintereinander betrieben. Nach dem Rütteln blieben teilweise Rückstände von verschmolzener Asche auf dem Rost zurück. Diese Rückstände haben sich vermutlich im Verlauf des Betriebes gebildet. Des Weiteren war zu erkennen, dass sich der Rost verformt hatte. Gründe dafür können mangelnde Stabilität des Rostes oder zu hohe Temperaturen im Glutbett des Vergasers sein. Eine geringe Asche-Schicht auf dem Rost wirkt schützend und soll nicht vollständig beseitigt werden. Bei einem anderen Extrem, dem Rütteln alle 20 Sekunden, fallen noch brennbare Bestandteile in den Aschekasten, in dem sich dann ein Feuer ausbreiten kann. Dies ist auf jeden Fall zu vermeiden.

6.10 Asche-Analyse

Nach diesen Extrem-Experimenten wurde der Anteil des Kohlenstoffes in Funktion des Rüttel-Intervalls gemessen.

Der Anteil an brennbaren Bestandteilen in der Asche ist ein wichtiger Indikator für die Beurteilung des Vergasungsprozesses und lässt zudem auf den Wirkungsgrad des HGB schliessen. Sind viele flüchtige Kohlenwasserstoffe in der Asche nachweisbar, fehlen diese im Vergasungsprodukt des Holzgases. Ist der Anteil an mineralischem Kohlenstoff hoch, wurde ein Teil der vom Brennstoff bereitgestellten Energie während der Oxidation nicht genutzt.

Der Parameter, der die Qualität der Asche und den Gehalt an Kohlenstoff bzw. Kohlenwasserstoffen hauptsächlich bestimmt, ist das Rüttelintervall. Wird zu häufig gerüttelt, können noch teilweise unverbrannte Bestandteile in den Aschebehälter fallen.

Bei der hier durchgeföhrten Analyse verschiedener Ascheproben wurde mit drei unterschiedlichen Rüttelintervallen (RI) nach 4 min (Probe 2), nach 10 min (Probe 3) und nach 20 min (Probe 4) gerüttelt (siehe Abbildung 22). Diese Asche wurde jeweils per thermogravimetrischer Analyse (TGA) untersucht. Jeder Versuch dauerte jeweils 4 Stunden, während denen mit dem jeweiligen Rüttelintervall gerüttelt wurde. Es konnte in keinem Fall ein Verstopfen des Rostes beobachtet werden.

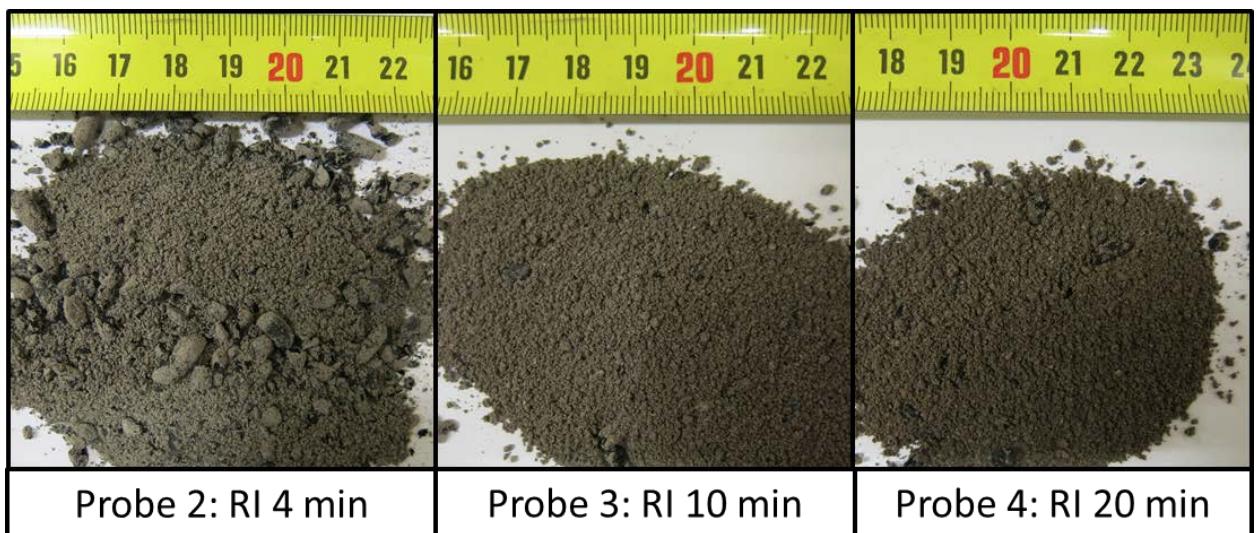


Abbildung 22 Ascheproben nach unterschiedlichen Rüttelintervallen

Auch ohne Analyse ist deutlich erkennbar, dass sich bei einem Rüttelintervall von 4 Minuten mehr brennbare (grosse) Anteile in der Asche befinden als bei den anderen beiden, wo man eher feine Partikel findet.

Der thermooxidative Abbau während der TGA erfolgt für alle Proben qualitativ gleich:

- Peak 1: Wasser verdampft ($T = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$; die Asche hat während der Lagerung vor der Analyse Feuchtigkeit aus der Umgebung aufgenommen)
- Peak 2: Flüchtige Kohlenwasserstoffe verdampfen ($T = 430 \text{ }^{\circ}\text{C} - 440 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Peak 3: Kohlenstoff verdampft ($T = 630 \text{ }^{\circ}\text{C} - 670 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Peak 4: In der Biomasse befindliche Mineralien verdampfen ($T = 750 \text{ }^{\circ}\text{C} - 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 23) zeigt die Ergebnisse der TGA, beispielhaft für die Probe 4. Hierbei wurde mit $10 \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$ unter Luft bis $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt. In grün ist jeweils der Gewichtsverlauf der gesamten Probe aufgezeichnet. Die blaue Kurve zeigt jeweils den Gewichtsverlust in Prozent bei dem jeweiligen Peak. Gesamthaft verdampfen während aller drei Analysen jeweils ca. 30% der Masse der untersuchten Asche bis $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sample: HGB Rütteltest Probe 4
 Size: 7.1020 mg
 Method: 10K-O2-950
 Comment: 10 °C/min unter Luft bis 950 °C

TGA

File: C:\Pascual\2015.02.17 HGB_Probe4.001
 Operator: Alfons pascual
 Run Date: 17-Feb-2015 11:36
 Instrument: TGA Q500 V6.7 Build 203

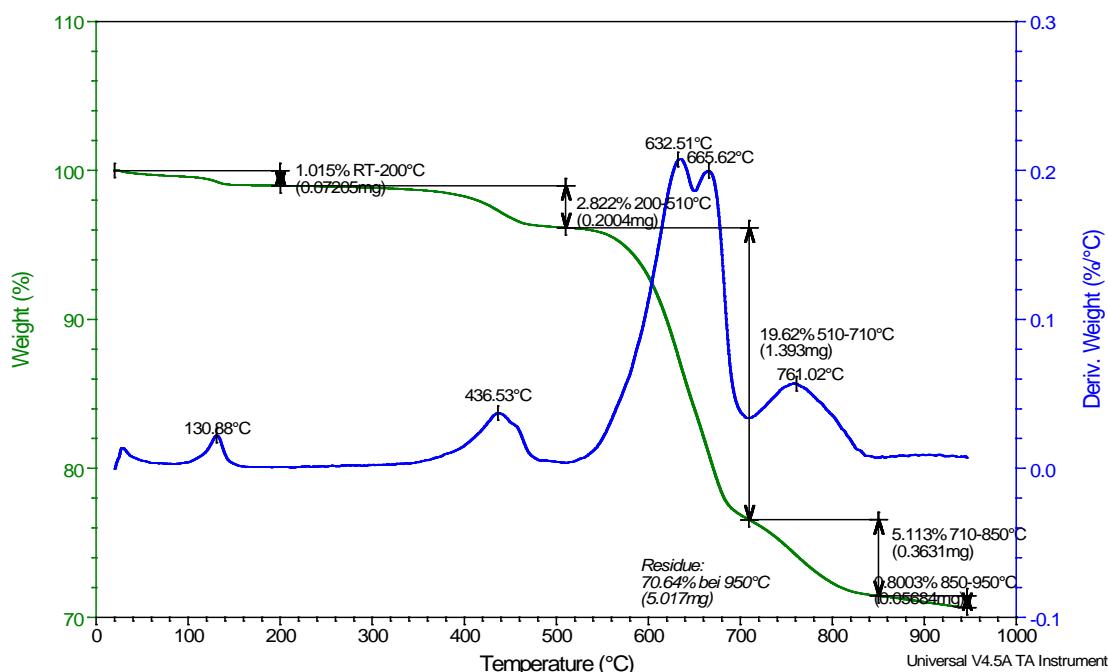


Abbildung 23 TGA Probe 4

Tabelle 6 Zusammenfassung der Ergebnisse der TGA: Asche nach Rütteln

Probe	Peak 1 (Wasser)	Peak 2 (Kohlenwasserstoffe)	Peak 3 (Kohlenstoff)	Peak 4 (Mineralien)	Total brennbar
Probe 2 (7.43 mg)	1.65 % 0.12 mg 130 °C	12.63 % 0.94 mg 439 °C	20.11 % 1.49 mg 644 °C - 670 °C	4.84 % 0.36 mg 710 °C - 870 °C	32.74 %
Probe 3 (7.71 mg)	1.14 % 0.09 mg 130 °C	1.94 % 0.15 mg 439 °C	21.52 % 1.66 mg 647 °C - 673 °C	6.36 % 0.49 mg 710 °C - 890 °C	23.46 %
Probe 4 (7.10 mg)	1.02 % 0.07 mg 130 °C	2.82 % 0.20 mg 436 °C	19.62 % 1.39 mg 632 °C - 665 °C	5.11 % 0.36 mg 710 °C - 850 °C	22.4 %

Es zeigt sich, dass ein hohes Rüttelintervall (> 20 min) angestrebt werden soll, was jedoch noch in Abhängigkeit des Brennstoffmassenstromes getestet werden muss. Prinzipiell zeigen die hier analysierten Ascherückstände, dass je nach Rüttelintervall der Heizwertverlust (mit 0.1 % bis 0.2 %) vernachlässigbar ist.

Auch die Frage, ob die Ascheerweichung von Holz (> 1150 °C) erreicht wurde, konnte positiv beantwortet werden. Versuche, bei denen die Temperatur im Reaktor in verschiedenen Höhen gemessen wurde, haben gezeigt, dass die Temperatur im Bereich von 10 mm über dem Rost bei 800 °C bis 900 °C liegt. Somit ist davon auszugehen, dass die Temperatur der Ascheerweichung nicht erreicht wurde.

Es sind noch weiterführende Analysen der Asche geplant. So sollen verschiedene Brennstoff-Arten verbrannt und analysiert werden, um auch hier Rückschlüsse über den Wirkungsgrad zu gewinnen. Diese Arbeiten sind für Mitte 2015 geplant. Die Ergebnisse werden in der nächsten Phase dokumentiert.

6.11 Untersuchungen Oberflächentemperaturen

Um die Wirksamkeit der Isolation des Gehäuses beurteilen zu können, wurden während des Betriebs Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera (FLIR E40) gemacht. Bei der Betrachtung der folgenden Bilder muss berücksichtigt werden, dass bei den Aufnahmen die Verkleidung des HGB, die ebenfalls eine dünne Isolationsschicht enthält, aufgrund der besseren Zugänglichkeit demontiert war.

Abbildung 24 zeigt den HGB und einen Teil der Brennkammer. Die Oberflächentemperaturen sind gemäss der rechtsstehenden Temperaturskala dargestellt. Die wärmste Stelle mit knapp 280 °C befindet sich bei den Schaugläsern der Brennkammer. Beim HGB ist die Maximaltemperatur im Bereich der eingezeichneten Stelle Sp1. Sie beträgt ungefähr 230 °C. Links neben dem eingezeichneten Punkt sind die Temperaturen auf Grund des IR-Messverfahrens zu kalt dargestellt. An dieser Stelle befindet sich ein Aluminiumklebeband zur Abdichtung des Ascheraumes.

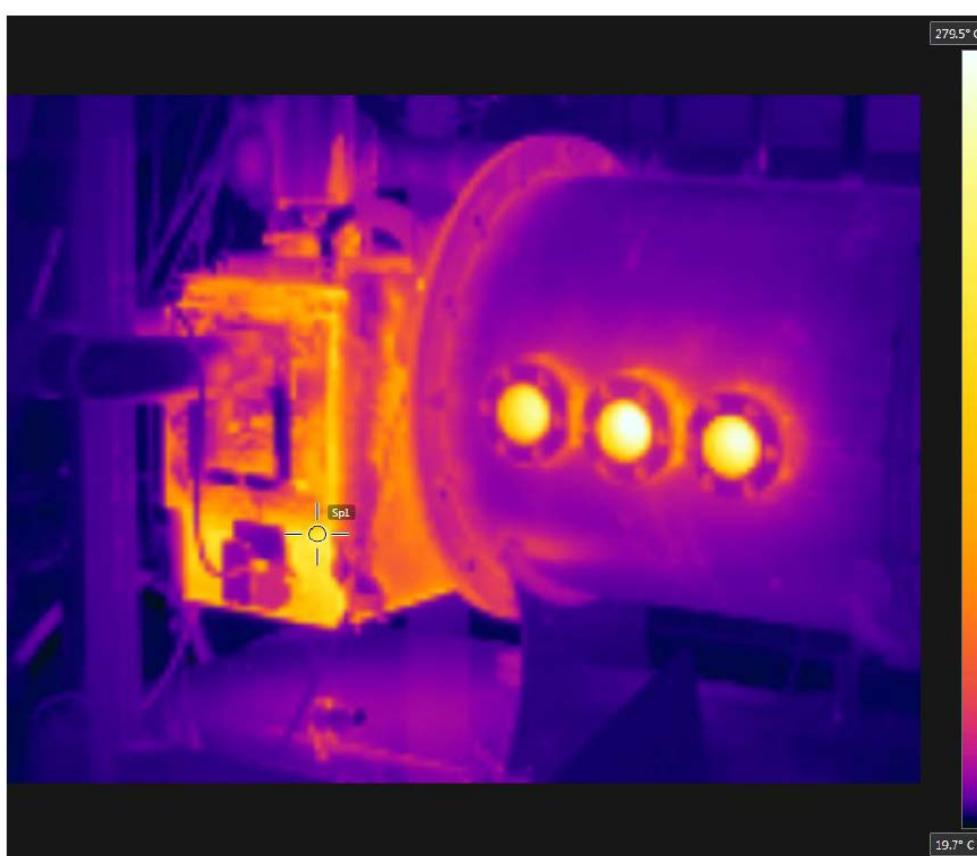


Abbildung 24 Aufnahme mit Wärmebildkamera (Temperaturskala: 20 - 280 °C)

6.12 Kennfeld

Basierend auf den Erkenntnissen der Auswertung ist ein Kennfeld erstellt worden, welches die Brennerleistung in Abhängigkeit der Förderrate und der Gebläse-Einstellung beschreibt. Die gewählten Betriebspunkte weisen Emissionen auf, die unterhalb der definierten Zielwerte von 16 ppm CO und 97 ppm NOx bei 13 Vol. % O₂ liegen. Dazu werden die relativen Abweichungen der normierten CO- und NOx-Emissionen von den jeweiligen Grenzwerten berechnet und daraus der Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert wird im Folgenden als *Emissionskennzahl* bezeichnet. Beim Erstellen des Kennfelds werden nur die Betriebspunkte berücksichtigt, bei welchen die Emissionskennzahl kleiner als 1 ist (siehe Abbildung 25). Das Diagramm zeigt ein Leistungskennfeld für den bestehenden HGB. Darin sind alle Betriebspunkte, welche die gewünschten Emissionswerte einhalten, eingezeichnet. Aus früheren Analysen geht hervor, dass die Förderzeit keine relevante Bedeutung für das System hat. Deshalb wird die Förderzeit hier nicht weiter berücksichtigt. Somit sind zur Definition eines Betriebspunktes nur eine Förderrate und eine Gebläse-Leistung notwendig.

In Abbildung 26 wurde das Kennfeld auf eine Brennerleistung von 25 kW erweitert. Dabei werden ausgehend vom bestehenden Kennfeld alle denkbaren Kombinationen von Gebläse-Leistung und Förderrate, welche die gewünschten Emissionswerte einhalten, dargestellt. Laut diesem Kennfeld sollte mit dem bestehenden Brenner eine maximale Leistung von knapp 25 kW möglich sein. Dazu müsste das Gebläse auf Maximaldrehzahl betrieben werden und eine Förderrate von 0.23 eingestellt werden. Für höhere Brennerleistungen sind in erster Linie ein stärkeres Gebläse und ein grösserer Topf notwendig.

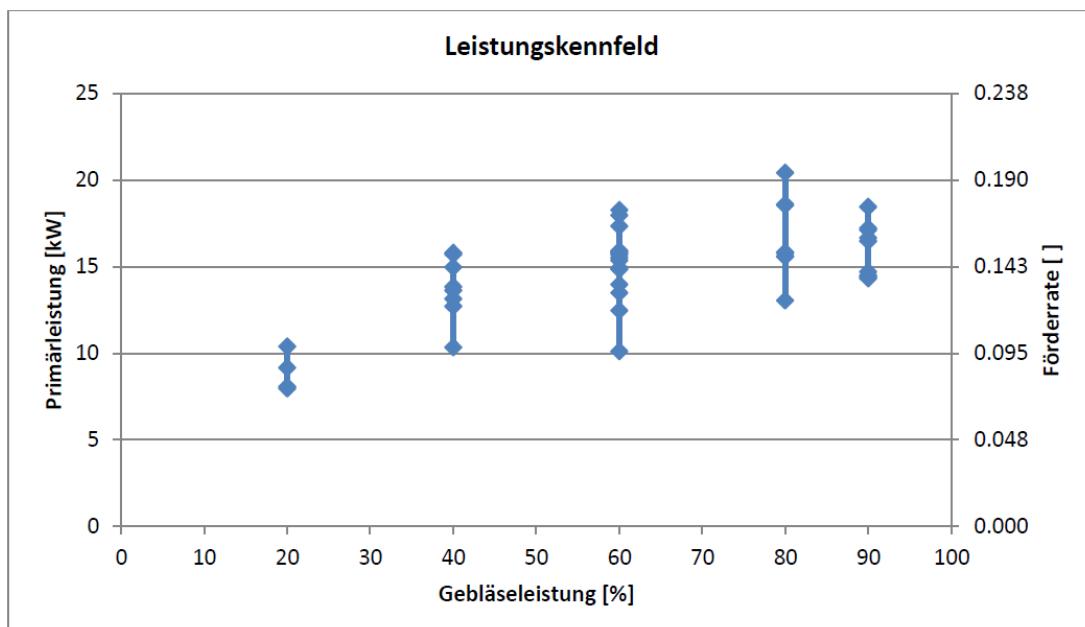


Abbildung 25 Leistungskennfeld

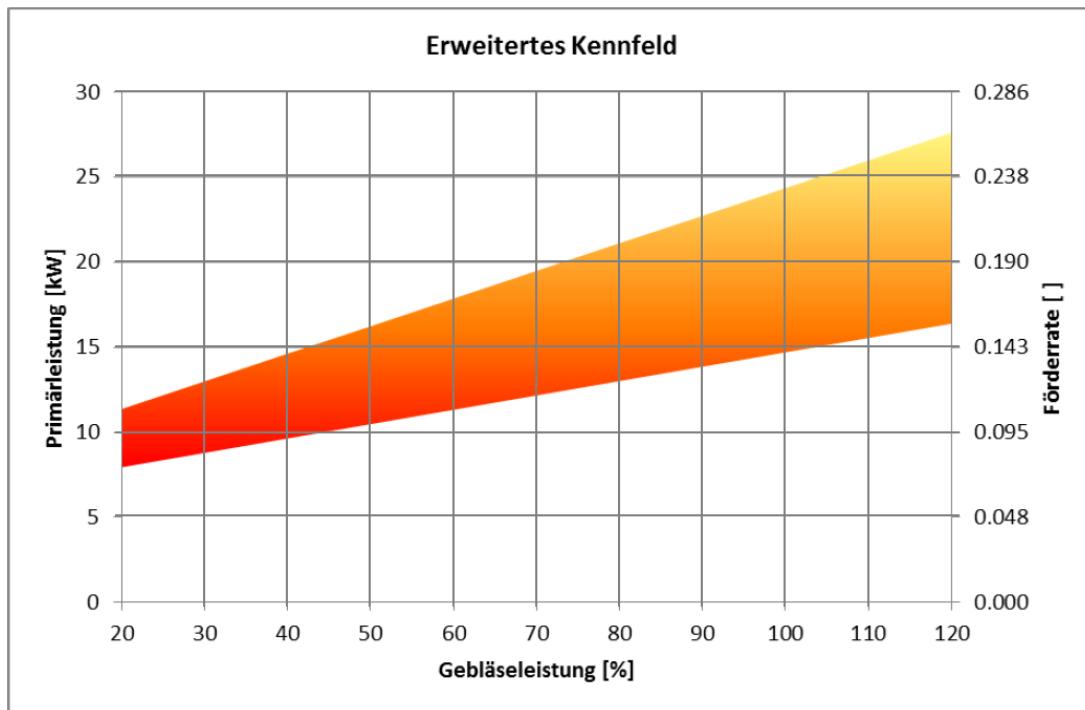


Abbildung 26 Erweitertes Kennfeld

6.13 Start- und Ausbrandphase

Sowohl die Start- als auch die Ausbrandphase können nicht durch die beschriebenen Einstellparameter beeinflusst werden und laufen nach einem voreingestellten Programm automatisch ab.

In der Startphase werden von der Regelung konstante Werte vorgegeben. Diese können aber teilweise auch eingestellt werden. Als erstes werden Pellets über 43 s in den Vergasertopf gefördert, was einer Füllhöhe von max. 2 cm entspricht. Das Gebläse läuft während der Startphase konstant auf 26 % Leistung. Über einen Glühzünder werden die ersten Pellets gezündet. Nach der Flammenbildung werden mit einer Förderdauer von 4 s weitere Pellets nachgespeist. Die „start up“ Phase ist nach 10 Förderzyklen abgeschlossen und die Regelung wechselt zu den eingestellten Parametern.

Die Emissionen, vor allem CO, sind in der Startphase sehr hoch. Wie in Abbildung 27 dargestellt, benötigt der HGB circa 15 Minuten, bis die gewünschten geringen Emissionen erzielt werden können. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden CO-Emissionen am Brennkammer-Austritt zwischen 500 ppm – 2000 ppm ermittelt (gemessen, nicht normiert).

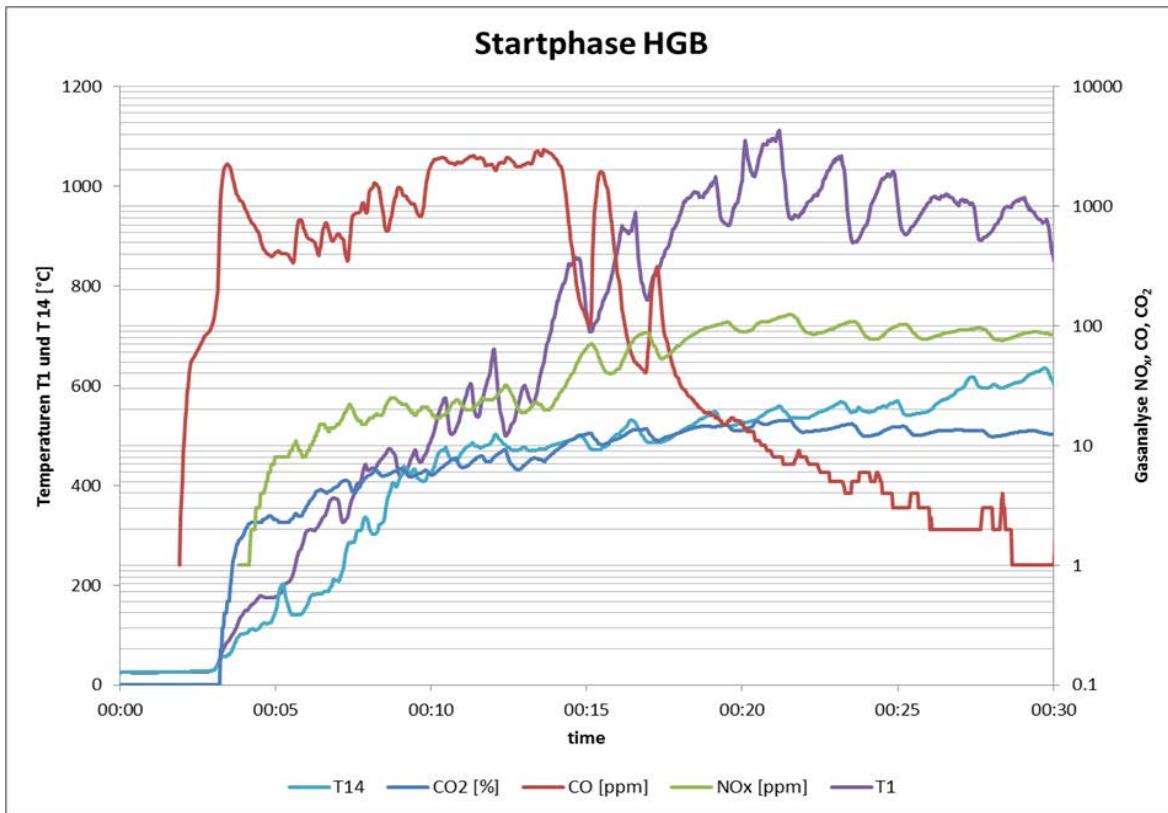


Abbildung 27 Temperatur-Verlauf Startphase Brennkammer (T 1) und Reaktor (T 14)

Der Ausbrand des HGB wird durch ein Abschalten der Pelletzufuhr gestartet. Die Regelung ändert ihren Modus in "Ausbrand" (Gebläse-Leistung wird nicht reduziert). Die CO-Emissionen steigen wieder stark an, da keine saubere Verbrennung mehr stattfindet. Die Pellets werden nur noch im Vergasertopf verbrannt. Die Verbrennung in der Brennkammer findet nicht mehr statt. Der Ausbrand (bis keine Leistung mehr in das System kommt) dauert ca. 12 min. Danach muss der Brenner herunterkühlen. Die aufgenommene Wärme wird durch den Luftzug abgeführt.

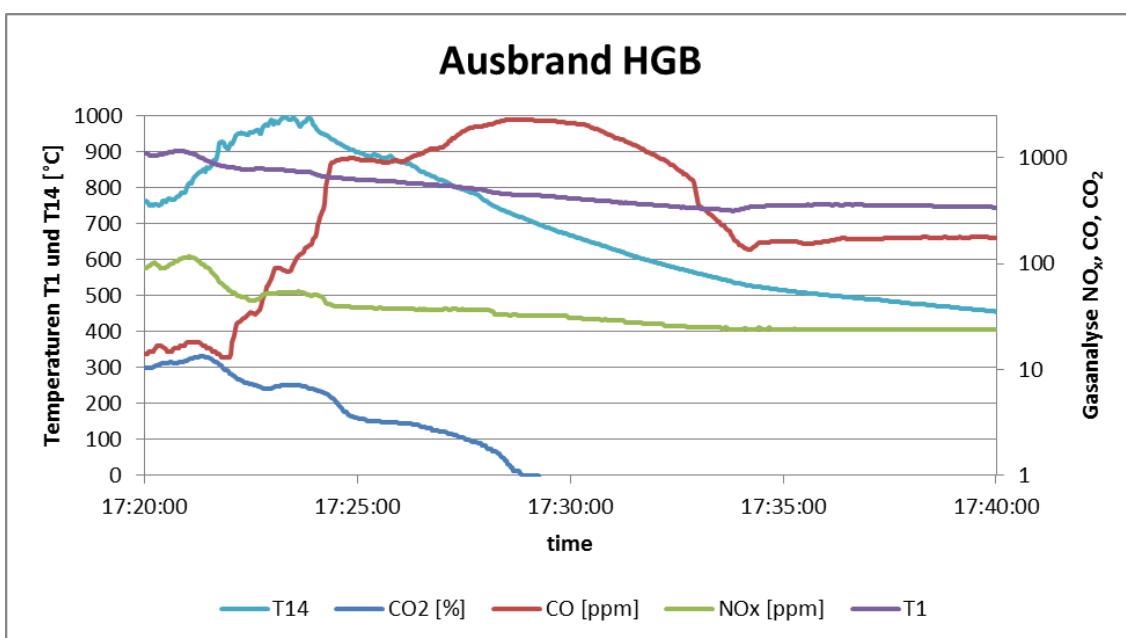


Abbildung 28 Temperatur-Verlauf Ausbrandphase Brennkammer (T 1) und Reaktor (T 14)

6.14 Optimierung der Betriebsphasen (Standard-Holzpellets)

Um die möglichen Betriebsphasen zu optimieren, wurde auf Basis einer Matrix mit verschiedenen Einstell-Parametern getestet. Daraus ergaben sich Brennerleistungen zwischen 5 und 20 kW und Luftüberschusszahlen von 1.3 bis 4.0. Das Primär-und Sekundärluftverhältnis konnte wegen internen Leckagen nicht ausgewertet werden.

Leistung in KW					
		FD			
FR		3	8	12	
0.05	VD 80	5.71	3.46	2.22	
	VD 60	5.15	5.64	4.56	
	VD 40	5.26	7.81	6.91	
0.15	VD 80	15.83	15.57	15.79	
	VD 60	15.69	15.78	15.50	
	VD 40	14.96	15.70	15.79	
0.25	VD 80	20.40	18.58	18.54	
	VD 60	17.33	18.25	17.95	
	VD 40	13.83	13.61	15.33	

Tabelle 7 Messmatrix

Es wurden jeweils drei verschiedene Größen für die Gebläse-Leistung (VD = 80 %, 60 %, 40 %), die Förderrate (FR = 0.05, 0.15, 0.25) und die Förderdauer (FD = 3 s, 8 s, 12 s) variiert. Wie bereits beschrieben, hat die Förderdauer den geringsten Einfluss auf die Messungen. Deshalb sind untenstehend in Abbildung 29 nur die Resultate bei einer Förderdauer von 8 s dargestellt.

Brennerleistung:

Durch die Einstellparameter ist eine Brennerleistung von 5 bis 20 kW möglich. Leistungen unterhalb 8 kW und oberhalb 18 kW haben dabei ein kleines Betriebsfenster und sind nur spezifisch einstellbar.

Lambda:

Die Luftzahl ist im Bereich von 1 bis 4 einstellbar mit dem grössten Betriebsfenster bei Lambda 1.5. Über Lambda 3 ist eine Einstellung sehr schwierig.

NOx-Emissionen:

Es wird ein Grenzwert von 97 ppm angenommen. In Abbildung 29 ist erkennbar, dass dieser Grenzwert bei kleiner und mittlerer Förderrate eingehalten werden kann. Auch eine hohe Gebläse-Leistung ist geeignet, um die gewünschten NOx-Emissionen zu erreichen.

CO-Emissionen:

Es gilt ein Grenzwert von 16 ppm im stationären Bereich und 40 ppm über die gesamte Betriebsphase. Die in Abbildung 29 dargestellten CO-Emissionen wurden während stationären Betriebspunkten ermittelt und normiert. Es ist erkennbar, dass nur bei hoher Förderrate der niedrige Grenzwert eingehalten werden kann. Die Gebläse-Leistung hat keinen Einfluss auf die CO-Emissionen.

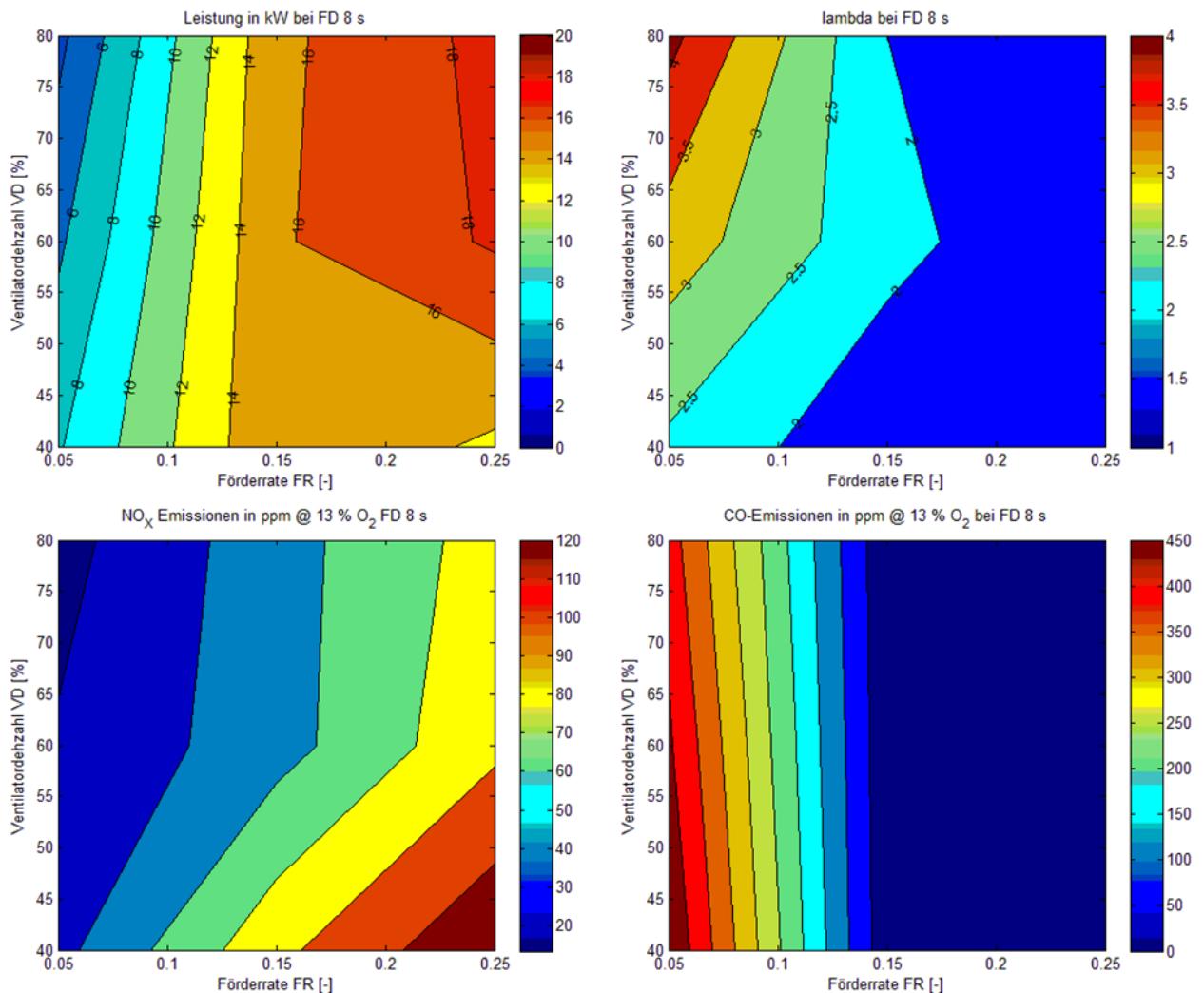


Abbildung 29 Messmatrix: Brennerleistung, Lambda, normierte NOx-und CO-Emissionen

Es wurden noch weitere Messungen durchgeführt, um bei tiefer Brennerleistung (< 10 kW) bessere Emissionen zu erhalten. Diese Messungen ergaben nur für wenige Betriebspunkte zufriedenstellende Ergebnisse und sind nicht dokumentiert.

7 Theoretische Analysen

7.1 Vergaser-Modell

Seit einigen Jahren ist ein genereller Trend zur gestuften Verbrennung zu beobachten. Diese Technik wird auch Vergasertechnik genannt. In einem ersten Reaktionsraum (Vergaserraum) wird das Holz unter Luftmangel entgast, pyrolytisch zerstellt und zu Synthesegas reagiert ($\text{CO} + \text{H}_2$). Im anschliessenden Brennraum wird das erzeugte Holzgas unter Zugabe der Sekundärluft vollständig verbrannt. Dies bietet zwei wesentliche Vorteile:

- Im Vergaserraum herrschen niedrige Strömungsgeschwindigkeiten, wodurch nur wenig Asche mitgerissen wird, was zu niedrigen Staubemissionen führt.
- Die Holzgase können gut mit der Sekundärluft durchmischt werden, was für eine vollständige Verbrennung und damit für niedrige CO- und OGC-Emissionen verantwortlich ist. Die gestufte Verbrennung ist somit das beste Mittel, um die Schadstoffemissionen von Biomassefeuerungen zu vermindern.

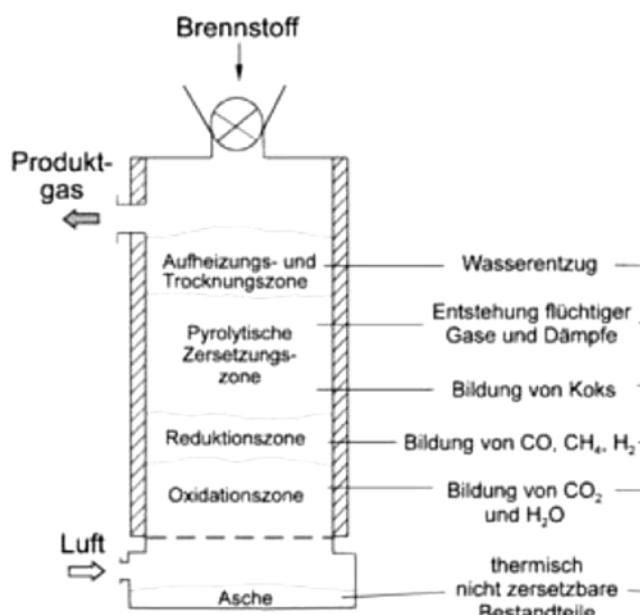


Abbildung 30 Modell der Gegenstromvergasung [8]

In der Literatur werden verschiedenste Vergasertypen beschrieben (Festbettvergaser im Gleichstrom oder Gegenstrom, Wirbelstromvergaser oder Flugstromvergaser). Der Vergasertyp, mit dem der hier untersuchte HGB beschrieben werden kann, ist der Festbettvergaser. Das Holz wird dabei in Form von z.B. Pellets von oben im Gegenstrom zum Vergasungsmittel in den Reaktor eingeführt. In der Literatur ist beschrieben, dass der zu vergasende Brennstoff von oben im Gegenstrom in den Reaktor eingeführt wird und das Vergasungsmittel von unten. Während der Brennstoff ein Bett bildet und im Bett "langsam absinkt", durchwandert er die einzelnen Zonen der Vergasung. "Die verschiedenen Teilprozesse laufen weitgehend räumlich getrennt ab" [8]. Trotzdem kann beim vorliegenden HGB der Fa. Pyro-Man nicht von einem Gegenstromvergaser wie in [8] beschrieben gesprochen werden.

In unseren Untersuchungen wurde erkannt, dass der Prozess, der im HGB während der Vergasung stattfindet, mit den in der Theorie wie in der Literatur hinreichend beschriebenen Modellen nicht eindeutig charakterisiert werden kann.

Ein wesentlicher Unterschied zur Theorie besteht in der Tatsache, dass hier kein Festbett wie im klassischen Modell vorhanden ist. Die Pellets werden zwar von oben über die Brennstoffzufuhr in den Reaktor befördert und fallen im Gegenstrom zum Vergasungsmittel auf den Rost. Ein "Absinken" im Bett, wie in der Literatur beschrieben, ist dabei aber nicht zu beobachten. Deswegen muss davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Phasen der Vergasung, wie in Abbildung 30 beschrieben, zeitliche und örtlich parallel auf dem Rost stattfinden.

Auch die Höhe der Schüttung der Pellets widerspricht dem Modell eines Festbettes. Die Pellets liegen lose in maximal drei Lagen und teilweise mit Lücken auf dem Rost. Es ist davon auszugehen, dass alle Phasen der Vergasung auf dem Rost stattfinden und sich hier örtlich und

zeitlich überlappen. Aus diesem Grund sind in der folgenden Projektphase weiterführende Versuche notwendig.

Nachfolgend soll erläutert werden, wie die vier aus der Literatur bekannten Zonen der Festbett-Vergasung im Gegenstrom (Trocknung, Pyrolyse, Reduktion, Oxidation) durchschritten werden.

- Oxidation: Die Oxidation des Brennstoffes findet auf dem Rost am unteren Ende des Vergasers statt. Hier wird von unten durch den Rost Luft als Vergasungsmittel eingebracht. Die Oxidation liefert die benötigte Energie, um den Prozess der Vergasung aufrecht zu halten.
 - Sauerstoffbedarf für vollständige Oxidation: $\lambda \geq 1$
 - Typische Temperaturen: 800 - 1000 °C
- Reduktion: In der Theorie wie z.B. in [8] beschrieben, befindet sich im Reaktor über der Oxidationszone die Reduktionszone, in der das entstandene CO₂ teilweise zu CO reduziert wird. Oxidation und Reduktion finden im Gleichgewicht statt.
 - Sauerstoffbedarf für Reduktion: $0 < \lambda < 1$
 - Typische Temperaturen: 700 - 900 °C
- Pyrolyse: Während der pyrolytischen Zersetzung werden die organische Verbindungen (Lignin, Zellulose, Hemicellulose) thermo-chemisch aufgespalten und dadurch kleiner
 - Sauerstoffbedarf für Pyrolyse: $\lambda = 0$
 - Typische Temperaturen: 450 - 600 °C
- Trocknung: In der Trocknung- und Aufheizphase wird dem von oben nach unten fallenden Brennstoff Wasser entzogen. Er wird durch das von unten nach oben strömende heisse Produktgas aufgewärmt. Das Produktgas verlässt relativ kalt mit 100 °C - 200 °C den Reaktor

Unter Berücksichtigung der oben erwähnten Grundlagen aus der Theorie und der Überlegung, dass sich die einzelnen Pellets lose verteilt auf dem Rost befinden, ist davon auszugehen, dass alle Teilschritte der Vergasung einzeln pro Pellet von aussen nach innen stattfinden. In Abbildung 31 sind die einzelnen Schritte sehr vereinfacht dargestellt. Real werden fliessende Übergänge vorherrschen und die Schichten werden, je nach Beschaffenheit und Feuchtegehalt der Pellets, unterschiedlich stark sein. Es wurden acht verschiedene Schritte definiert:

- Schritt 1: Beim Startvorgang wird über eine Zündquelle Wärme eingebracht, wodurch die Pellets von aussen nach innen trocknen. Im Lastbetrieb wird diese Wärme durch die schon auf dem Rost befindlichen oxidierten Pellets und die heisse Umgebung bereitgestellt.
- Schritt 2: Die äussere Schicht der Pellets ist bereits getrocknet und eine erste Pyrolyse setzt ein. Es muss weiterhin maximale Wärme von aussen zugeführt werden. Obwohl Primärluft mit $\lambda < 1$ zur Verfügung steht und eine partielle Oxidation möglich wäre, ist es für eine Verbrennung noch zu kalt. Während der Pyrolyse entstehen Kohlenwasserstoffe und in kleinen Mengen CO (sichtbare Rauchentwicklung).
- Schritt 3: Die Pellets werden weiter zur Mitte hin getrocknet. Auch die Pyrolyse schreitet weiter nach innen. In der äusseren Schicht der Pellets beginnt nun die Reduktion. Es muss hierbei weiterhin Wärme von aussen zugeführt werden, allerdings liefert nun auch der Vergasungsprozess einen Teil der benötigten Wärme. Die Produktion an brennbaren Gasen erhöht sich.
- Schritt 4: Nun ist auch der Kern der Pellets getrocknet und Pyrolyse und Reduktion dringen weiter nach innen. Mittlerweile ist die Temperatur am Pellet hoch genug, um die eigentliche Oxidation zu starten. Es muss nun keine Wärme von aussen mehr zugeführt werden. Die durch die Oxidation der Pellets freigesetzte Wärme hält den Prozess aufrecht und entzündet neu zugeführte Pellets. Da die Vergasung unter Luftpangel betrieben wird, kommt es zu keiner vollständigen Verbrennung. Oxidation und Reduktion mit der Produktion von CO₂ und

brennbaren Gasen (CO , H_2 , $\text{CH}_4\ldots$) stehen in einer Art Gleichgewicht (nun maximale Ausbeute). Dies bestätigt auch Tabelle 9 mit einer Auflistung der Holzgaszusammensetzung. Bei $\lambda = 0.35$ entstehen immer noch 13 % CO_2 . Dies bestätigt, dass im Lastbetrieb trotz Luftmangel teilweise eine vollständige Oxidation stattfindet (Holz enthält ca. 40% gebundenen Sauerstoff).

- Schritt 5 bis Schritt 8: Die Oxidation schreitet weiter nach innen vor und die äussere Schicht der Pellets verbrennt. Es verbleibt Asche. Es wird weiterhin Wärme frei und Produktgas mit CO_2 erzeugt, allerdings beides mit abnehmender Tendenz. Beobachtungen auf dem Rost haben gezeigt, dass die Asche meist nicht in sich zusammenfällt, sondern dass die Struktur des Pellet bestehen bleibt bis dieses vollständig umgesetzt ist. Erst wenn neue Pellets von oben auf dem Rost fallen, werden die Aschepellets zerstäubt.

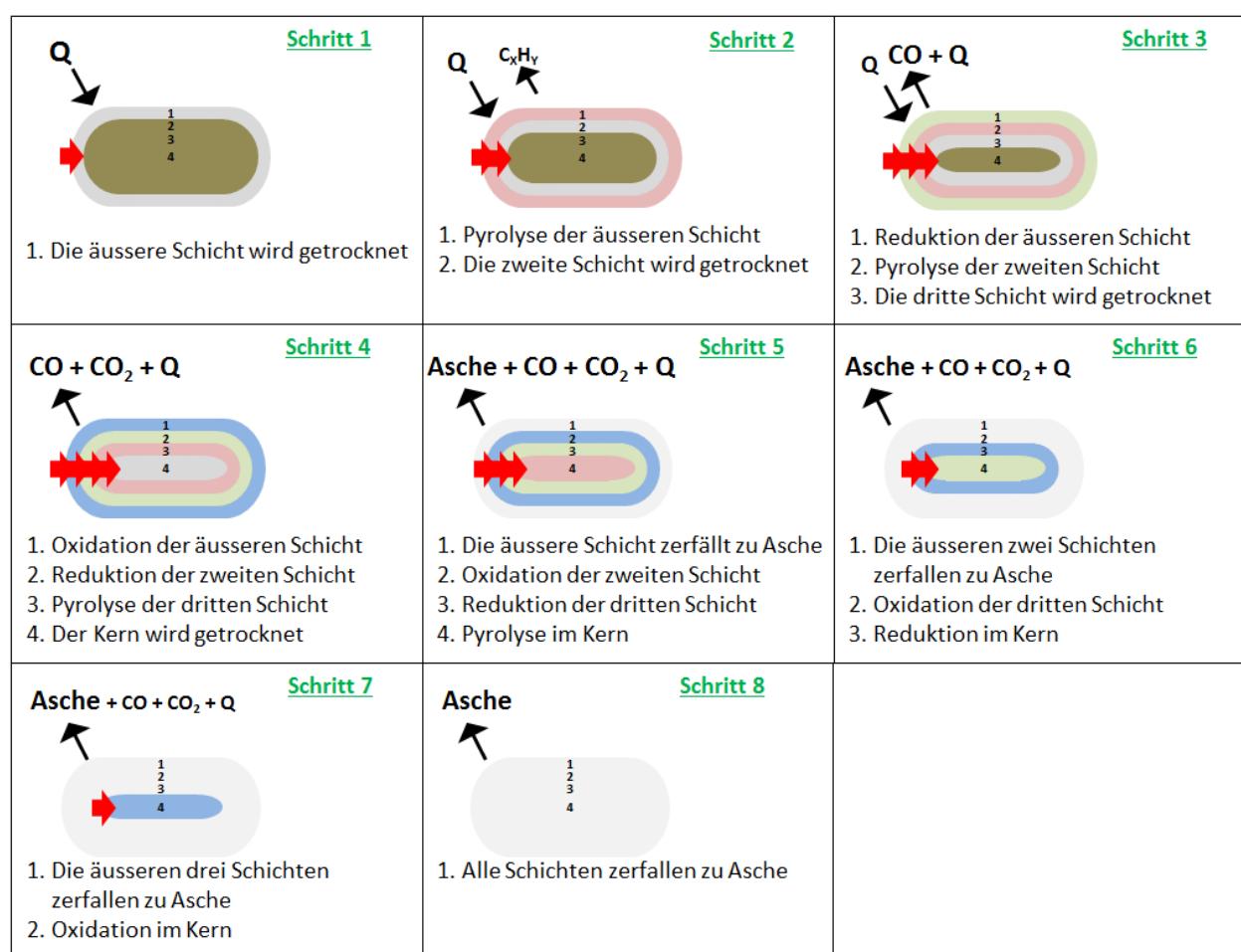


Abbildung 31 Vorgänge im Pellet während der Vergasung

Im Folgenden werden die vier wichtigen Betriebszustände "Start-Phase", "Voll-Last", "Teil-Last" und "Stopp-Phase" betrachtet. Mit einer zusätzlichen schematischen Darstellung (siehe Abbildung 32) soll gezeigt werden, wie sich die Vorgänge "Füllen" und "Rütteln" in den einzelnen Betriebszuständen zeitlich darstellen. Zur Ergänzung wurden hier auch die Qualität des Holzgases (100% als grösste mögliche Ausbeute) und die Emissionen während dieser Vorgänge als Trend aufgetragen.

Startphase: Trocknung

Frische Pellets werden über 43 Sekunden von oben in den Reaktortopf eingebracht und fallen auf den Rost. Die Höhe der Schüttung der frischen Pellets im Vergasertopf liegt bei ca. 16 mm. Mit einem Glühzünder werden die ersten Pellets gezündet und der Vergasungs-Prozess startet bei den ersten gezündeten Pellets. Diese werden im weiteren Verlauf die restlichen Pellets auf dem Rost zünden. Der Startvorgang dauert ca. 12 Minuten. Vor allem die Kohlenwasserstoff-Emissionen sind in dieser Zeit sehr hoch.

Voll-Last: Trocknung / Pyrolytische Zersetzung / Reduktion / Oxidation

Wird der HGB in Voll-Last-Modus betrieben, findet man alle Phasen der Vergasung auf dem Rost wie in Abbildung 31 beschrieben. Manche Pellets werden getrocknet, manche befinden sich bereits im Stadium der Pyrolyse oder Reduktion und andere werden schon oxidiert. Die Pellets verlieren dabei an Masse und Volumen und fallen langsam in sich zusammen. Es bildet sich ein „Pellet-Koks-Bett“ mit Glut und Asche. Die Pellets in der Oxidationsphase liefern die für den Vergasungs-Prozess benötigte Energie.

Bei Voll-Last überwiegt dieser Zustand der Phasen auf dem Rost, da in kleinen Abständen von 12 Sekunden neue Pellets gefördert werden und sich somit immer alle drei möglichen Zustände der Pellets (frische Pellets, Glut und Asche) auf dem Rost befinden. Durch das regelmässige Nach fördern von frischen Pellets liefert der Prozess im Vergasertopf eine gleichmässig hohe Qualität an Holzgas. Im Vergleich zur Teil-Last sind keine nennenswerten Schwankungen in der Qualität erkennbar. Auch die Emissionen sind stabil und keinen grossen Schwankungen unterlegen.

Teil-Last: Reduktion und Oxidation

Bei Teil-Last werden Pellets in grösseren Abständen von 30 Sekunden gefördert. Durch das Glühen der Pellets während der Oxidation öffnet ein Infrarotsensor in der Regelung die Freigabe für die weitere Pelletzufuhr. Bei Teil-Last kann es durch das weite Fortschreiten des Vergasungs-Prozesses zu sichtbaren Zyklen in der Qualität des Holzgases kommen, da nun nicht mehr alle Zonen der Vergasung auf dem Rost vorkommen. Dadurch treten hier Schwankungen auf, die sich in schwankenden und teilweise hohen Emissionen wiederspiegeln.

Auch während der Stopp-Phase findet man ähnliche Bedingungen auf dem Rost wie hier beschrieben. Sobald der HGB abgeschaltet werden soll, werden keine neuen Pellets mehr gefördert. Der Vorgang des Abschaltens dauert ca. 15 Minuten, bis auch die letzten Pellets verglüht sind. Zu erkennen ist auch, dass die Verbrennung gegen Ende der Stopp-Phase nicht mehr in der Brennkammer stattfindet sondern das die Pellets direkt auf dem Rost verbrennen, weil für den verbleibenden Brennstoff nun genügend Sauerstoff vorhanden ist.

Rütteln

Durch das Rütteln fällt die Asche in den Aschebehälter und grosse glühende Pellets bleiben auf dem Rost zurück. Ab einer bestimmten Grösse können auch kleine noch glühende Pellets durch das Rütteln ebenfalls durch den Rost fallen und verglühen im Aschekasten. Hier sollen in Projektphase II weitere Tests mit verschiedenen Lochmustern durchgeführt werden, um das Optimum von Lochgrösse zu Luftwiderstand und Auflagefläche zu ermitteln.

Füllen

In regelmässigen Abständen bzw. nach dem Rütteln werden neue Pellets gefördert. Sie fallen auf das vorhandene Glutbett aus Pellets, welche sich in den verschiedenen Stadien der Vergasung befinden. Je nach Förderdauer (Brennerleistung) ergibt sich eine Schütt Höhe von 4 bis 16 mm. Die Glut entzündet die neuen Pellets und der Vergasungs-Prozess beginnt mit dem Trocknen der ersten neuen Pellets. Dadurch kann man davon ausgehen, dass im Reaktor bei Voll-Last zu jeder Zeit alle Zonen der Vergasung parallel stattfinden.

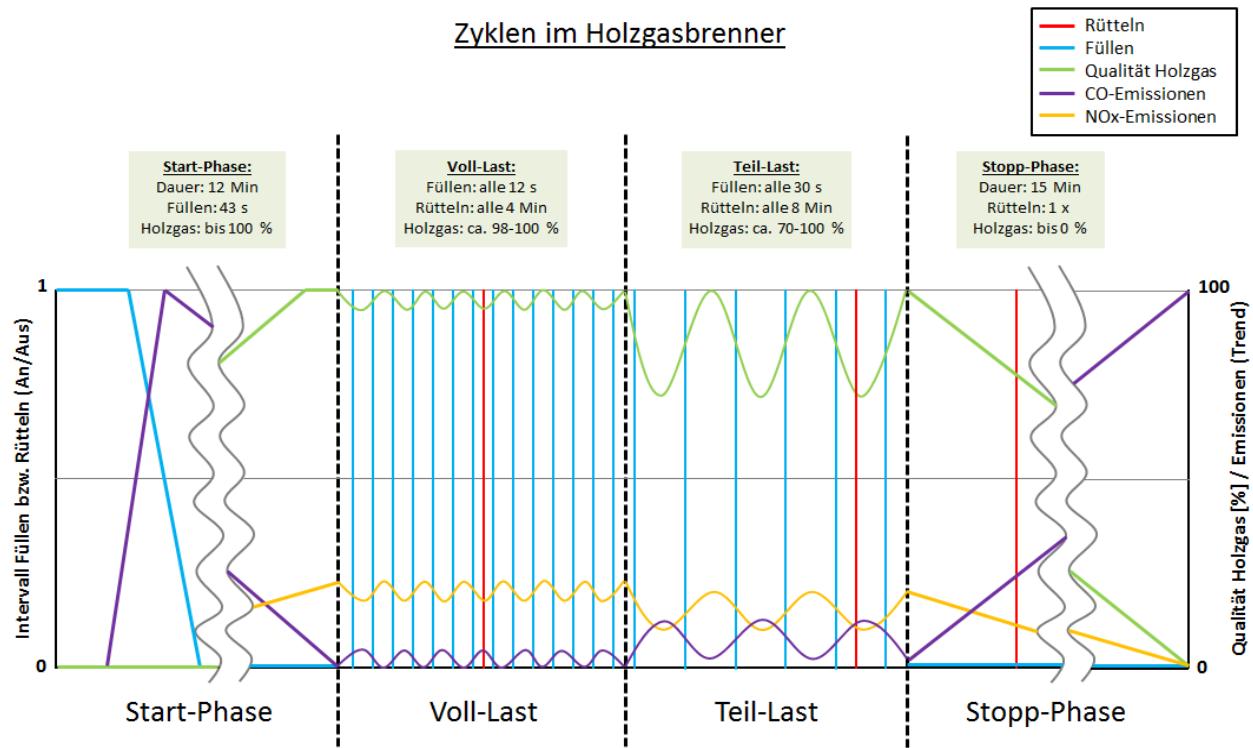


Abbildung 32 Zyklen im Holzgasbrenner

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zur Gegenstromvergasung im Festbett ist, dass man im HGB wie oben beschrieben Zyklen in der Qualität des Holzgases durch das Füllen des Brennstoffes erkennen kann (siehe Abbildung 32). In der Theorie wird beschrieben, dass beim Festbettvergaser der Brennstoff kontinuierlich in den Reaktor eingebracht wird. Durch diese Förderung und durch die sich einstellende Höhe des Festbettes haben eventuelle Schwankungen der Festbett-Höhe keinen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Holzgases. Im vorliegenden HGB wird der Brennstoff in Zyklen in den Reaktor gefördert. Dies ist zum einen notwendig, um ihn im Notfall schnell abstellen zu können. Durch die geringe Schütt Höhe an Pellets kann der HGB innerhalb von ca. 15 Minuten abgestellt werden. Zum anderen wäre die Überwachung des Prozesses mit Hilfe des Flammensensors nicht mehr möglich. Momentan ist der Vergaser so geregt, dass Pellets in den Reaktor gefördert werden, sobald der Flammensensor die Glut bzw. Flamme im Aschekasten erkennt.

Auch mit Hilfe von Temperaturmessungen am Rand und in der Mitte des Vergasertopfes konnte belegt werden, dass es keine klar definierten Zonen im Vergaser gibt. So können an allen im Vergasertopf vorhandenen Thermoelementen Temperaturen zwischen 750 °C und 950 °C gemessen werden (siehe Abbildung 33), was der Theorie nach typischen Temperaturen während der Vergasung bzw. Reduktion entspricht. Auch die gemessenen Temperaturen am Austritt des Vergasers von > 600 °C entsprechen nicht der Theorie von 100 - 200 °C Gastemperatur wie in [8] beschrieben am Ende des Prozesses.

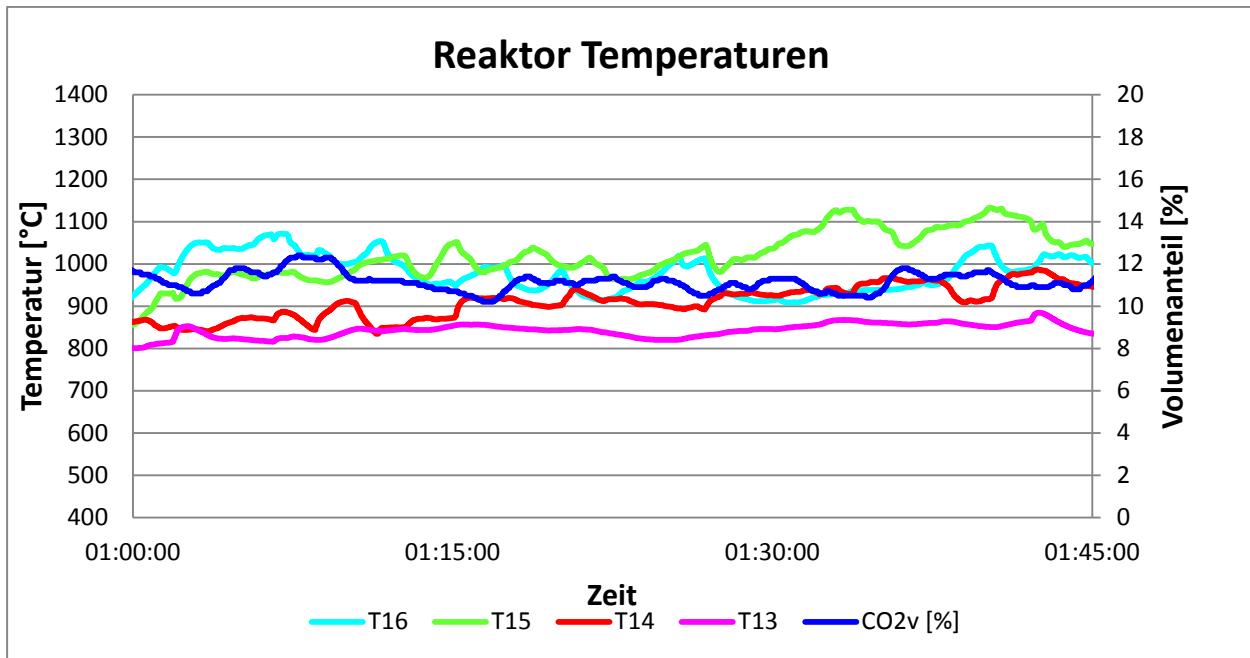


Abbildung 33 Gemessene Reaktortemperaturen mit Pelletzufuhr

Die in Abbildung 33 beschriebenen Messpunkte befinden sich dabei im folgenden Abstand vom Rost: T16 = 10 mm; T15 = 40 mm; T14 = 60 mm; T13 = 80 mm. Es wird in diesem Fall alle 12 s Brennstoff gefördert.

7.2 Analyse des Holzgases

Es wurde eine Thermogravimetrie von Holzpellets durchgeführt und als Grundlage für ein „Vergasungsmodell“ verwendet. Bei dieser Analyse (siehe Abbildung 34) wurde die Gewichtsabnahme der Holzpellets temperaturabhängig betrachtet und parallel zur Vergasung eine thermogravimetrische Analyse durchgeführt. Bis 600 °C wurde unter Stickstoffatmosphäre erhitzt, um den unterstöchiometrischen Vergasungsprozess zu erkennen. Die restliche Masse (ca. 16 %) wurde dann mit Sauerstoff oxidiert. Der gemessene Wassergehalt befand sich mit 6 % unter dem maximalen Normwert von 10 %.

Im weiteren Projektverlauf soll in Phase II die Zusammensetzung des Holzgases (Synthesegas) in Funktion des Primär-Luftüberschusses und Wassergehaltes der Pellets untersucht werden. Diese Analyse soll mit verschiedenen Brennstoffen (Pellets aus verschiedenen Holzarten) durchgeführt werden und ist für Mitte 2015 geplant.

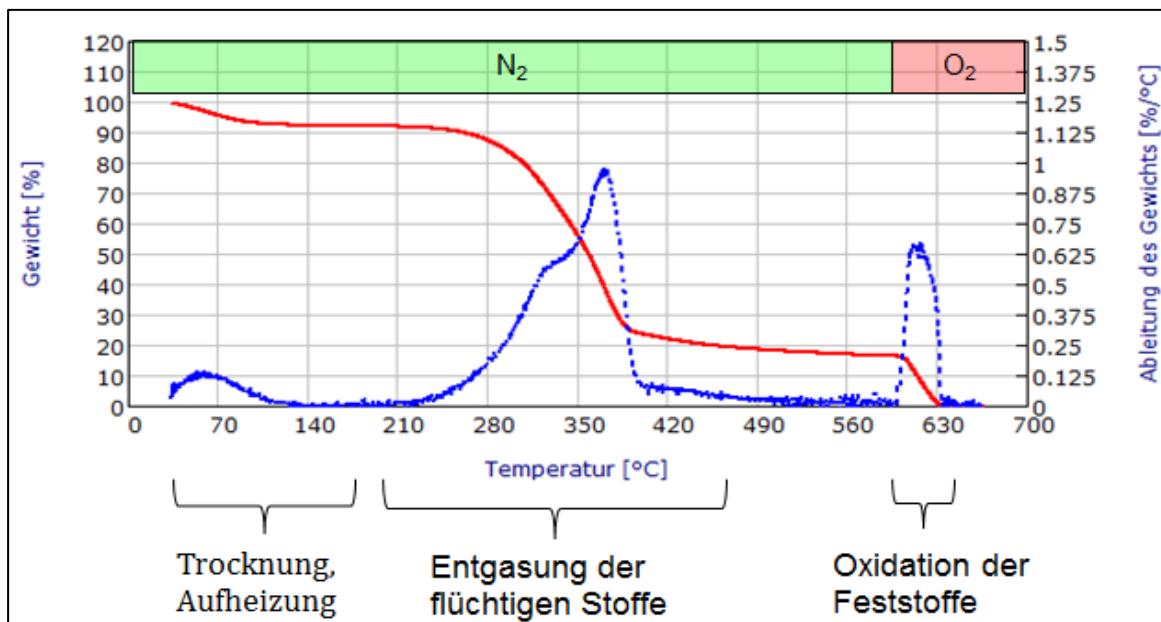


Abbildung 34 Thermogravimetrische Analyse während thermodynamischer Zersetzung

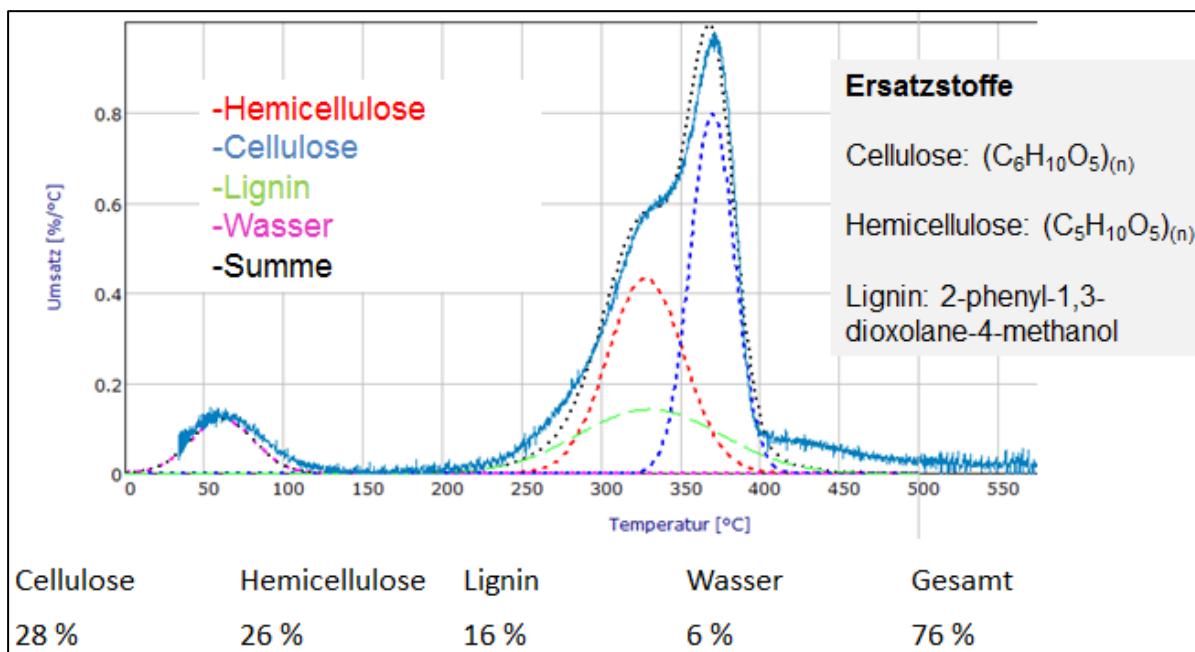


Abbildung 35 Vergasung der einzelnen Hauptkomponenten

Mit bekannter Massenzusammensetzung des Holzes aus Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Wasser konnte der Gewichtsverlauf der Thermogravimetrie nachgebildet werden. Da sich diese Hauptkomponenten parallel und unabhängig voneinander zersetzen, wurden einzelne Gausskurven für die jeweiligen Stoffe gebildet und die Summe davon der gemessenen Gewichtskurve angenähert (siehe Abbildung 35).

Aus dieser Zusammensetzung kann nun mit Hilfe von Ersatzstoffen und angenäherten physikalischen Parametern die notwendige Energie und der temperaturabhängige Verlauf der Pyrolyse nachgebildet werden. Damit lassen sich Abschätzungen über die Holzgaszusammensetzung machen und mit Messungen am Brenner verifizieren.

Physikalische Parameter:

Tabelle 8 Physikalische Parameter [6]

	Wasser	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
Chem. Formel	H_2O	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$	$(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4)_n$	
Molekulargewicht	18.015	162.14	150.13	180.2
M_calc*	18	162	132	180
Schmelz-Temp [K]	273.15	409.1	386.39	349.5
Schmelz-Temp Tm [°C]	0	135.95	113.24	76.35
Schmelz-Enthalpie [kJ/mol]		34.801	16.778	30.749
Siede-Temp [K]	373.15	675.13	729.39	611.57
Siede-Temp Ts [°C]	100.0	401.98	456.71	338.42
Verdampf-Enthalpie [kJ/mol]		87.25	98.996	65.777
Massenanteil	10.0%	32.5%	33.8%	23.8%

*theoretisches Molekulargewicht des reinen Ersatzstoffes.

Aus den in Tabelle 8 dargestellten physikalischen Parametern kann der Energiebedarf für die Pyrolyse ausgerechnet werden. Es ist zu beachten, dass die Primärluft zum Teil ebenfalls erwärmt werden muss. Um diese Stoffe zu verdampfen und auf 500 °C zu erwärmen sind 2'968 kJ/kg Pellet erforderlich. Davon entfallen für das Wasser 12 %, für das Holz 47 % und für die Luft 41% der benötigten Energie.

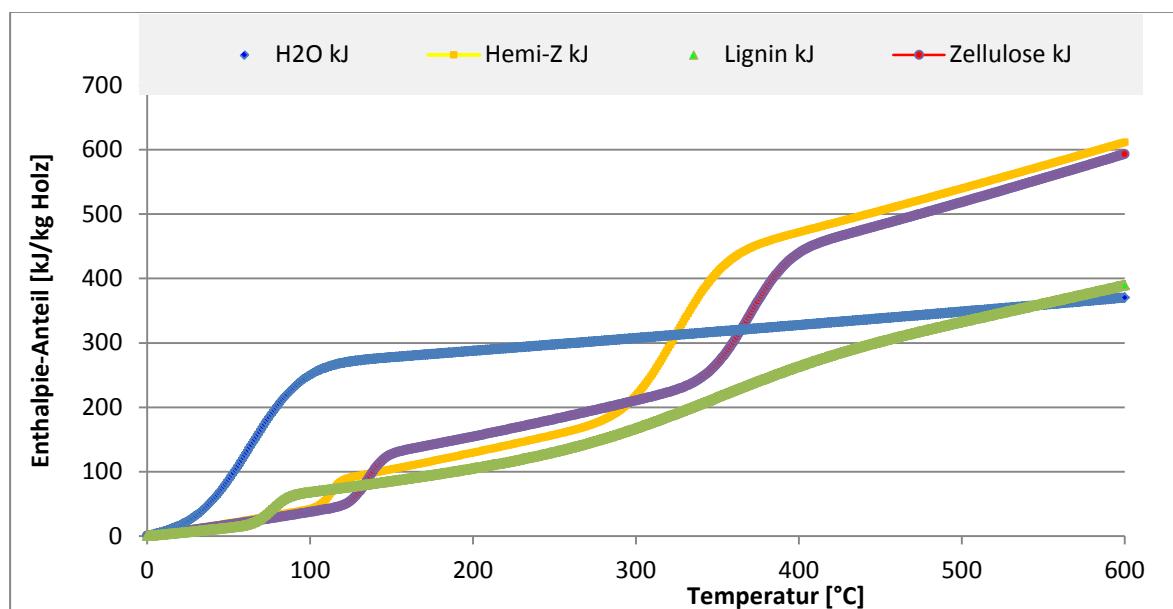


Abbildung 36 Energiebedarf für die Erwärmung und Verdampfung der entsprechenden Komponenten

Holzgaszusammensetzung:

Das Holzgas besteht aus O₂, CO, CO₂, CH₄, H₂ und Kohlenwasserstoffen. Die Konzentration der jeweiligen Komponenten ist je nach Luftüberschuss wie folgt zusammengesetzt:

Tabelle 9 Holzgas bei verschiedenem Lambda λ

λ	H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	Q-Vergaser	H _U -Holzgas	L _{prim}	L _{sek}
	%	%	%	%	%	kJ/kg	kJ/kg	m ³	m ³
0.45	13.7	19.0	9.0	5.2	6.0	6'554	8'988	1.73	5.18
0.33	15.9	12.4	21.1	6.0	7.2	4'062	11'481	1.26	5.65
0.65	15.0	20.0	4.3	2.7	3.2	9'800	5'742	2.49	4.42
0.35	11.5	12.6	15.7	3.7	12.9	4'130	11'413	1.34	5.57

Die ersten 3 Fälle in Tabelle 9 sind einzelne Messpunkte abhängig von den Einstellungen. Die letzte Zeile zeigt Werte aus der Literatur für $\lambda = 0.35$.

Aus der Zusammensetzung des Holzgases kann auch die bereits umgesetzte Energie berechnet werden, sowie der Heizwert des Holzgases. Das Verhältnis von CO zu CO₂ zeigt an, wie gut der Vergasungsprozess abläuft. Dabei ist zu beachten, dass sich ein Gleichgewicht zwischen CO und CO₂ einstellt, welches abhängig von der Temperatur ist. Diese Gleichgewichtsberechnungen müssen noch durchgeführt und in das Vergasermodell einbezogen werden.

Die Holzgas-Atmosphäre kann Auswirkungen auf die Lebensdauer des Materials haben. Hier sind zwei unterschiedliche Komponenten ausschlaggebend. Zum einen ist das Holzgas sehr kohlenstoffhaltig, was zum Aufkohlen von Stahl führen kann (z.B. bei der Instrumentierung). Zum anderen ist das Holzgas sehr arm an Sauerstoff. Diese reduzierende Atmosphäre kann dazu führen, dass Keramik zersetzt wird (z.B. vom Vergasertopf).

7.3 Luftstrahlpumpe

In einem ersten Schritt wurde das Modell der Luftstrahlpumpe in der Simulation mit CFD als Modell verwendet, um die Strömungen der Sekundärluft im Brenner zu verstehen. Dabei wurde von einer symmetrischen Anordnung aller Komponenten ausgegangen. Im realen HGB tritt die Sekundärluft seitlich neben dem Vergasertopf in die Aussenkammer des Vergasers ein und erzeugt einen Sog. Dieser Sog saugt das Holzgas aus dem Vergasertopf und führt dieses gemischt mit Sekundärluft durch ein Verbindungsstück (Venturi-Düse) in die Brennkammer, wo es verbrennt. Um das Prinzip der Luftstrahlpumpe mit CFD zu simulieren, wurde ein 2-dimensionales vereinfachtes Modell von Brenner und Brennkammer mit symmetrischer Anordnung verwendet.

In Abbildung 37 sieht man (von links nach rechts) den Brenner inklusive Vergasertopf als einen vereinfachten Raum, die Venturi-Düse als Übergang von Vergaser zu Brennkammer, die Enddüsung der Sekundärluft als Luftstrahlpumpe und die Brennkammer in symmetrischer Anordnung. Das System ist nur bis zur Mittelachse dargestellt; die untere nicht dargestellte Hälfte verhält sich identisch zur oberen. Das Modell zeigt, dass die Sekundärluft und das Holzgas aus dem Vergaser beim Eintritt in die Brennkammer (in der kalten Simulation ohne Flamme) gemischt sind.

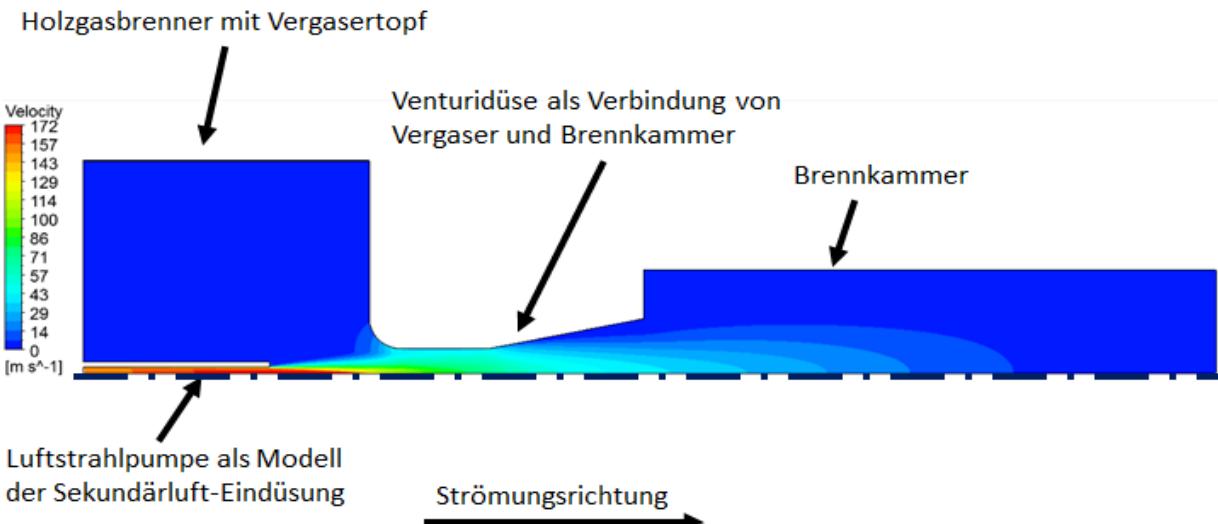


Abbildung 37 2D CFD Luftstrahlpumpe: Geschwindigkeiten

7.4 Pyro-Man Strömung

In einem zweiten Schritt wurden weiterführende, sehr umfangreiche CFD Berechnungen durchgeführt, bei denen die Luftführung und Durchmischung von Primärluft, Holzgas und Sekundärluft der aktuellen Ausführung des HGB im kalten Zustand analysiert wurde.

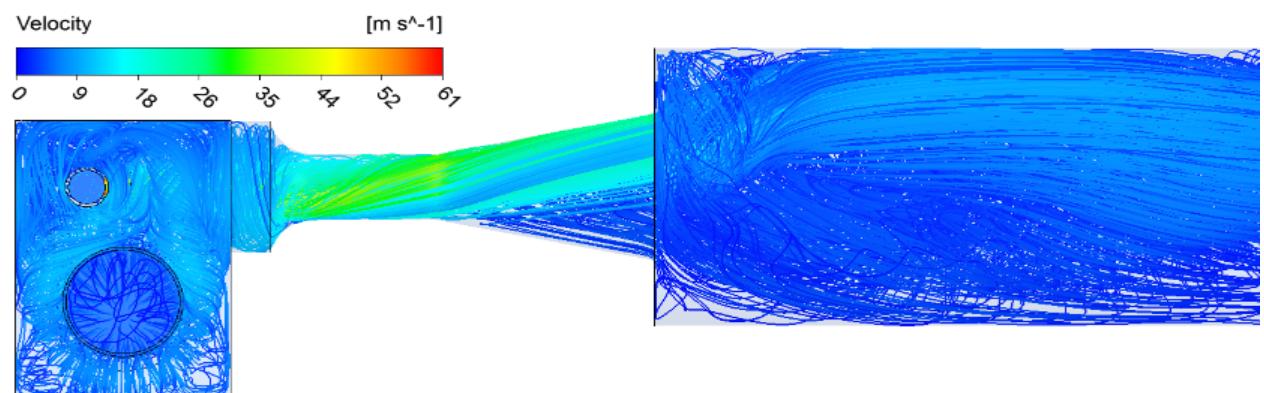


Abbildung 38 CFD Geschwindigkeiten Holzgas und Sekundärluft

Ein Schwerpunkt der CFD-Analyse war die Berechnung der Ausströmung des Holzgases aus dem Vergasertopf. Hier ist vor Allem die Frage relevant, wie gleichmäßig das Gas aus dem Topf ausströmt. In den Analysen ist ein asymmetrischer Austritt erkennbar. Dies hat keinen Einfluss auf den Abbrand über dem Rost, da die Pellets wie ein Gleichrichter für die Primärluft funktionieren. Der asymmetrische Austritt ist nicht zu verhindern und hat als einzigen Nachteil die asymmetrische Alterung bzw. asymmetrischen Verschleiss bestimmter Bauteile.

Fazit aus der CFD Analyse:

- Die Sekundärluft wird nicht mittig in die Brennkammer geleitet.
- Das aus dem Vergasertopf austretende Holzgas strömt an der der Sekundärluft zugewandten Seite schneller aus. Der asymmetrische Austritt ist nicht zu verhindern und einen asymmetrischen Verschleiss bestimmter Bauteile zur Folge. Die CFD-Analyse zeigt eine weitgehend optimale Anordnung des heutigen Brenneraufbaus.
- Möglichkeiten zur höheren Leistungsvariation des Brenners mit 2 konzentrischen Düsen sollen untersucht werden

8 Funktions-Analyse

8.1 CAD und CFD

Der gesamte Brenner wurde vermessen und per CAD erfasst. Es liegen nun detaillierte 3D-Modelle des Brenners mit allen Bestandteilen vor, die für CFD Simulationen und eine spätere Optimierung des Brenners verwendet werden können. Die 3D-Modelle wurden bereits genutzt, um erste Strömungsanalysen (CFD) ohne Flammen und in kaltem Zustand zu erstellen.

8.2 Systemanalyse

In einem ersten Schritt der Systemanalyse wurde der HGB in neun Baugruppen unterteilt [5]. Für jede Baugruppe wurden Funktion, Anforderungen sowie Einflüsse und Abhängigkeiten zwischen den Baugruppen beschrieben und bewertet (Tabelle 10). Durch diese Bewertung lässt sich ablesen, welche Baugruppen einen starken Einfluss auf andere Baugruppen haben und welche von den anderen Baugruppen stark beeinflusst werden.

Weiter wurden die Stärken und Schwachstellen des Systems HGB analysiert (Tabelle 11). Hier wurden Regelbarkeit, Emissionen, Temperaturen Innen und Aussen inkl. Isolation, Eindüsung der Luftströme, Förderung der Pellets, Ascheaustrag und Verschmutzung betrachtet. Diese wiederum bildeten im weiteren Projektverlauf die Grundlage für konkrete Verbesserungen im Design des HGB unter Berücksichtigung ihrer Abhängigkeiten zueinander. Diese Systemanalyse wurde im Projekt-Team unter Einbezug des potenziellen Herstellers Fa. Liebi LNC erarbeitet.

Folgende Messresultate und Beobachtungen wurden in [5] dokumentiert:

- Die Brennerleistung ist von der Förderrate abhängig
- Die Brennerleistung kann momentan von ca. 6 bis 18 kW moduliert werden
- Mit steigender Brennerleistung nimmt die Temperatur in der Brennkammer zu
- Bei Brennerleistungen kleiner 8 kW wurden hohe CO-Emissionen von bis zu 730 ppm bei 13 Vol. % O₂ gemessen
- Bei Brennkammertemperaturen (T1) von über 900 °C stiegen die NOx-Konzentrationen von ca. 50 ppm auf ca. 200 ppm an
- Durch die Eindüsung von Tertiärluft konnten die NOx-Emissionen um knapp 60 % reduziert werden (siehe hierzu auch Kapitel 6)
- Die Förderzeit hat keinen nennenswerten Einfluss auf den Prozess. Der Einfluss auf die Brennerleistung wird weniger von der Förderzeit als viel mehr von der Förderrate und hauptsächlich von der Gebläse-Drehzahl bestimmt.
- Der Rost muss während des Betriebs gerüttelt oder anderweitig gereinigt werden
- Der Rhythmus der Rost-Bewegung hat Einfluss auf den Kohlenstoff-Anteil in der Asche
- Die Isolation des Gehäuses weisst erhebliche Mängel auf
- Durch Flugasche im Raum (7) kann es zu Verschmutzungen im Kessel kommen, was zu einem Ausfall der Anlage führen kann
- Die Holzgas-Atmosphäre erfordert eine spezielle Materialbeständigkeit

Folgende Baugruppen wurden definiert:

Tabelle 10 Baugruppen

Baugruppe	Erläuterung	Funktion	Anforderung
1. Topf	Vergasertopf	<ul style="list-style-type: none"> – Hält Festbett zusammen – Beeinflusst Brennerleistung – Leitet Gase vom Rost zur Mischdüse 	<ul style="list-style-type: none"> – Resistent gegen Holzgas-Atmosphäre und Erschütterungen – Erlaubt kleine und grosse Brennerleistung
2. Rost	Rost	<ul style="list-style-type: none"> – Entfernt die Asche aus dem Festbett – Leitet die Primär Luft aus dem Aschekasten in das Festbett 	<ul style="list-style-type: none"> – Verhindert Durchtritt von grossen Teilchen (Pellets) – Immer leichtgängig – Dicht gegen Aussen – Gewährleistet Durchtritt von Primär Luft
3. Sekundär- luft / Düse	Gebläse inkl. Sekundär luft- Zuführung und Mischdüse und Tertiärluft	<ul style="list-style-type: none"> – Liefert den Sauerstoff für die Verbrennung – Vermischt Holzgas und Sekundär Luft – Erzeugt den notwendigen Unterdruck für Holzgas und Primär Luft 	<ul style="list-style-type: none"> – Stabile und regelbare Förderung – Resistent gegen Holzgas-Atmosphäre – Gute Durchmischung – Erzeugt hohen Unterdruck
4. Gehäuse	Brennergehäuse inkl. Isolation	<ul style="list-style-type: none"> – Hält die verschiedenen Komponenten zusammen – Integration in Heizkessel möglich – Schützt vor Wärmeverlust 	<ul style="list-style-type: none"> – Dicht gegen Aussen – Resistent gegen Holzgas-Atmosphäre (innen) und Erschütterungen – Führt Wärme in den Prozess zurück – Ansprechendes Design
5. Brennstoff- zufuhr	Dosierung und Überwachung des Brennstoffs und Primär luftblende	<ul style="list-style-type: none"> – Liefert den notwendigen Brennstoff – Verhindert das Überfüllen – Verhindert das Eindringen von Falschluft 	<ul style="list-style-type: none"> – Genaue Dosierung – Luftdicht
6. Zündung	Zündung des Brennstoffes	– Zündet den Brennstoff	<ul style="list-style-type: none"> – Schnelles, sicheres und emissionsarmes Zünden
7. Ent- aschung	Aschekasten, Ascheaustrag	<ul style="list-style-type: none"> – Trägt Asche aus – Nimmt Asche auf 	<ul style="list-style-type: none"> – Luftdicht, nicht brennbar – Hitzebeständig – Bedienerfreundlich, tragbar
8. Sensoren	Sensoren zur Überwachung und Regelung	– Misst verschiedene Betriebsgrössen im HGB	<ul style="list-style-type: none"> – Rasche Reaktion – Resistent gegen Aufkohlen
9. Regelung	Regelung des Prozesses	<ul style="list-style-type: none"> – Regelt Vergasungs- und Verbrennungsprozess – Überwacht Sicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> – Stabil – Zuverlässig – Einfacher Aufbau

Die wichtigsten Baugruppen / Einflussgrößen wurden zudem in Detail analysiert:

1. **Vergasertopf:** Der Vergasertopf ist das Herzstück des Brenners. Hier findet der Vorgang der Vergasung statt. Dieser Reaktor ist als austauschbares Teil konzipiert, was auf eine eingeschränkte Lebensdauer hindeutet. Im weiteren Projekt wird die Materialbeständigkeit des Vergasertopfes ein Schwerpunkt sein. Die Dimensionen des Vergasertopfes wurden vom Hersteller übernommen, sind aber auch Teil der Optimierung. Ziel ist es, einen Vergasertopf zu entwerfen, der einen möglichst grossen Modulationsgrad (bezüglich Brennerleistung) liefert und möglichst lange eingesetzt werden kann.
2. **Rüttel-Rost** und Rüttelintervall: Der Rost muss in regelmässigen Abständen von der Asche befreit werden. Wird in zu grossen Abständen gerüttelt, kann der Rost blockieren und somit auch die Primärluft-Zufuhr beeinträchtigt werden. Der Rost darf nicht während der Förderung von Pellets gerüttelt werden, da sonst in der aktuellen Ausführung unverbrannte Pellets mit in den Aschebehälter gerüttelt werden.
3. **Sekundärluft:** Gebläse und Zufuhr Sekundärluft (Mischdüse): Für die Sekundärluft muss eine optimale Durchmischung mit dem Holzgas gewährleistet sein, damit mit möglichst kleinem Luftüberschuss gefahren werden kann. Des Weiteren muss eine optimale Saugwirkung garantiert sein, damit das Holzgas vollständig abgesaugt wird (Verzicht auf Primärluft-Gebläse oder Klappe). Es wurde am Prüfstand ein Ansaugrohr zur Bestimmung der Volumenströme von Primär- und Sekundärluft eingebaut. Die Gebläse-Drehzahl ist ein weiterer wichtiger Betriebsparameter, mit dem man den Brenner optimal einstellen kann. Die Drehzahl hat zum einen eine direkte Auswirkung auf die Brennerleistung und zum anderen auch auf die Emissionen. Mit der Gebläse-Drehzahl wird momentan der gesamte Luftmassenstrom für Primär- und Sekundärluft geregelt. Aus der Gebläse-Drehzahl in Verbindung mit dem Förderfaktor ergibt sich der Luftüberschuss.
4. **Tertiärluft:** Um die Funktion der Tertiärluft, die erst in der Brennkammer zugeführt wird, zu testen, wurde sie versuchsweise angehängt. Dabei zeigte sich, dass mit Tertiärluft die NOx-Emissionen deutlich reduziert werden können.
5. **Gehäuse:** Um die Oberflächentemperaturen und die damit verbundenen Strahlungsverluste zu senken, steht die Isolation des Brenners im Projekt-Fokus. In einem ersten Schritt wurden im Betrieb Bilder mit einer Wärmebildkamera gemacht (siehe Abbildung 24). Im Weiteren ist der gesamte Brenneraufbau undicht und es ist nicht möglich, eine vollständige Massenstrombilanz aufzustellen, da sich die Ausmasse der Leckagen nicht benennen lassen. Die Abdichtung des Brenners wird im weiteren Projektablauf (bearbeitet) ein Schwerpunkt sein.
6. **Brennstoffzufuhr:** Der Förderfaktor der Pellets, der sich aus dem Verhältnis der Förderdauer zur Summe von Förderdauer und Förderpause der Pellets zusammensetzt, ist ein wichtiger Parameter zum Einstellen des Brenners. Der Förderfaktor hat zum einen Einfluss auf die Brennerleistung und zum anderen auf die Höhe der Emissionen. Ziel der in Kapitel 8 beschriebenen Versuche war es, für verschiedene Brennerleistungen optimale Förderfaktoren mit niedrigen Emissionen zu identifizieren.
7. **Zündung:** Während der Startphase des Brenners wird ein Teilstrom der Sekundärluft über einen Glühzünder aufgeheizt. Mit dieser dadurch erzeugten heissen Luft wird die unterste Schicht der Pellets auf dem Rost erhitzt. Die gesamte Startphase dauert relativ lang und führt zu hohen Emissionen, wodurch Handlungsbedarf zur Optimierung besteht.

8.3 Schwachstellen

Es wurden diverse Stärken und Schwachstellen identifiziert [5] [6], welche in der weiteren Entwicklung bis zu einem marktreifen Produkt bearbeitet werden müssen. Im Folgenden werden diese Schwachstellen analysiert und erste Lösungsansätze erarbeitet.

Tabelle 11 Stärken und Schwächen mit Optimierungsbedarf bzw. Optimierungsrichtung

Baugruppe	Stärken	Schwächen	Optimierungen
1. Topf	- Erlaubt Brennerleistungen von ca. 7-18 kW - Einfacher Aufbau	- Ungleicher Sog erzeugt evtl. ungleichen Abrieb am Vergasertopf - Evtl. nicht resistent gegen Holzgas-Atmosphäre	- Gewünschte Brennerleistungen von 10-50 kW - Material resistent gegen Holzgas-Atmosphäre
2. Rost	- Rüttelintervall einstellbar - Wartungsarm - Einfacher Aufbau	- Gehäuse nicht dicht - Ansteuerung fehleranfällig - Teilweise nicht vollständig verbrannte Pellets in der Asche - Rost leicht verzogen	- Gehäuse luftdicht - Zuverlässige Ansteuerung - Ausbringungsintervall leistungsabhängig - Stabilität erhöhen
3. Sekundär-luft / Düse	- Passt Primärluft automatisch an - Gute Durchmischung von Holzgas und Sekundärluft - Einfacher Aufbau	- Lambda ist nicht einstellbar - Verbrennung findet teilweise im Vergaser statt	- Regelkonzept - Hauptflamme im Brennraum
4. Gehäuse		- Nicht dicht - Schlecht isoliert - Schlechte Verarbeitung - Nicht wortungsfreundlich	- Möglichst dicht - Bessere Isolation - Wartungsfreundlich
5. Brennstoff-zufuhr	- Förderrate und Förderzeit gut einstellbar - Einfacher Brandschutz gegen Zurückbrennen ins Pellet-Lager - Gute Glutbettüberwachung	- Nicht luftdicht - Teilweise Staubaufwirbelung	- Luftdichtheit - Staubaufwirbelung minimieren
6. Zündung	- Einfacher Aufbau	- Lange Zündzeit (hohe Emissionen)	- Zündkonzept überarbeiten
7. Entaschung		- Nicht bedienerfreundlich (Entnahme nur mit Sauger möglich) - Geringes Fassungsvermögen	- Einfache und bedienerfreundliche Entnahme - Angepasstes Fassungsvermögen
8. Sensoren	- Einfache Sensorik	- Teilweise Aufkohlen der Thermoelemente - Verschmutzung des IR-Sensors - Unvollständige Sicherheitsüberwachung	- Einfaches Konzept möglichst beibehalten - Beständigeres Material
9. Regelung	- Zuverlässig - Einfacher Aufbau (systembedingt)	- Leistungsregelung nicht direkt möglich - Luftzahl unbekannt - Ansteuerung Rüttelspule	- Emissionsoptimierte Leistungsregelung

Einige Schwachstellen wurden im Detail betrachtet:

1. **Vergasertopf:** Der Hersteller erwartet Verschleisserscheinungen am Vergasertopf, was bisher allerdings nicht bestätigt werden konnte. Trotzdem soll hier optimiert werden, indem ein beständigeres Material zum Einsatz kommt.
2. **Dichtheit:** Der HGB weisst diverse undichte Stellen im Gehäuse auf, wo ein Luftaustausch zwischen Primär- und Sekundärluft oder sogar Luftpfehlaustritt stattfinden kann. Diese Undichtigkeiten verhindern momentan eine saubere Bilanzierung des HGB sowie eine optimale Einstellung. (Es wurden Ansaugrohre zur Bestimmung der Volumenströme von Primär- und Sekundärluft installiert, um diese Luftströme zu messen.) Im Verlauf des Projektes wurden diverse Stellen abgedichtet, allerdings ist der Brenner nach wie vor undicht. Die aktuelle Ausführung des Rüttel-Rostes bringt zudem undichte Stellen mit sich, die nur schwierig abzudichten sind. In einem weiteren Schritt müssen die Leckagen abgedichtet werden. Bei einer Neukonstruktion muss auf interne und externe Dichtheit geachtet werden.
3. **Gehäuse:** Die Isolation des HGB ist schlecht ausgeführt und nicht an allen Seiten vorhanden. In früheren Versuchen wurden partiell Oberflächentemperaturen um 300 °C gemessen, wodurch es zu grosser Wärmestrahlung kam. Allerdings wurden auch teilweise Verschaltungsteile zur besseren Zugänglichkeit entfernt.
4. **Brennstoffzufuhr:** Nicht nur über den Holzvergaser direkt sondern auch über den Pellet-Tank kann Falschluft angesogen werden. Der Tank wurde daher besser abgedichtet, um dies zu verhindern. Bei einer Neukonstruktion muss auch diese Schwachstelle (externe Dichtheit) im Detail bearbeitet werden.
5. **Entaschung:** Die Pellets werden automatisch in den Vergaser eingebracht, die Asche hingegen muss manuell ausgetragen werden. Dabei wird die Ascheschublade im Betrieb bis über 300 °C warm. Bei Dauerbetrieb (z.B. im Winter) ist dies ein Problem, welches behoben werden muss.
6. **Regelung:** Im Originalzustand befindet sich die Steuerung direkt an der äusseren Verschaltung des HGB. Dabei ist diese nur von einem Lochblech abgedeckt, was nicht zulässig ist (Berührung elektrisch leitender Teile).
7. **Verschmutzung:** Bereits nach der zweiten Messkampagne hatte sich Staub im Vergaserraum des HGB angesammelt, eventuell verursacht durch die extremen Testbedingungen. Diese Ablagerungen mussten aufwendig gereinigt werden, was nur im Stillstand durchgeführt werden kann. In einer Neukonstruktion sollte ein Verschmutzen des Vergaserraumes ausgeschlossen werden können.
8. **Allgemein:** Das Gerät weisst grundsätzlich eine geringe Qualität in der Verarbeitung auf. Die zur Verschalung verwendeten Bleche sind teilweise nicht entgratet und stellen eine Verletzungsgefahr dar. Es gibt verschiedene hervorstehende Kanten und unsaubere Abschlüsse.

8.4 Sicherheitsanforderungen

Im weiteren Projektverlauf wurde in Anlehnung an EN 303-5 (*Heizkesselanlagen für Festbrennstoffe*) eine Risikobewertung durchgeführt. Dabei wurden die in der Norm behandelten Aspekte auf den HGB angewendet und dessen aktueller Sicherheitsstand beurteilt.

Sicherheit gegen Rückbrand für automatische Heizkessel:

Der HGB verfügt über ein automatisches System zur Beschickung, welches so gestaltet sein muss, dass ein Rückbrand verhindert wird. Dies wird beim aktuellen Prüfstand durch die grosse

Fallhöhe bei der Pelletzufuhr gewährleistet. Die Flammen im Vergaser reichen nicht bis zur Dosiereinrichtung.

Temperaturleitung:

Die Oberflächentemperatur der Beschickungseinrichtung darf im Betrieb nicht über 85 °C steigen. Dies kann im aktuellen Zustand wegen dem grossen Abstand zwischen Brenner und Dosierschnecke über den Fallschacht ausgeschlossen werden. Trotzdem ist in der aktuellen Ausführung ein Sicherheits-Temperatur-Begrenzer (STB, Modell Klixon) am Fallrohr eingebaut. Sollte sich diese Stelle auf 50°C erwärmen, würde die Brennstoffzufuhr unterbrochen und der Brenner in den Ausbrand gesteuert.

Rückströmung von zündfähigen Verbrennungsprodukten:

Die Sicherheitsbarriere zur Brennstoffzufuhr darf nicht von signifikanten Mengen an Verbrennungsprodukten durchbrochen werden. Die Brennstoffzufuhr muss vor heissen Gasen und Funken geschützt werden. Der HGB wird mit Unterdruck im Kessel betrieben. Um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, muss eine Klappe oder ähnliches in der Brennstoffzufuhr installierte werden. Diese Klappe muss immer, ausser im Fall der Brennstoffzufuhr, geschlossen sein. Eine andere Möglichkeit wäre die kontinuierliche Abdichtung der Brennstoffzufuhr mit einer Zellradschleuse. Im aktuellen Zustand wird dieser Punkt nicht vollkommen abgedeckt. Da im Fallrohr aber über den gesamten Brennerbetrieb Unterdruck herrscht, ist die Sicherheit gewährleistet. Einzig im Falle eines Ausfalls des Gebläses muss kontrolliert werden, wie viel des Holzgases über den Fallschacht und die dichte Zuführleitung in die Pellet-Förderung eindringt.

Brandausbreitung in die Brennstoffzufuhr:

Hier müssen im Wesentlichen dieselben Anforderungen wie zur Verhinderung einer Rückströmung erfüllt werden. Mit dem Zusatz, dass eine Überfüllung des Brennraumes verhindert wird. Der HGB ist mit einer ansteigenden Förderschnecke und einem anschliessenden Fallrohr ausgerüstet, wodurch die Anforderungen erfüllt sind. Zur Überwachung des Füllstandes wird ein Flammensensor verwendet. Mit dem zusätzlichen oben erwähnten STB sind alle Anforderungen erfüllt.

Sicherheit gegen Brennstoffüberfüllung:

Im Betrieb oder in der Startphase darf keine gefährliche Situation auftreten, wenn die Beschickungseinrichtung mit voller Kapazität läuft. In der Startphase wird der Brennstoff gemäss den in der Steuerung eingegebenen Parametern gefördert. Die erste Förderung wird nicht überwacht, was hier bei einer Fehlfunktion zu einem Überfüllen des Reaktors führen könnte. Anschliessend werden die Pellets zeitgesteuert in den Reaktor eingebracht. Die Füllhöhe wird nicht direkt überwacht. Im Betrieb überwacht der Flammen-Sensor die Höhe der Schüttung nur bei abnehmender Höhe. Ein Überfüllen ist nicht überwacht. Weiter muss gemäss Norm die Zündphase überwacht werden. Es muss eine unvollständige oder eine nicht vorhandene Verbrennung festgestellt werden können und dadurch die Brennstoffzufuhr unterbrochen werden. Hierzu dient der Flammensensor. Auch eine fehlerhafte Dauerförderung im Betrieb hat den gleichen Effekt bezüglich Überfüllens des Reaktors. Dieses Fehlverhalten muss kontrolliert werden. Es ist davon auszugehen, dass durch das Überfüllen des Reaktors das Feuer zum Erliegen kommt. Da der Flammenfühler innerhalb einer bestimmten Zeit keine Flamme sieht, gibt er eine Fehlermeldung aus und stellt den Brenner ab. Da die fehlerhafte Dauerförderung des Brennstoffes prinzipiell zu einem gefährlichen Zustand führen kann, muss dieser durch ein diversitäres Schaltelement (diversitäre Redundanz) und durch eine Rückmeldung des Förderstromes abgesichert sein. Ob dies bereits vorhanden ist, wurde noch nicht geprüft. Da es sich um eine Standardlösung für Brennersteuerungen handelt, wird diese Anforderung in ein zukünftiges Pflichtenheft übernommen.

Sicherheit gegen Verbrennungsluftmangel:

Wird die Verbrennungsluft über ein Gebläse eingebracht, müssen weiterführende Tests durchgeführt werden. Es muss gewährleistet werden, dass die CO-Konzentration im Kessel nicht

über 5 Volumenprozent beträgt. Dies ist bei Vergasern im Falle eines Gebläse-Ausfalles ein generelles Problem, da das Holzgas schon im Normalbetrieb CO-Konzentrationen von 10 % – 20 % aufweist. Bei einem Ausfall des Gebläses (bzw. des Stromes) breitet sich dieses Schwelgas auch in den Kessel aus. Ohne genügend Zug durch den Kamin (und somit ohne Spülen des Vergasers und der Brennkammer) kann dies beim Neustart des Gebläses zu Verpuffungen führen. Eine Verpuffung muss erstens nicht zwingend auftreten und zweitens falls sie trotzdem auftritt, kann sie durch geeignete Massnahmen so abgefangen werden, dass keine gefährliche Situation für den Betreiber entsteht. Diese Massnahmen müssen heute schon bei Stückholzvergaser getroffen werden und sind somit Stand der Technik.

Oberflächentemperaturen:

Die Oberflächentemperaturen des Gerätes dürfen die Raumtemperatur um nicht mehr als 60 K überschreiten. Dies wird vom untersuchten HGB nicht erfüllt. Die Oberflächentemperaturen des Gehäuses überschreiten teilweise 300 °C. Diese Anforderung muss nicht nur aus Sicherheitsgründen, sondern auch aus energetischen Gründen (Strahlungsverluste) eingehalten werden.

Heissgasseitige Dichtheit:

Die heissgasseitige Dichtheit ist eine Aufgabe des Heizkessels und nicht des Brenners. Aus diesem Grund wurde die Dichtheit des HGB noch nicht untersucht. Qualitativ kann festgehalten werden, dass die Dichtheit des HGB sowohl gegen aussen als auch zwischen Primär- und Sekundärluft nicht den Anforderungen entspricht.

Temperatur Regel- und Begrenzungseinrichtung:

Dieser Abschnitt betrifft nicht direkt den HGB, sondern das Umfeld und den Kessel, an welchen er angeschlossen wird. In Abhängigkeit des Feuerungssystems und der Absicherung der Anlage müssen verschiedene Sicherheitssysteme installiert sein, um Temperaturen zu regeln oder um zu hohe Werte zu verhindern. Wird der HGB in einer thermostatisch abgesicherten Heizungsanlage verwendet, muss das Feuerungssystem schnell oder teilweise abgeschaltet werden können. Ansonsten muss die vorhandene Restwärme über einen Sicherheitswärmetauscher abgeführt werden. Da der HGB über eine niedrige Kleinlast verfügt, gilt er als teilweise abschaltbar. Er benötigt somit keinen Sicherheitswärmetauscher. Dies ist wichtig für die Retrofit Anwendung, da Öl-Kessel keinen Sicherheitswärmetauscher enthalten. Für eine völlige Abschaltung benötigt der HGB rund 10 bis 20 Minuten, um den noch vorhandenen Brennstoff im Reaktor umzusetzen. Also ist er nicht schnell abschaltbar. Trotzdem kann der HGB schnell abgeschaltet werden, wenn die Primärluft abgestellt wird. Der Brenner geht in diesem Fall in eine Art Gluterhalt. Aus diesem Zustand kann er auch rasch wieder gezündet werden. Dieses Regelverhalten wird heute schon bei Pellet-Kesseln angewendet und erübriggt somit einen Sicherheitswärmetauscher.

Elektrische Sicherheit:

Im Lieferzustand wird die gesamte Steuerung mit Leistungselektronik und Steuerungsplatine nur von einem Lochblech abgedeckt. Somit sind Spannung führende Teile zugänglich. Dies birgt ein Sicherheitsrisiko.

8.5 Ausblick offener Punkte

Analyse vom Holzgas:

In Phase II ist vorgesehen, nochmals bei allen Lastpunkten die Qualität des Holzgases zu untersuchen und die Höhe der Zyklen und daraus entstehenden Emissionen zu analysieren und zu optimieren. Die ebenfalls für Phase II geplante Variation der verschiedenen Parameter soll zeigen, dass die zeitliche Entwicklung der Umsetzung der Pellets in Holzgas für das Verständ-

nis des Vergasungsprozesses sehr wichtig ist. Daraus kann besser der richtige Zeitpunkt für das Nachlegen der Pellets abgeschätzt werden.

Für den weiteren Projektablauf ist eine Zusammenarbeit mit dem PSI (Paul-Scherrer-Institut) angestrebt. Am PSI steht ein Einzel-Pellet-Vergaser zur Verfügung, mit dessen Hilfe die einzelnen Vergasungs-Vorgänge in einem Pellet besser verstanden werden können. Eine wichtige Frage ist hierbei, wie schnell die Vergasung bei gegebener Temperatur startet und wie lange es dauert, ein Pellet zu vergasen.

Sicherheit:

Bezüglich der Sicherheit sind ebenfalls weitere Tests geplant. Es ist zu untersuchen, welche Auswirkungen ein Abstellen des Gebläses hat. Zudem ist zu klären, ob man durch Takten des Gebläses (kurzfristiges Unterbrechen) noch kleinere Brennerleistungen erreichen kann. Ebenso stellt sich die Frage, was mit der Vergasung passiert, wenn die Brennstoffzufuhr undicht ist.

9 Marktanalyse

Die vorliegende Marktanalyse wurde im Rahmen eines studentischen Projektes am IBRE durchgeführt [9]. Zusammenfassend liegen folgende Ergebnisse vor:

9.1 Marktanalyse & Strategie

Die Firma Liebi LNC agiert als einziger Schweizer Heizungshersteller auf einem Verdrängungsmarkt, der von der ausländischen Konkurrenz dominiert wird. Bei Holzheizungen sind hier vor allem österreichische Firmen zu nennen. Angebotsseitig ist das Potential in diesem Bereich gross und zwar in Bezug auf die Heizungen, wie auch auf den Energieträger. 35 % Prozent der hiesigen Energieholzreserven werden momentan nicht genutzt. Nachfrageseitig wird eine Verlagerung des Endenergieverbrauchs für Wärme zu Holz hin erwartet, unter anderem begünstigt durch die Energiestrategie des Bundes. 9 % des Heizenergieverbrauchs der Schweiz werden von Gebäuden mit einem Heizleistungsbedarf von 20 - 50 kW (z.B. kleine Mehrfamilienhäuser) verursacht. Da auch diese Gebäude saniert werden müssen, wird ein Nachfragewachstum erwartet. Von 2000 - 2009 stieg der Anteil an Pellets am Endenergieverbrauch stetig bis auf 0.8 % und zwar am schnellsten in der Leistungsklasse unter 50 kW.

Das Marktpotential des HGB in der Leistungsklasse unter 50 kW wird generell positiv bewertet und zwar insbesondere im Marktsegment kleine Mehrfamilienhäuser, kommunale Gebäude, Schwimmbäder und Hotels und generell in suburbanen Gebieten (Zielmarktentscheid). Die Firma Liebi LNC kann sich in der Nische Holzheizungen durch Qualität mit dem HGB differenzieren. Die Installateure bzw. Planer sind die wichtigste Zielgruppe im Leistungsbereich von 20 - 50 kW (Positionierungsentscheid).

Handlungsempfehlungen für einen erfolgreichen Markteintritt des HGB:

Produkt

Der HGB sollte kleiner und leichter als die herkömmlichen Holzheizungen gleicher Brennerleistung sein und sollte einen mindestens so hohen Automatisierungsgrad und dieselbe Benutzerfreundlichkeit aufweisen, wie die restliche Produktpalette (automatische Wartungs- und Nachfüllungsauslösung, Regulierung per Handy-App). Die niedrigen Emissionswerte sollten durch ein grünes Signet an der Verschalung angedeutet werden, um den HGB zusätzlich äusserlich

von der restlichen Produktpalette und der Konkurrenz abzuheben. Angestrebgt werden ein einheitliches Softwaredesign sowie eine einfache Montage aller Liebi Produkte, um die Installateure bzw. Planer an die Produkte zu binden. Als Zusatzleistung sollten verschiedene Wartungspakete angeboten werden.

Preis

Der Preis für den HGB sollte kosten- aber bis zu einem gewissen Grad auch wettbewerbsorientiert bestimmt werden. Ein Preisunterschied zur Konkurrenz ist durch die „Swissness“ gerechtfertigt. Ein Erstkäuferrabatt und kostenlose Wartung im ersten Jahr ermöglichen eine rasche Markteinführung. Mit Treuerabatten können auch Installateure längerfristig an Liebi Produkte gebunden werden. Möglich sind auch Empfehlungsrabatte auf die Wartung für bestehende Kunden, wenn sie vom Neukunden genannt werden (Mund-zu-Mund Propaganda). Es wird empfohlen, die Zahlungsbedingungen zu diversifizieren mit den Zahlungsmodellen „Rate“, „Miete“ und „Rund-um-Sorglos-Paket“, um neue Kunden zu akquirieren.

Platz

Der HGB soll entsprechend der bestehenden Distributionspolitik der Produktpalette vertrieben werden. Das heisst entweder direkt, über den Heizungsinstallateur oder über Zwischenhändler.

Promotion

Im Zentrum der Kommunikationspolitik müssen der Endkunde (Nutzer) und der Heizungsinstallateur/ Planer stehen. Während Letzterer seine Entscheidung stärker auf rationale Fakten stützt, entscheidet der Endkunde auch aufgrund von Gefühlen, Interesse und Werterhaltung. Ziel der Kommunikation gegenüber dem Endkunden soll sein, denjenigen anzusprechen, der eine ähnliche Weltanschauung hat und gleiche Überzeugungen teilt („Aus LIEBI zur Umwelt“). Dies soll über die Kommunikationskanäle Messen und die Website erfolgen. Die Produktentscheidung beim Planer und Installateur ist generell sehr durch den Faktor Gewohnheit beeinflusst. Sein Interesse liegt vor allem bei einem reibungslosen Ablauf, bekannter Qualität und guten Konditionen bei Treue. Als Kommunikationskanäle werden Fachzeitschriften, Inserate in Zeitungen, Messen, regelmässige Hausmessen, Mailings und spezielle Events für die Beziehungspflege mit den Installateuren/ Planer empfohlen.

9.2 Schlussfolgerung Firma Liebi LNC

In der Schweiz ist bei Neubauten mit einem Wärmebedarf bis 20 kW die Wärmepumpe die favorisierte Lösung. Trotzdem steht in diesem Leistungsbereich der Grossteil der bestehenden Feuerungsanlagen.

Vergleich der absoluten Stückzahlen installierter Anlagen in der Schweiz (Stand 2012 und hochgerechnet auf 2025 unter Berücksichtigung der Gebäude-Sanierung)

Wärmebedarf	< 20kW	20 - 50 kW	20 - 100 kW	> 100 kW
Unsaniert (2012)	802'000	580'000	805'000	54'000
Saniert (2025)	1'150'000	268'000	456'000	10'000

In Deutschland oder Österreich ist wegen dem Strom-Mix (CO₂-Emissionsfaktor) der Anteil der Wärmepumpen noch viel kleiner. Hier bietet sich ein höheres Potential für den Pellet-HGB. Die grosse Anzahl von Heizungen in Einfamilienhäusern macht aber trotzdem auch in diesem Leis-

tungsbereich (5 bis 20 kW) ein Produkt in dieser Technologie interessant. Hauptsächlich in ländlichen Gegenden und im Gebirge ist die Akzeptanz für Holzheizungen höher. Im Gebirge eignen sich Wärmepumpen weniger gut wegen dem felsigen Untergrund und der generell kälteren Umgebungsluft-Temperaturen. Zudem ist der Anteil an Einfamilienhäuser in ländlichen Gegenden höher als in urbanen Gegenden.

Im Weiteren ist der Heizleistungsbedarf von Gebäuden durch Sanierung (Isolation) eher sinkend. Daher wandern Anlagen tendenziell zu kleineren Brennerleistungen.

In urbanen Gebieten herrschen zudem sehr strenge Vorschriften und es braucht hier eine saubere Verbrennungstechnologie. Dies ist wiederum eine Chance für den HGB in urbanen Gebieten. Aus diesem Grund soll auch eine 5 bis 20 kW - Version entwickelt werden. Diese Version soll aber mit einem Saugzuggebläse ausgerüstet werden. Das Retrofitting betrifft nicht nur den Brenner sondern auch der Kessel. Mit einem solch sauberen Produkt können zwischen 200 und 500 Stück pro Jahr am Markt platziert werden.

Der Leistungsbereich 20 bis 50 kW soll neu und zusätzlich über die Installateure bearbeitet werden, da dort die Konkurrenzfähigkeit der Pellettheizung gegenüber Wärmepumpen als intakt betrachtet wird. Dies stellt ganz klar eine Ergänzung zum heutigen Geschäft dar. Die Vorgehensweise für den Marktzugang zu den neuen Marktsegmenten (Hotellerie, Wellness, Kleingeschwerbe und Behördenbauten) ist in [9] im Detail beschrieben.

Neue Biomasse-Feuerungen erfordern eine saubere Verbrennungstechnologie. Nur so können nichtholzartige Brennstoffe überhaupt zugelassen werden. Dies ist eine Chance für den HGB nicht nur in der Schweiz sondern auch in Deutschland oder anderen europäischen Ländern.

Die Brennwert-Technologie ist nur mit einem HGB möglich, da die Staubemissionen so niedrig sind, dass der Brennwert-Wärmetauscher nicht verschmutzt und einfach gereinigt werden kann. Diese Lösung soll favorisiert werden. In diesem Leistungsbereich sollen 200 Stück pro Jahr verkauft werden. Da im höheren Leistungsbereich häufig der Brennstoff Hackgut eingesetzt wird, sollte diese Verbrennungstechnologie auch auf diese Brennstoffart ausgedehnt werden.

10 Schlussfolgerung Phase I

10.1 Ergebnisse Meilenstein 1

Ziel	Ergebnis
Der Verlauf der Emissionen über die Betriebsphasen Start, stationärer Betrieb und Stopp in Abhängigkeit verschiedener Parameter ist ermittelt. Die Durchschnittswerte über die gesamte Betriebsphase sind bekannt (Betrieb mit Pellets)	Siehe Kapitel 6
Die Optimierungsmöglichkeiten für den Vergasungsprozess sind zusammengestellt	Siehe Kapitel 8
Der Versuchsbrenner ist für weitere Versuchszwecke mit Sensorik ausgerüstet (variierbare Parameter)	Siehe Kapitel 5
Die Zusammensetzung des Holzgases ist in Abhängigkeit von Stöchiometrie und Brennstofffeuchtigkeit (für Pellets) bekannt	Siehe Kapitel 6

Meilenstein 1 wurde bereits Ende 2014 erreicht und die Resultate der Untersuchungen im Jahresbericht 2014 dem BFE vorgelegt.

Für Meilenstein 1 konnte gezeigt werden, dass mit dem momentanen Aufbau des Brenners im Prüfstand am IBRE alle Betriebsphasen eingestellt und die relevanten Emissionen gemessen werden können. Somit konnte zum einen eine vielversprechende Grundlage geschaffen werden, um mit einem neuen verbesserten Prototyp weitere Reduktionen der Emissionen zu erreichen und zum anderen einen benutzerfreundlichen Holzgasbrenner zu konzipieren. Durch studentische Arbeiten war es möglich, in einer Systemanalyse alle Komponenten des Holzgasbrenners einzeln zu bewerten und die jeweiligen Stärken und Schwächen zu dokumentieren. Es konnte gezeigt werden, dass mit der vorhandenen Sensorik alle relevanten Messgrößen erfasst werden können. In einem letzten wichtigen Schritt wurde die Zusammensetzung des Holzgases bestimmt. Einzig der Vergasungs-Wirkungsgrad bleibt noch zu bestimmen. Dies wird realisiert, sobald der neue Prototyp mit verbesserten Dichtungen und Anschläßen in Betrieb genommen wurde.

10.2 Ergebnisse Meilenstein 2

Ziel	Ergebnis
Die Marktanalyse liefert die erforderlichen Produkt-Eigenschaften und Verdoppelung des Marktpotentials für Pellet-Heizkessel, bzw. Pellet-Vergaser-Brenner	Siehe Kapitel 9
Die Regelbarkeit des Vergasers ist aufgezeigt (Emissionskennlinien); erste Optimierungen in Bezug auf Luftstufung, Eindüsung und Durchmischung sind charakterisiert	Siehe Kapitel 6
Das Ziel der Emissionen in der stabilen Betriebsphase ist erreicht: CO < 20 mg/Nm ³ , Staubemissionen ohne Partikelabscheider < 5 mg/Nm ³ und OGC < 5 mg/Nm ³	Siehe Kapitel 6
Anfallende Ascherückstände sind analysiert und die Brennstoffausnutzung ist energetisch optimiert	Teilweise zurückgestellt für Phase II
Der Schlussbericht der Projektphase I ist geschrieben. Entwicklungskosten für die weiteren Projektphasen sind bestimmt und ein Gesuch für weitere Entwicklung ist eingereicht	Das Gesuch für Phase II wird eingereicht

Zusammenfassend kann für Projektphase I festgehalten werden, dass die Funktionen des HGB verstanden sind und alle relevanten Einflussgrößen für die Emissionen erkannt wurden. Auf Grund der intensiven Arbeit wurde der HGB als ein vielversprechendes Produkt im Bereich Holzpelle-Vergasung kennengelernt, der das Prinzip der Holzvergasung mit den daraus resultierenden niedrigen Emissionen sehr gut umsetzt. Dies bildet einen weiteren Meilenstein in der Reduktion der Emissionen von Holzfeuerungen. Abschliessend empfehlen wir, das Projekt gemäss aktualisiertem Terminplan weiter zu bearbeiten und die Marktreife anzustreben, da Marktpotential vorhanden ist.

Im weiteren Projektablauf wird ein Schwerpunkt auf niedrigen Start- und Stopp-Emissionen und der Untersuchung alternativer Brennstoffe liegen, da diese Punkte das Marktpotential noch weiter stärken.

11 Projektstand und Ausblick

Wie diesem Bericht zu entnehmen ist, liegt das Projekt gut im momentanen Zeitplan.

Meilenstein 1 ist erreicht worden und in diesem Bericht dokumentiert. Meilenstein 2 ist teilweise erreicht worden und in diesem Bericht ebenfalls dokumentiert. Mit den Ergebnissen der Marktforschung kann in den Projektphasen II und III der HGB zu einem marktreifen Produkt entwickelt werden, um dann in den Markt eingeführt zu werden. Die Aufgaben für die Phase II wurden im Detail definiert und die entsprechenden Ressourcen benannt. Die genaue Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete kann dem neuen Antrag entnommen werden.

In Tabelle 12 sind alle geplanten und absolvierten Arbeitspakete abgebildet. In Grau ist jeweils gezeigt, wann die Arbeit durchgeführt wurde / wird. Im gelben Kasten sind die Arbeitspakete der Phase I dargestellt, im grünen Kasten die der Phase II und im blauen Kasten die Arbeitspakete der Phase III.

Projektübersicht Holzgasbrenner- Übersicht Projekt Status			Titel	Status	2013				2014				2015				2016				2017							
Phase	AP	Arbeitspaket			1. Projektjahr	Q1	Q2	Q3	Q4	2. Projektjahr	Q1	Q2	Q3	Q4	3. Projektjahr	Q1	Q2	Q3	Q4	4. Projektjahr	Q1	Q2	Q3	Q4	5. Projektjahr	Q1	Q2	Q3
Phase I	1.1	Projektleitung und Informationsaustausch	Projektleitung und Steuerung	wird bearbeitet																								
	1.2		Informationsaustausch	wird bearbeitet																								
	1.3		Vorbereitung für Projektphase II	erledigt																								
	2.1	Aufbau Prüfstand	Konstruktion und Aufbau Prüfstand	erledigt																								
	2.2		Inbetriebnahme	erledigt																								
	2.3		Instrumentierung und Messdatenerfassung	erledigt																								
	3.1	Untersuchung HGB	Analyse Brenneraufbau und Funktionsweise	erledigt																								
	3.2		Ermitteln der Emissionen	erledigt																								
	3.3		Analyse Syngas	erledigt																								
	3.4		Analysen Ascherückstände	erledigt																								
	3.5		Energetische Effizienz	schiebt in Phase 2																								
Phase II	Meilenstein 1			Status Prüfstand aufgenommen	erledigt																							
	4.1	Theoretische Analyse I	Optimierung Vergasungsprozess	teilv. erledigt																								
	4.2		Optimierung Luffführung, Durchmischung	teilv. erledigt																								
	5.1	Optimierung Prüfstand I	Anpassung Variierbarkeit Versuchsfeuer	erledigt																								
	5.2		Syngas bei Luffvariation	schiebt in Phase 2																								
	5.3		Optimierung Betriebsphase	teilv. erledigt																								
	6.1	Marktforschung	Marktforschung	erledigt																								
	Meilenstein 2			Stand erster Betrieboptimierungen	erledigt																							
	7.1	Theoretische Analyse II	Emissionsreduktion Start-Stopp-Phase	offen																								
	8.1		Optimierung Start-Stopp-Phase	offen																								
Phase III	8.2	Optimierung am Prüfstand II	Optimierung der Leistungsmodulation	offen																								
	8.3		Einfluss des Wassergehalts der Pellets	offen																								
	8.4		Alternative Brennstoffe	offen																								
	8.5		Ascherückstände	offen																								
	8.6		Überprüfung Brennwertkessel, Kondensat	offen																								
	8.7		Dokumentation der Ergebnisse	offen																								
	Meilenstein 3			Optimierungen abgeschlossen	offen																							
	9.1	Bau einer optimierten Holzgasbrenner-Einheit	Konstruktion des Prototyps	offen																								
	9.2		Herstellung des Prototyps	offen																								
	9.3		Einbau der Sensoren, Temperaturregelung	offen																								
Phase III	Meilenstein 4			Prototyp betriebsbereit und optimiert	offen																							
	10.1	Versuchsbetrieb mit dem Holzgasbrenner	Festlegen der Validierungsparameter	offen																								
	10.2		Fahren festgelegter Zustände, Versuchsbetrieb	offen																								
	10.3		Auswertung der Ergebnisse	offen																								
	10.4		Optimierungen	offen																								
	10.5		Nachmessen der festgelegten Zustände beim Prototyp	offen																								
	10.6		Schlussbericht	offen																								
	Meilenstein 5			Freigabe Feldtest	offen																							
	11.1	Markteinführung des Holzgasbrenners	Retrofit	offen																								
	11.2		Brennwertkessel	offen																								
	11.3		Feldtest	offen																								
Phase III	Meilenstein 6			Marktfreigabe	offen																							

Tabelle 12 Projektstatus

12 Literaturverzeichnis

- [1] Jorma Jokiniemi et al., Fine particle emissions of a novel type of gasification combustion pellet burner, Konferenz Proceedings, CEBC Graz 2011
- [2] BFE: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2013, Bern, 2014
- [3] ProPellets.ch: Preisentwicklung der Energieträger in der Schweiz bis 2014, Bundesamt für Statistik BFS, 2014
- [4] Bachelorthesis Kevin Stuker: Luftstrahlpumpe für HGB, FHNW, 2014
- [5] Projektdokumentation Jan-Marc Kaiser: Systemanalyse Holzgasbrenner, FHNW, 2014
- [6] Bachelorthesis Stephan Mathys: Charakterisierung eines Holzgasbrenners, FHNW, 2013
- [7] Projektdokumentation Cedric Iseli: Holzgasbrenner- Charakterisierung der Produktgase, FHNW, 2013
- [8] M. Kaltschmitt: Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2009
- [9] Projektdokumentation J. Müller, V. Sperdin, N. Lohberger, F. Boesiger: Marketingplan für den Pelletsholzgasbrenner der Firma Liebi, FHNW, 2014
- [10] Th. Nussbaumer, Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050, Schweiz Z Forstwes 164 (2013) 12: 389-397

13 Verzeichnisse

13.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Projekt-Ziele bezüglich Emissionen	8
Tabelle 2 Arbeitspakete und Meilensteine der Projekt-Phase I	11
Tabelle 3 Komponenten und Funktionen des Holzgasbrenners	13
Tabelle 4 Theoretische Zusammensetzung Produktgas für Verweilzeitabschätzung	15
Tabelle 5 Förderparameter	19
Tabelle 6 Zusammenfassung der Ergebnisse der TGA: Asche nach Rütteln	31
Tabelle 7 Messmatrix	36
Tabelle 8 Physikalische Parameter [6]	45
Tabelle 9 Holzgas bei verschiedenem Lambda λ	46
Tabelle 10 Baugruppen	49
Tabelle 11 Stärken und Schwächen mit Optimierungsbedarf bzw. Optimierungsrichtung	51
Tabelle 12 Projektstatus	59

13.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht aller Arbeitspakete der Phase I	4
Abbildung 2 Preisentwicklung Energieträger [3]	7
Abbildung 3 Schematischer Aufbau des HGB mit Kessel	9
Abbildung 4 PyroMan Pellet-Vergaser: Längsschnitt, Seitenansicht und Querschnitt aus der Patentanmeldung (EP2314918A2)	12
Abbildung 5 Schnittansichten der Vergasereinheit	12
Abbildung 6 CO Konzentrationen in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit	15
Abbildung 7 Benötigte Verweilzeit in Abhängigkeit von der Temperatur in der Brennkammer bei einer Kohlenmonoxid Endkonzentration von 250 ppm und Restsauerstoff von 13 %.	16
Abbildung 8 Prüfstand am IBRE	17
Abbildung 9 Sensorik am Prüfstand	18
Abbildung 10 Förderfaktor	19

Abbildung 11 Luftverhältnis Primär- zu Sekundärluft (n = Drehzahl des Ventilators entspricht Gebläse-Leistung)	20
Abbildung 12 Luftüberschuss Brennkammer (n = Drehzahl des Ventilators entspricht Gebläse-Leistung)	20
Abbildung 13 CO-Emissionen HGB in Abhängigkeit verschiedener Parameter (Gebläse-Leistung [%] / Förderdauer [s])	22
Abbildung 14 CO-Emissionen über der Feuerungsleistung	22
Abbildung 15 CO-Emissionen über der Feuerungsleistung (bis 50 ppm)	23
Abbildung 16 NOx-Emissionen HGB (Parameter: Gebläse-Drehzahl [%] / Förderdauer [s])	23
Abbildung 17 NOx-Emissionen über der mittleren Flammtemperatur	24
Abbildung 18 NOx-Reduktion bei Tertiär-Luft-Beimischung	25
Abbildung 19 Aufbau Holzgas-Analysesystem	26
Abbildung 20 Schematischer Aufbau der Holzgasentnahmesonde	27
Abbildung 21 Analyse mit Massenspektrometer	27
Abbildung 22 Ascheproben nach unterschiedlichen Rüttelintervallen	30
Abbildung 23 TGA Probe 4	31
Abbildung 24 Aufnahme mit Wärmebildkamera (Temperaturskala: 20 - 280 °C)	32
Abbildung 25 Leistungskennfeld	33
Abbildung 26 Erweitertes Kennfeld	34
Abbildung 27 Temperatur-Verlauf Startphase Brennkammer (T 1) und Reaktor (T 14)	35
Abbildung 28 Temperatur-Verlauf Ausbrandphase Brennkammer (T 1) und Reaktor (T 14)	35
Abbildung 29 Messmatrix: Brennerleistung, Lambda, normierte NOx- und CO-Emissionen	37
Abbildung 30 Modell der Gegenstromvergasung [8]	38
Abbildung 31 Vorgänge im Pellet während der Vergasung	40
Abbildung 32 Zyklen im Holzgasbrenner	42
Abbildung 33 Gemessene Reaktortemperaturen mit Pelletzufuhr	43
Abbildung 34 Thermogravimetrische Analyse während thermodynamischer Zersetzung	44
Abbildung 35 Vergasung der einzelnen Hauptkomponenten	44
Abbildung 36 Energiebedarf für die Erwärmung und Verdampfung der entsprechenden Komponenten	45
Abbildung 37 2D CFD Luftstrahlpumpe: Geschwindigkeiten	47
Abbildung 38 CFD Geschwindigkeiten Holzgas und Sekundärluft	47