

Bachelorarbeit

Inbetriebnahme und Monitoring einer Holzvergasungsanlage

Angefertigt für die Badenova AG & Co. KG

von Christoph Roquette

Hochschule Offenburg
Studiengang Verfahrenstechnik
Schwerpunkt Umwelttechnik

Sommersemester 2010

Jo 11/10B

Betreuer Firma: Dipl.-Ing. Peter Majer

Betreuer Hochschule: Prof. Dr.-Ing. Joachim Jochum

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung der Bachelorarbeit unterstützt haben:

Besonderen Dank gilt:

Herrn Majer und der Badenova AG & Co. KG, die mir diese Arbeit ermöglicht haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing Jochum und dem gesamten Technikum Team der HS Offenburg für ihre Unterstützung.

Herrn Ulrich Müller vom Ramsteiner Hof für die gute Zusammenarbeit.

Meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich dabei immer sehr unterstützt haben.

Trotz aller Widrigkeiten war es mir möglich, Studium und professionellen Sport zu vereinen.

Einleitung:

Die Möglichkeit einer energetischen Biomassenutzung ist vielfältig. Der einfachste Fall ist beispielsweise Holz in einer Feuerungsanlage zu verbrennen. Für andere Anwendungsbereiche z.B. der Stromerzeugung ist es notwendig gasförmige Sekundärenergieträger herzustellen.

In Rahmen dieser Bachelorarbeit wird für die Badenova AG & Co. KG die Inbetriebnahme einer Holzvergasungsanlage der Firma Spanner GmbH mit Blockheizkraftwerk begleitet.

Durch die gleichzeitige Gewinnung von Strom und Wärme mit der Vergasung von Holzhackschnitzeln soll dem Ramsteiner Hof ermöglicht werden, vorhandene Biomasse-Ressourcen effektiv und optimal zu nutzen. Mit finanzieller Unterstützung aus dem Innovationsfond soll das Hofareal inklusive Ferienwohnungen aus der Abwärme der Holzvergasungsanlage beheizt werden. Bei dem Vergaser handelt es sich um einen Festbettvergaser im Gleichstrombetrieb.

Um einen optimalen und kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten wurden Messreihen aufgenommen und in Form von Massen- und Energiebilanzen ausgewertet. Die Erfassung der Messreihen gestaltete sich durch die fehlende Messtechnik als schwierig. Viele zur Untersuchung herangezogene Werte konnten daher nur abgeschätzt werden. Aufgrund der unausgereiften Regelungstechnik kam es immer wieder zu Stillständen der Anlage sowie Verzögerungen bei der Inbetriebnahme. So liegt die elektrische Leistung laut Hersteller bei bis zu 50 kWh elektrisch. Die in den Messreihen ermittelten Leistungen des Blockheizkraftwerks betragen nach mehrwöchigem Dauerbetrieb jedoch nur 34kWh - 47kWh.

Abstract

The possibility of biomass energy is multifunctional. The simplest way is to burn wood in an combustion plant.

For other implications e.g. power generation, it is necessary to produce a gaseous energy source.

This Bachelor-Thesis is about the commissioning of a wood gasification of the company Spanner GmbH and a combined heat and power plant.

Supported by the Innovation Fund of the company Badenova AG & Co. KG, the economic aim is to save sources of the Ramsteinfarm by producing its own electricity and heat with chips of cut wood.

This wood gasification plant is a downdraft gasifier.

To ensure an optimal and continuous operation, series of measurement have to be taken and evaluated in terms of mass and energy balances.

The coverage of the series of measurement is difficult because of the lack of measuring and control possibilities.

That is the reason why it always comes back to plant shutdowns and delays in commissioning.

Many calculated values can be accepted only as estimates.

The electric power according to the manufacturer is up to 50 kWh. The electric power of the test series are only 35-47 kWh.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Einleitung:	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VII
Formelzeichen	VIII
1. Allgemeines.....	1
2. Grundlagen der Holzvergasung	2
2.1 Geschichte der Holzvergasung.....	2
2.2 Ziele der Holzvergasung	3
2.3 Prozesse der Holzvergasung	4
2.4 Vergaserbauarten.....	7
2.4.1 Gegenstromvergaser	7
2.4.2 Gleichstromvergaser.....	8
2.4.3 Querstromvergaser.....	9
2.4.4 Wirbelschichtvergaser	10
2.5 Synthesegas	11
3. Analyse des bestehenden Holzvergasungskonzepts	14
3.1 Anlagenbeschreibung – Komponenten	14
3.1.1 Beschickung / Befüllung	15
3.1.2 Reaktor	17
3.1.3 Druckgebläse und Wärmetauscher	18
3.1.4 Filter und Ascheaustrag	19
3.1.5 Notfilter	20
3.1.6 Blockheizkraftwerk	21
3.1.7 Pufferspeicher	22
3.2 Anlagenbeschreibung – Funktionsweise.....	23
3.2.1 Fließbild.....	24
3.3 Zwischenergebnis.....	25
4. Datenanalyse	28
4.1 Durchführung der Messreihen.....	29
4.1.1 Holzanalyse	30
4.1.2 Gasanalyse	31
4.1.3 Probleme bei den Messreihen.....	32
4.2 Messreihen	33

5. Auswertung	35
5.1 Massenbilanzen	35
5.1.1 Massenstrom Brennstoff.....	36
5.1.2 Volumenstrom Gasgemisch (Luft/Synthesegas)	36
5.1.3 Volumenstrom Synthesegas	37
5.1.4 Massenstrom an Synthesegas	39
5.2 Energiebilanzen	40
5.2.1 Unterer Heizwert feuchtes Synthesegas	40
5.2.2 Unterer Heizwert feuchter Brennstoff	41
5.2.3 Wärmemenge.....	41
5.3 Wirkungsgrade	43
5.3.1 Elektrischer Wirkungsgrad	43
5.3.2 Thermischer Wirkungsgrad der Vergasung.....	43
5.3.3 Vergasungswirkungsgrad/Kaltgas-Wirkungsgrad.....	44
5.4 Korrektur der Gasanalyse.....	45
5.5 Auswertung Messergebnisse	46
5.5.1 Berechnung des Wassergehalts im Synthesegas	46
5.5.2 Berechnung des Luftverhältnisses am Vergaser.....	50
5.5.3 Berechnung des Luftverhältnisses am BHKW	52
5.5.4 Excel Auswertung der Messergebnisse	54
6. Zusammenfassung.....	56
Eidesstattliche Erklärung:	59
Literaturverzeichnis:.....	60
Anhang:	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gleichgewichtskurven bei Kohlenstoffvergasung (Boudouard-, Methan-, Wassergasreaktion) [7]	6
Abbildung 2: Prinzipaufbau eines klassischen Gegenstromvergasers [7].....	7
Abbildung 3: Prinzipaufbau eines klassischen Gleichstromvergasers [7].....	8
Abbildung 4: Prinzipaufbau eines klassischen Querstromvergasers [4]	9
Abbildung 5: Prinzipdarstellung von Wirbelschichtschicht Vergasern [8].....	10
Abbildung 6: Gaszusammenstellung in Funktion des Luftverhältnisses (1 bar) [4]	12
Abbildung 7: Holzvergasungsanlage der Firma Spanner GmbH [10]	14
Abbildung 8: Befüllung	15
Abbildung 9: Beschicker	16
Abbildung 10: Reaktor	17
Abbildung 11: Druckgebläse und Wärmetauscher	18
Abbildung 12: Filter	19
Abbildung 13: Ascheaustrag	20
Abbildung 14: Notfilter	20
Abbildung 15: BHKW mit Wärmetauscher	21
Abbildung 16: Fließbild	24
Abbildung 17 : Vergleich der Kennlinien des SD der Firma Elektror - 100% und 70% Lüfterleistung	29
Abbildung 18: Synthesegasentnahmestelle	31
Abbildung 19: Excel Datentabelle.....	62
Abbildung 20: Excel Eingabefeld Berechnung	63
Abbildung 21: Excel Heizwert Berechnung.....	64
Abbildung 22: Excel Motordaten Berechnung.....	65
Abbildung 23: Excel Wärme Berechnung.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: durchschnittliche Holzgaszusammensetzung [7]	13
Tabelle 2: 1. Leistungsmessung.....	33
Tabelle 3: 2. Leistungsmessung.....	33
Tabelle 4: 3. Leistungsmessung.....	34
Tabelle 5: 4. Leistungsmessung.....	34
Tabelle 6: Gasmotorenberechnung der Fa. Weigel	38
Tabelle 7: trockene Gaszusammensetzung Messreihen	46
Tabelle 8: feuchte Gaszusammensetzung Messreihen	49
Tabelle 9: Excel Auswertung	54

Formelzeichen

BHKW	Blockheizkraftwerk
°C	Grad Celsius
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
H	Enthalpie
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H _u	unterer Heizwert
H _o	Brennwert
Hz	Herz
K	Kelvin
kWh	Kilowattstunde
m	Masse
M	molare Masse
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
o	spezifischer Sauerstoffbedarf
p	Druck
P	Leistung
Q	Wärme
R	universelle Gaskonstante
SD	Seitenkanalverdichter
t	Zeit
T	Temperatur
w	Feuchte
y	Stoffmengenanteil
η	Wirkungsgrad
φ	relative Feuchte von Gasen
ϑ	Celsius Temperatur
λ	Luftverhältnis

ρ	Dichte
ξ	Massenanteil
Δ	Differenz

Indizes:

Br	Brennstoff
el	elektrisch
fe	feucht
i	Einzelkomponente
L	Luft
min	mindest
SG	Synthesegas
tr	trocken

1. Allgemeines

Die Energieversorgung ist für den Menschen lebensnotwendig. Unser Energiesystem befindet sich jedoch in einer Krise, da der Verbrauch von Energie immer weiter zunimmt und die Ressourcen fossiler Energieträger heute nach wie vor den überwiegenden Teil unseres Verbrauches decken, endlich sind und somit irgendwann ausgeschöpft sein werden.

Gleichzeitig haben die durch Verbrennung verursachten Emissionen klimarelevanter Treibhausgase in den letzten 150 Jahren zu einem Anstieg der mittleren Temperatur auf der Erde geführt. Somit sind regenerative Energieträger der Schlüssel einer nachhaltigen Energieversorgung. [1]

Durch das erstmals im Jahr 2000 erlassene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2000) soll die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen in Deutschland finanziell gefördert werden.

Da hierzulande große Mengen an Biomasse zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehen, schreitet der Ausbau der durch das EEG geförderten erneuerbaren Energien schneller voran als erwartet.

Somit ist es durchaus realistisch, dass sich die Stromversorgung aus Erneuerbarer Energien in Deutschland bis 2020 auf mindestens 30 Prozent erhöhen lässt. Eine Möglichkeit zur Energiebereitstellung aus fester Biomasse besteht in der thermochemischen Umwandlung, bei der feste Biomasse durch den Einfluss von Wärme in flüssige oder gasförmige Energieträger umgewandelt wird. In Verbindung mit Verbrennungskraftmaschinen ist dadurch eine Stromerzeugung mit höheren Wirkungsgraden möglich, als mit konventionellen Dampfkraftprozessen im gleichen Leistungsbereich.

Für eine solche Energiegewinnung bietet sich Holz als regenerativer Energieträger an. Eine dezentrale Kraft-Wärme Kopplung mit Holzgas aus Holzresten, Holzhackschnitzeln und Altholz bietet daher eine interessante Nutzungsmöglichkeit von Biomasse. [2] [3]

2. Grundlagen der Holzvergasung

2.1 Geschichte der Holzvergasung

Die Vergasung von organischem Material ist kein neues Verfahren. Bereits im 17. Jahrhundert war es technisch möglich Kohle und Torf zu vergasen. Erste Patente wurden bereits im 18. Jahrhundert von Robert Gardener und John Berber zum Vergasungsverfahren angemeldet.

Der erste kommerzielle Vergaser wurde im Jahr 1839 von Bischof in Frankreich hergestellt. Dieser erzeugte aus Torf und Kohle Heizgas und machte es zur Eisenherstellung nutzbar. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts kam es zum Stillstand der Vergaserentwicklung, ausgelöst durch die sichere Verfügbarkeit und Versorgung von mineralischen Kraftstoffen. Erst durch die Energie- und Rohstoffknappheit in den Kriegsjahren wurde die Vergasung wieder aufgegriffen.

Der in den 1920er Jahren von Imbert entwickelte Holzvergaser für den Antrieb von Kraftfahrzeugen verhalf der Holzvergasung zu einem großen Aufschwung und fand seinen Höhepunkt Ende des zweiten Weltkrieges. [4]

Im Jahr 1945 waren die Holzvergaser weit verbreitet. Die Firma Imbert produzierte in diesem Jahr mehr als 500.000 Vergaseranlagen, hauptsächlich für Fahrzeugmotoren.

Durch die günstigeren fossilen Energieträger verlor die Holzvergasung jedoch wieder an Bedeutung.

Aufgrund der geringen Kosten für Biomasse wurden solche Vergaser nur noch für Entwicklungsländer hergestellt.

Erst mit der Ölkrise in den 1970er Jahren und dem zunehmenden Interesse an regenerativen Energieträgern wurden der Holzvergaser und die bekannten Techniken wieder aufgegriffen. Allerdings in aus heutiger Sicht bescheidenen Umfang. [5]

Während man in früheren Jahren Holzvergasung vor allem zum Antrieb von Fahrzeugen nutzte, hat man heute zum Ziel den Rohstoff in elektrische Energie umzuwandeln, um Alternativen für die fossilen Energieträger zu schaffen.

2.2 Ziele der Holzvergasung

Bei der Vergasung von Biomasse, in diesem Falle Holz, wird durch thermochemische Umwandlung das Holz bei hohen Temperaturen möglichst vollständig in gasförmige Energieträger umgewandelt. Dabei wird versucht, einen hohen Anteil der im festen Brennstoff gebundenen Energie auf das brennbare Synthesegas zu übertragen, um möglichst viel Energie zu beziehen.

Dem Prozess wird unterstöchiometrisch ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel (z.B. Luft) zugeführt.

Die bei der Vergasung ablaufenden chemischen Reaktionen sind überwiegend endothermer Art. Es werden große Wärmemengen übertragen, welche sich je nach Art der Wärmeeinbringung unterscheiden lassen in autotherme und allotherme Vergasung.

Bei der autothermen Vergasung wird die erforderliche Prozesswärme durch Teilverbrennung der Biomasse bereitgestellt. Folglich wird bei diesem Verfahren die benötigte Wärme intern bereitgestellt. Bei der allothermen Vergasung hingegen, wird die Wärme extern zugefügt.

Die Vergasung liefert Wärme (kann zur Wärmebereitstellung genutzt werden) und Synthesegas, welches eine Mischung aus brennbaren und nichtbrennbaren Gasen darstellt.

Die Hauptkomponenten des Synthesegases sind Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff, Methan und Wasserdampf.

Wird bei der Vergasung Luft als Vergasungsmittel zugeführt, sind erhebliche Teile von Stickstoff enthalten.

Als unerwünschte Nebenprodukte entstehen, je nach Vergasungsart, unterschiedliche Mengen an Teere, Asche und Staub.

Das entstandene Synthesegas wird in Blockheizkraftwerke (BHKW) geleitet, in denen das Gas in Motoren verbrannt wird, Generatoren antreibt und so eine Stromerzeugung möglich ist. [6] [16]

2.3 Prozesse der Holzvergasung

Der Prozess der Vergasung lässt sich grob in vier Teilprozesse unterteilen. Die „Aufheizung und Trocknung“, die „Pyrolytische Zersetzung“, die „Oxidation“ und die „Reduktion“.

Die Prozesse werden von den unterschiedlichen Temperaturniveaus bestimmt. Eine genaue Erforschung der Abläufe beim Übergang zwischen den einzelnen Zonen ist aber noch nicht vollständig erfolgt. Mit dem heutigen Wissenstand können die einzelnen Prozesse jedoch bereits charakterisiert werden. Viele Erkenntnisse über die Bildung von unerwünschten Bestandteilen sind bereits erlangt und Maßnahmen zu dessen Vermeidung können durchgeführt werden. [6]

- **Aufheizung und Trocknung ($T \leq 200^\circ\text{C}$)**

Das Holz hat einen bestimmten Anteil an Restfeuchte, Luftgetrocknetes Holz besitzt immer noch ein Wassergehalt von 10-30%. [6]

In diesem Teilprozess wird das Holz aufgeheizt und bei Temperaturen von bis zu 200°C das Wasser verdampft. In der Aufheiz- und Trocknungszone finden keine chemischen Veränderungen statt.

- **Pyrolytische Zersetzung (150 – 500°C)**

Das Holz beginnt sich zu zersetzen, dabei bilden sich Schwelgase und Kohlenstoff in Form von Kohle und Kondensat.

Die Makromoleküle des Holzes werden thermisch und unter Luftabschluss zerlegt.

Bevor das Material in den nächsten Teilprozess gelangt, sind alle flüchtigen Bestandteile aus dem Holz ausgetreten. Als Feststoff liegt fast nur noch Kohlenstoff in Form von Holzkohle vor.

Die Pyrolyse ist ein komplizierter chemischer Prozess, die in ihren einzelnen Abläufen noch weitestgehend unerforscht geblieben ist. [7]

- **Oxidation (500 – 1200°C)**

Bei der Oxidation werden die entstandenen Produkte durch weitere Wärmeeinwirkung zur Reaktion mit Sauerstoff gebracht. Dadurch wird eine Temperaturerhöhung über 500°C bewirkt. Ein Teil des Kohlenstoffs wird verbrannt und in kleinere gasförmige Moleküle gespalten.

Die Wärme wird durch drei wichtige exotherme Reaktionen mit dem Vergasungsmittel Luft bzw. Sauerstoff erzeugt, um die für die Umsetzung der endothermen Reaktionen (Aufheizung und Trocknung, pyrolytische Zersetzung) und des Kohlenstoffbettes in der Reduktion benötigte Wärme bereitzustellen.

Folgende Reaktionen laufen hierbei ab:

Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid:



Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlenmonoxid:



Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasserdampf:



Die Reaktionen [Gl.1] und [Gl.3] dienen ausschließlich dazu Prozesswärme zur Verfügung zu stellen. Bei Reaktion [Gl.2] entsteht das erwünschte Brenngas Kohlenmonoxid.

- **Reduktion (T~500°C)**

Nach Durchlaufen der Oxidationszone ist ein Teil des Kohlenstoffs vollständig oxidiert (12-17%).

Der Hauptteil der brennbaren Bestandteile des Synthesegases wird während der Reduktion gebildet. Die Oxidationsprodukte wie CO₂ und H₂O reagieren am glühenden Kohlestoffbett zum Synthesegas, indem sie unter Wärmezufuhr reduziert werden. Dabei wird der Kohlenstoff des Kokes vollständig umgesetzt und es bleibt nur noch die Asche des Holzes übrig. [7]

Boudouardreaktion:



Wassergasreaktion:



Methanreaktion:



Die Reaktionen verlaufen parallel und sind abhängig von den herrschenden Temperaturniveaus und den Partialdrücken der Reaktionspartner.

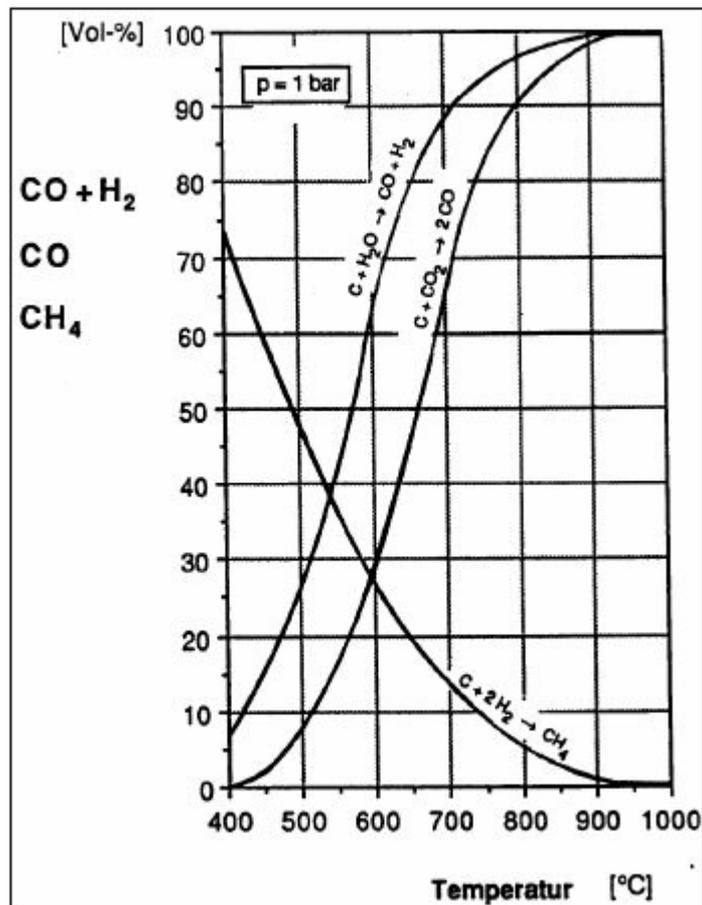


Abbildung 1: Gleichgewichtskurven bei Kohlenstoffvergasung (Boudouard-, Methan-, Wassergasreaktion) [7]

Wie in Abbildung 1 zu erkennen, laufen die Boudouard- und Wassergasreaktionen gegenläufig zur Methanreaktion.

Bei niedrigen Temperaturen erhält man eine erhöhte Ausbeute an Methangas, bei steigenden Temperaturen einer erhöhte Kohlenmonoxid- und Wasserstoffausbeute.

Zudem werden bei hohen Temperaturen ab 1000°C die langkettigen Kohlenwasserstoffketten (Teer) sicher gecrackt, was eine nachgeschaltete Teerreinigungsmaßnahme verringert.

Um die beste Prozesstemperatur zu ermitteln, muss man die Vor- und Nachteile beider Möglichkeiten abwägen. [7][9]

2.4 Vergaserbauarten

Einen idealen Vergaser für die unterschiedlichen Biomassen gibt es bisher nicht. [6]

Die Vergasung der Biomasse unterscheidet sich je nach Reaktortyp (Art des Kontaktes zwischen Oxidationsmittel und der Biomasse), Wärmebereitstellung (allotherm, autotherm), Vergasungsmedium (Luft, Sauerstoff) und Druck (Druckverhältnisse im Reaktor). Die spezifisch für die Holzvergasung geeigneten Vergaser werden im Folgenden näher erläutert.

2.4.1 Gegenstromvergaser

Bei dem Gegenstromverfahren handelt es sich um einen Festbettvergaser. Das zu vergasende Holz ist in einer Schüttschicht dem Vergasungsmittel ausgesetzt. In dem Festbett laufen die verschiedenen Teilprozesse der Vergasung räumlich getrennt ab.

Das Prinzip des Gegenstromvergasers ist in folgender Abbildung dargestellt.

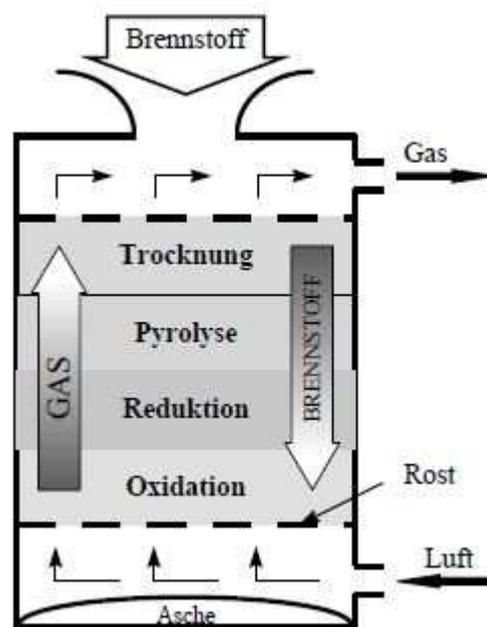


Abbildung 2: Prinzipaufbau eines klassischen Gegenstromvergasers [7]

Der Brennstoff wird von oben, das Vergasungsmittel von unten zugeführt. Durch die entgegengesetzte Bewegungsrichtung bilden sich die Vergasungsreaktionszonen. Das Synthesegas und die Schwelgase strömen im Gegenstrom zum Brennstoff und verlassen den Vergaser am Kopf.

Der Vorteil des Gegenstromvergasers liegt bei seinem vergleichsweise hohen Vergasungswirkungsgrad, der sich aus den niedrigen Austrittstemperaturen des Synthesegases ergibt.

Nachteilig ist, dass die Bestandteile, die in der Pyrolysezone entstehen, nicht durch die heiße Oxidations- und Reduktionszone geleitet werden. Das Synthesegas ist stark mit kondensierbaren Bestandteilen, vor allem Teer verunreinigt, und muss gereinigt werden, bevor es in einem Verbrennungsmotor verbrannt wird.

2.4.2 Gleichstromvergaser

Bei dem Gleichstromvergaser handelt es sich um einen Festbettvergaser (s. Gegenstromvergaser). Die Bewegung von Brennstoff und Gas erfolgt in gleicher Richtung. Der Reaktor wird absteigend von oben nach unten durchströmt.

Das Prinzip des Gleichstromvergasers ist in folgender Abbildung dargestellt:

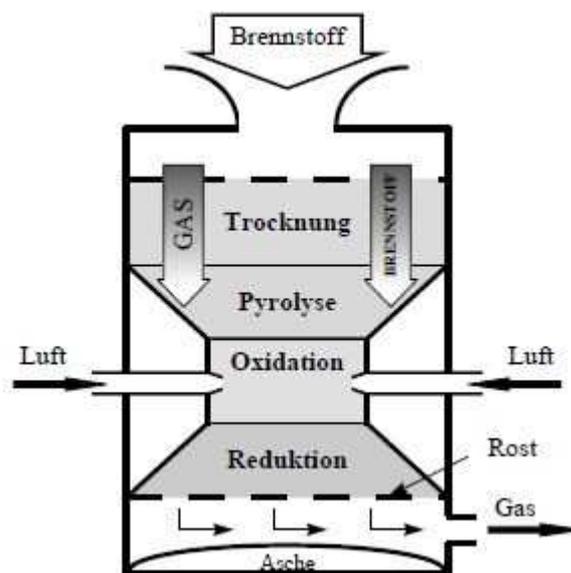


Abbildung 3: Prinzipaufbau eines klassischen Gleichstromvergasers [7]

Beim Gleichstromvergaser gelangt das pyrolytisch zersetzte Holz in die sehr heiße Oxidationszone. In dieser Zone wird von außen Vergasungsluft eingeblasen.

Aus der Oxidationszone treten Koks und Asche in die Reduktionszone. Das Synthesegas kühlt sich dann soweit ab, bis keine Reduktionsvorgänge mehr ablaufen können. Nach der Reduktionszone wird das Synthesegas abgezogen.

Das Gleichstromverfahren hat den Vorteil, dass alle Gase die heiße Oxidationszone durchlaufen müssen und dabei nahezu alle entstandenen organischen Verbindungen sicher

gecrackt werden. Die Teere und Kohlenwasserstoffe werden zu einem großen Teil gespalten (zu CO, CO₂ und H₂).

Nachteile ergeben sich aus der hohen Temperatur, mit der das Synthesegas aus der Reduktionszone austritt und mit Hilfe von Wärmeüberträgern für die Stromerzeugung nutzbar gemacht wird.

Da die Gasreinheit entscheidend für den Motorbetrieb ist, wird der Gleichstromvergaser zurzeit für die Kombination mit Gasmotor-BHKW bevorzugt. [6]

2.4.3 Querstromvergaser

Beim Querstromvergaser handelt es sich um eine Abwandlung des Gleichstromvergasers.

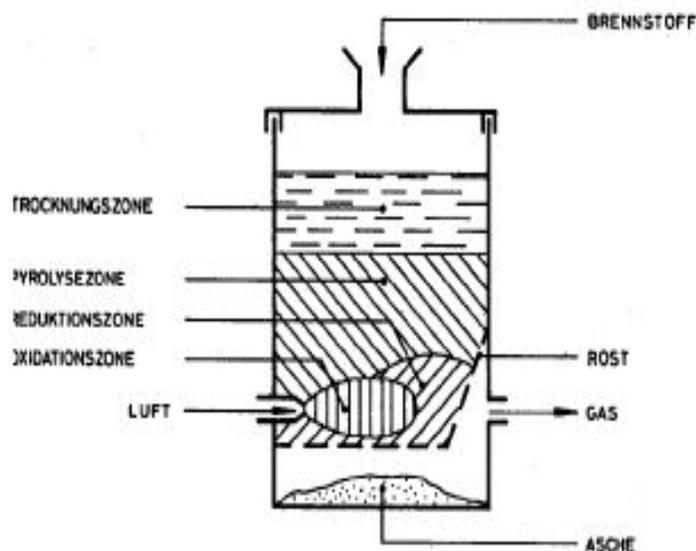


Abbildung 4: Prinzipaufbau eines klassischen Querstromvergasers [4]

Die Gasführung verläuft quer zum Brennstoff. Das Synthesegas hat dabei nur eine kurze Verweilzeit im Reaktor, wodurch nicht alle Schwelgase durch die heiße Zone gelangen.

Der Querstromvergaser wurde speziell für den Fahrbetrieb entwickelt. [4]

2.4.4 Wirbelschichtvergaser

Das Brennstoffmaterial ist meist kleiner als bei den Festbettreaktoren. Der Wirbelschichtvergaser enthält ein Bett aus feinem Material (z.B. Sand). Die Wirbelschicht entsteht, wenn das Vergasungsmittel schnell genug durch den Vergaser strömt und somit das Bett aufwirbelt und den Brennstoff von unten umströmt.

Es bilden sich keine Reaktionszonen. Stattdessen laufen die Teilreaktionen parallel ab, weil eine gleichmäßige Temperatur im Reaktor gegeben ist. Die intensive und homogene Durchmischung von Feststoff und Gas begünstigt den Wärme- und Stoffaustausch. Um jedoch eine gleichmäßige Gasqualität zu erreichen, sind konstante Mengenströme erforderlich. Dies erfordert einen großen apparativen Aufwand. [9]

Es gibt zwei Arten von Wirbelschichtvergäsern: die stationäre und die zirkulierende Wirbelschicht.

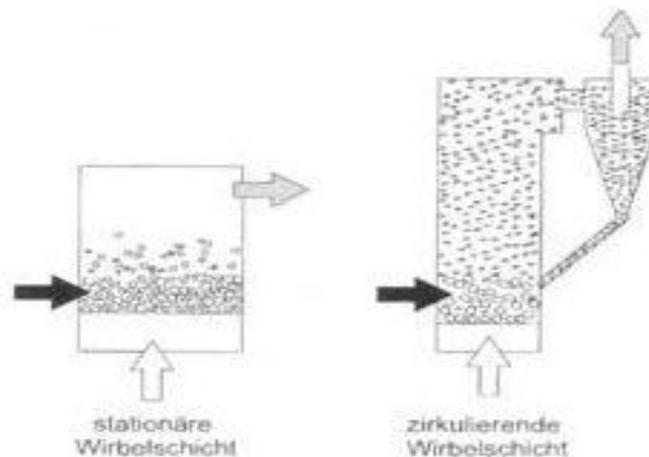


Abbildung 5: Prinzipdarstellung von Wirbelschicht Vergasern [8]

Es gibt noch weitere Vergasertypen, die in der Praxis noch nicht so eine große Verbreitung gefunden haben oder nicht ausreichend dokumentiert sind. In diesem Zusammenhang ist der Zweizonenvergaser, Drehrohrvergaser oder Flugstromvergaser zu erwähnen, auf welche im Folgenden nicht weiter eingegangen wird.

2.5 Synthesegas

Das Synthesegas besteht im Wesentlichen aus brennbaren Gasen wie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan und nicht-brennbaren Inertgasen wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff.

Die Synthesegasqualität und -zusammensetzung hängen von vielen Faktoren ab: von den Eigenschaften des Brennstoffs, vom Vergasungsverfahren (s. Kapitel 2.4) und vom Vergasungsprozess. [16]

Jeder Brennstoff bringt eine andere chemische Zusammensetzung und Eigenschaften mit sich, die sich direkt auf den Heizwert auswirken. Der Heizwert setzt sich aus den einzelnen Heizwertanteilen der Gaskomponenten zusammen.

Die Synthesegaszusammenstellung wird von Stückgröße und Feuchtigkeit des Holzes beeinflusst. Je trockener der Brennstoff, desto höher ist der Heizwert. Der Wassergehalt im Brennstoff sollte einen Wert von 14-18% nicht überschreiten, da ansonsten der Energiebedarf für das Verdampfen von Wasser und der Teergehalt zunehmen. Dieser wird desweiteren von der Körnung beeinflusst. Je feiner die Körnung, desto mehr sinkt der Teergehalt. [4]

Im Folgenden ist auf die Vergasungsreaktion an sich einzugehen. Diese ist druck- und temperaturabhängig.

Eine Erhöhung des Drucks hat höhere CO_2 und CH_4 Gehalte zur Folge beziehungsweise verminderte H_2 und CO Anteile im Synthesegas.

Die Temperatur spielt bei allen chemischen Reaktionen eine wesentliche Rolle. Dabei wird hauptsächlich die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst. Demnach nimmt bei steigender Temperatur der H_2 -Gehalt zu, während der CO und CH_4 -Gehalt abnehmen (vergleiche Abbildung 1).

Für die Vergasungsreaktion spielt das Vergasungsmedium eine wichtige Rolle. Eine Vergasung mit Luft ermöglicht einen autothermen Prozess durch die teilweise Verbrennung des Brennstoffs. Dabei wird jedoch viel Luftstickstoff zugeführt, der das entstehende Synthesegas zusätzlich verdünnt und den Heizwert vermindert. Optimaler wäre also eine Zufuhr von reinem Sauerstoff - prozesstechnisch ist jedoch die Vergasung mit Umgebungsluft einfacher zu realisieren.

Die Synthesegasqualität wird demnach hauptsächlich vom Wassergehalt des Brennstoffs und von dem Luftverhältnis λ beeinflusst. Das Luftverhältnis ist von entscheidender Bedeutung bei der Vergasung und ist von der Geometrie der Anlage sowie vom Saugvolumenstrom des Motors abhängig. [9]

Das Luftverhältnis berechnet sich nach:

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} \quad [\text{Gl.7}]$$

L : tatsächlich zugeführte Luft

L_{\min} : rechnerischer Mindestluftbedarf

In der folgenden Abbildung ist die Abhängigkeit der Synthesegaszusammensetzung von dem Luftverhältnis aufgeführt.

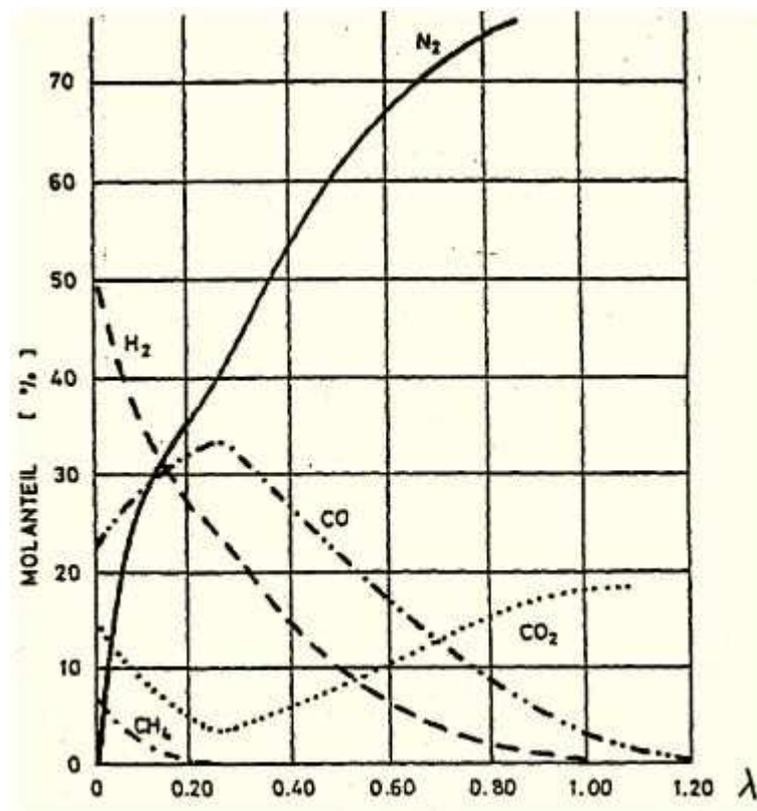


Abbildung 6: Gaszusammensetzung in Funktion des Luftverhältnisses (1 bar) [4]

Das Luftverhältnis wirkt sich auf die brennbaren Gase aus. Optimal wäre ein Luftverhältnis von $\lambda = 0$. Da aber die Vergasungstemperaturen aufrechterhalten werden müssen, und hierzu wie erläutert immer eine gewisse Oxidation notwendig ist, ist ein Mindestluftverhältnis von $\lambda = 0,2 - 0,3$ notwendig.

Gaskomponente	Mit Vergasungsmittel Luft in Vol-%
CO	10-20
H ₂	9-20
CH ₄	1-8
CO ₂	10-22
N ₂	40-55

Tabelle 1: durchschnittliche Holzgaszusammensetzung [7]

3. Analyse des bestehenden Holzvergaskonzepts

3.1 Anlagenbeschreibung – Komponenten

Die Holzvergasanlage der Spanner GmbH erzeugt Generator-/Wassergas aus naturbelassenen Holzhackschnitzeln. Das erzeugte Prozessgas wird über eine Filtereinrichtung gereinigt und in einem BHKW verbrannt.

Der erzeugte elektrische Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist, die Abwärme, die bei der Kühlung des Synthesegases entsteht, wird vorwiegend zu Heizzwecken und zur Trocknung der Holzhackschnitzel genutzt.

Der eingesetzte Reaktor ist ein Festbettvergaser, der im Gleichstrombetrieb arbeitet (s. Kapitel 2.4.2). Die weiteren Anlagenkomponenten, wie zum Beispiel die Holzhackschnitzellagerung, die Fördereinrichtung der Holzhackschnitzel und das Blockheizkraftwerk, der verschiedenen Zulieferer komplettieren die Anlage (s. Abbildung 16). Die Holzvergasanlage an sich besteht aus einem Grundgestell, auf das alle für den Betrieb der Holzvergasung benötigten Komponenten montiert sind und wird unter Unterdruck bis zu 100 mbar gehalten (s. Abbildung 10).

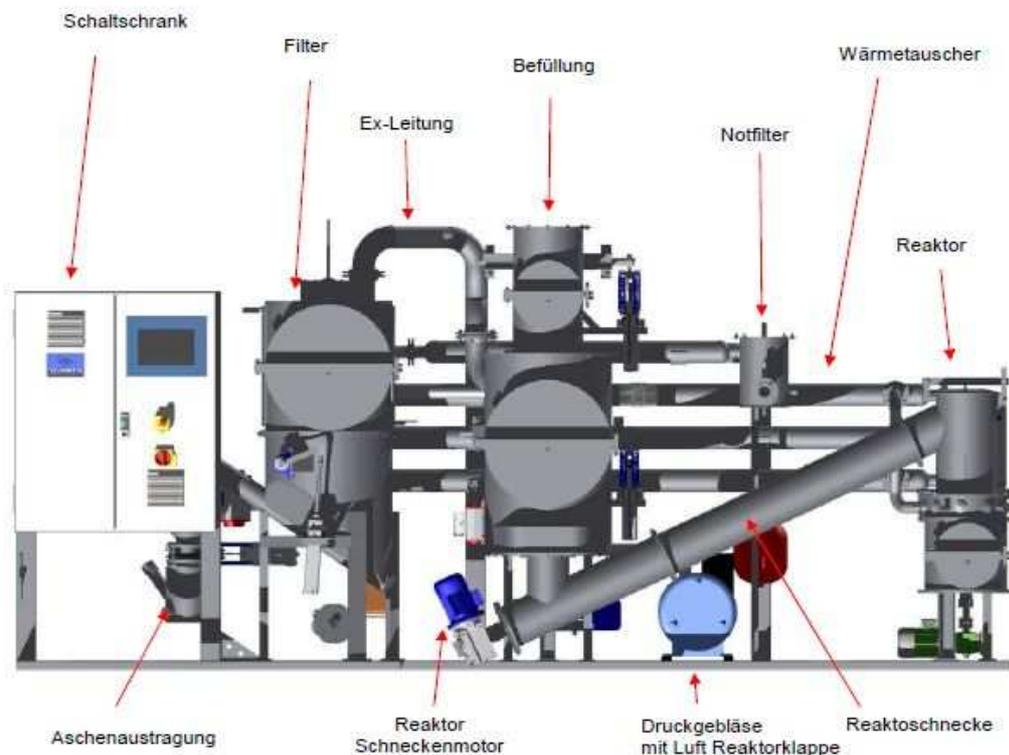


Abbildung 7: Grundgestell Holzvergasanlage der Firma Spanner GmbH [10]

3.1.1 Beschickung / Befüllung

Bei der untersuchten Anlage der Spanner GmbH befindet sich oberhalb der Holzvergasungsanlage ein 140 m³ großer Stauraum für die Aufbewahrung der Holzhackschnitzel.

Über zwei Kratzböden werden die Holzhackschnitzel gefasst und zu einer Querförderschnecke transportiert. Die Holzhackschnitzel werden durch diese Querförderschnecke zu einem Aufgabetrichter gebracht, wo sie mithilfe einer Trogschnecke zur Befüllung gelangen.



Abbildung 8: Befüllung

Die automatische Befüllung dient zur Einbringung des Holzes in die Anlage.

Die Befüllung besteht aus einem Klappensystem, einem Füllstandsensoren im unteren Bereich sowie einem Räumern zur Materialausbringung.

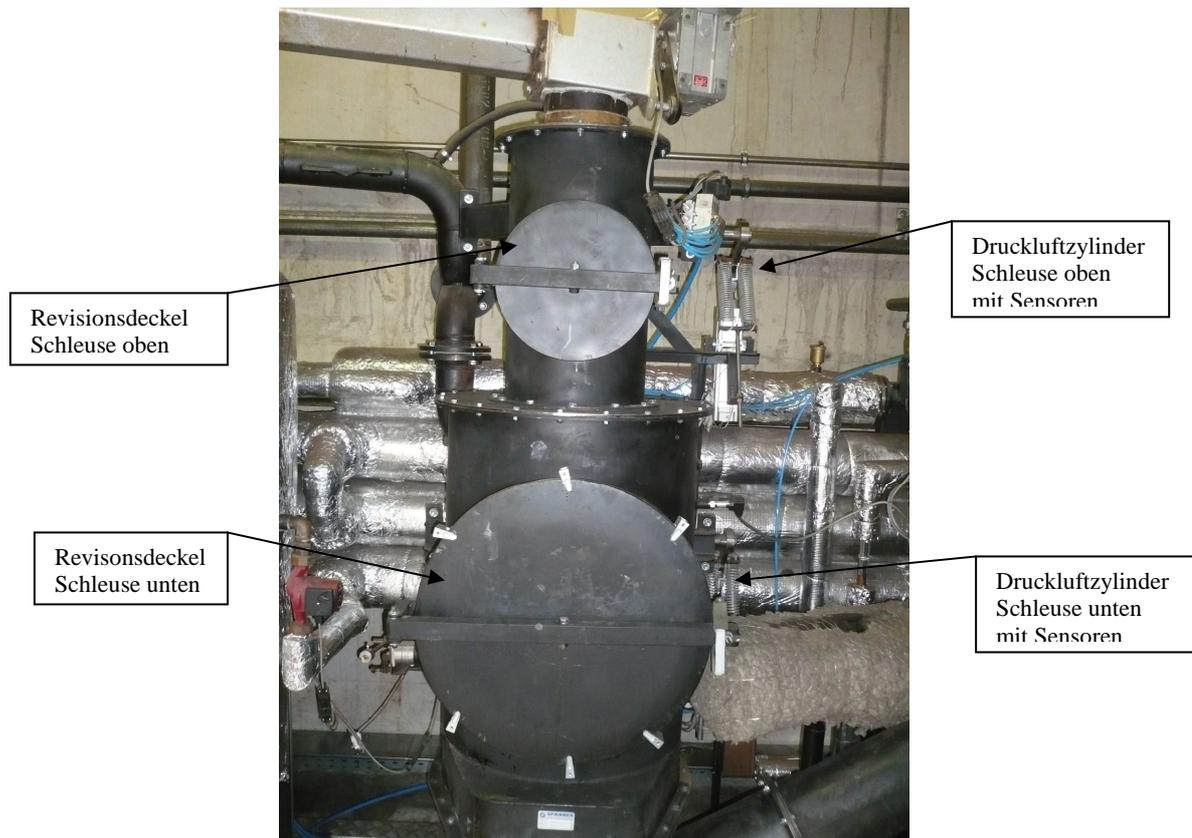
Der Füllstandsensoren gibt bei niedrigem Füllstand ein Signal an die Trogschnecke, die daraufhin zeitgesteuert Material befördert.

Der Beschicker ist am Eingang mit einer Schleuse ausgestattet, welche aus zwei Klappen besteht, die luftdicht schließen.

Damit soll gewährleistet werden, dass der Unterdruck in der Anlage bestehen bleibt.

Die Klappen werden von der Steuerung (SPS) so gesteuert, dass ein gleichzeitiges Offenstehen beider Klappen ausgeschlossen ist.

Über den Räumler erfolgt der Materialaustrag zur Reaktorschnecke.



Revisionsdeckel
Schleuse oben

Druckluftzylinder
Schleuse oben
mit Sensoren

Revisionsdeckel
Schleuse unten

Druckluftzylinder
Schleuse unten
mit Sensoren

Abbildung 9: Beschicker

3.1.2 Reaktor

Über die Reaktorschnecke gelangt das Holz in den eigentlichen Reaktor.

Im Reaktor befindet sich ein Füllstandsensoren, der den Materialzufluss zum Reaktor steuert. Im Oberteil des Reaktors wird die Vergasungsluft über ein Druckgebläse zugeführt, sodass die Luft an den Luftdüsen in den Reaktor eingeblasen wird. Der Reaktor zündet elektrisch, benötigt also eine externe Energiezufuhr, so dass die Vergasung nach einer vorherigen Abschaltung in Gang kommt und sich dann selbst mit Energie versorgt. Mit den Zündstäben wird das kontrollierte Glutbett (d.h. die Oxidations- und Reduktionszone) erzeugt, welches sich im eingeschnürten Bereich des Reaktorraums befindet.

Die Reduktionszone befindet sich auf einem Rost mit Holzkohlebett (s. Kapitel 2.3, Reduktion). Dieses Holzkohlebett kann mit einem Drehrostmotor bewegt werden. Dort findet schließlich die Umwandlung der Verbrennungsprodukte in brennbare Gase statt. Der Holzkohlerost ist pyramidenförmig und der erste Gasabzug befindet sich 100mm-150mm unterhalb der Temperaturfühler.

Das entstandene Synthesegas verlässt den Reaktor an der Unterseite.

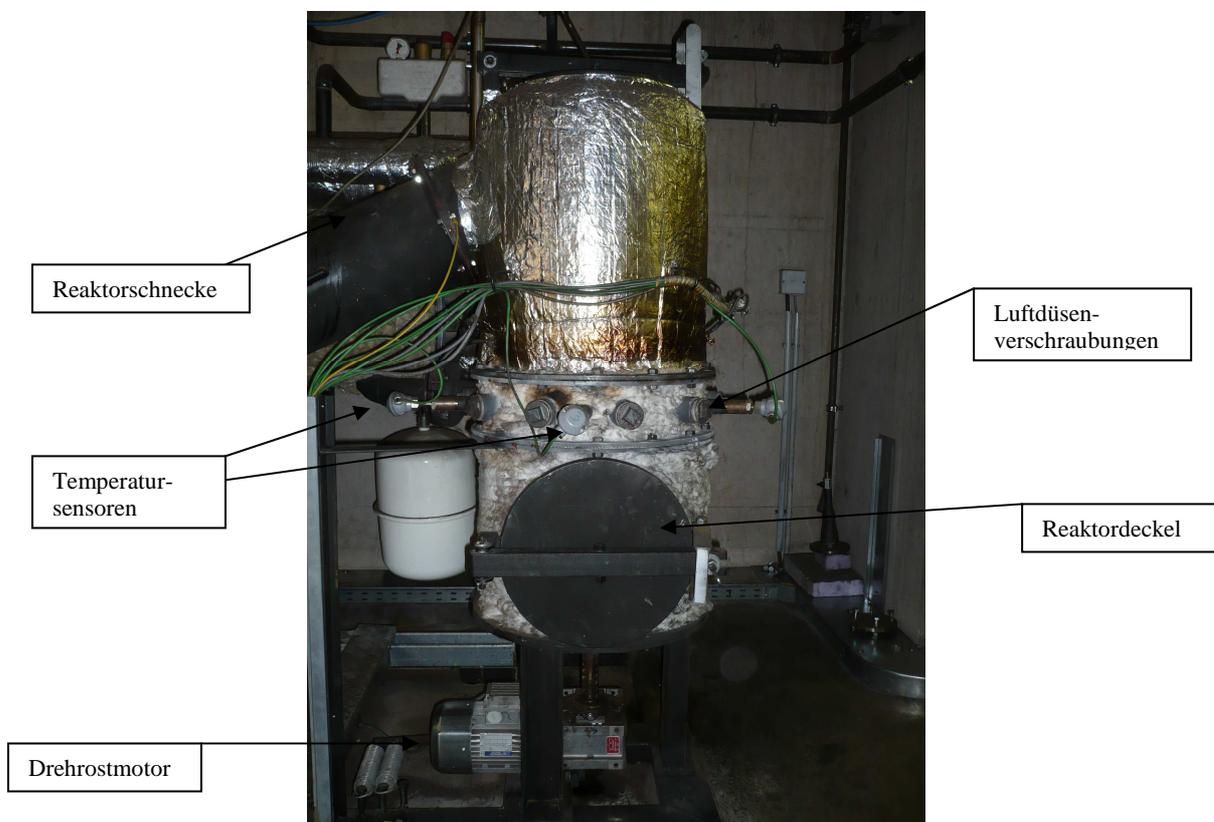


Abbildung 10: Reaktor

3.1.3 Druckgebläse und Wärmetauscher

Die zur Verbrennung benötigte Luft (s. Gl.7) wird über einen Seitenkanalverdichter des Typ SD 6M, 50 Hertz, der Firma Elektror in den Reaktor geführt. Der Volumenstrom wird über einen Frequenzumrichter geregelt und zwischen 32Hz und 40 Hz (70%-80% Lüfterleistung) betrieben. Dies geschieht bei Überdruck.

Die zuzuführende Vergasungsluft wird, bevor sie in den Reaktor gelangt, in einem Doppelrohrwärmetauscher vorgewärmt. Dies geschieht mit Wärme, die dem entstandenem Synthesegas entzogen wird, welches den Reaktor an der Unterseite verlässt. Gleichzeitig wird so das Synthesegas gekühlt.



Abbildung 11: Druckgebläse und Wärmetauscher

Um das Synthesegas weiter abzukühlen, folgen drei weitere Doppelrohrwärmetauscher, in denen das Synthesegas mit Wasser gekühlt wird.

3.1.4 Filter und Ascheaustrag

Das Synthesegas durchläuft den Filter, welcher aus einem Nomex-Flies besteht, und wird so von der Asche und dem unverbrannten Holzkohlekoks gereinigt.

Die anfallende Asche wird über eine Ascheschnecke und ein Schleusensystem ausgetragen. Dieses besteht aus einer Klappe und einem Schieber sowie einem Saug-/Druckgebläse. Das Schleusensystem wird vom SPS so gesteuert, dass ein gleichzeitiges Offenstehen der Klappen ausgeschlossen ist.

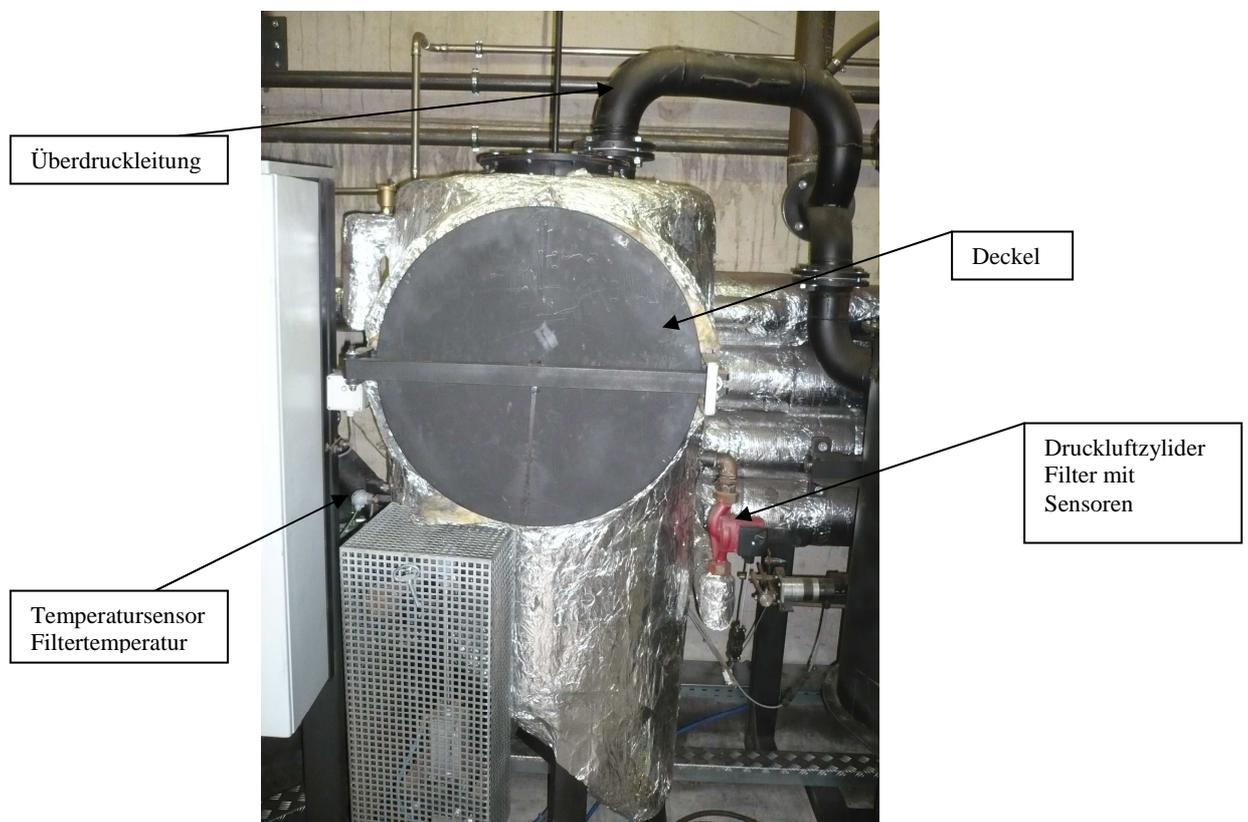


Abbildung 12: Filter

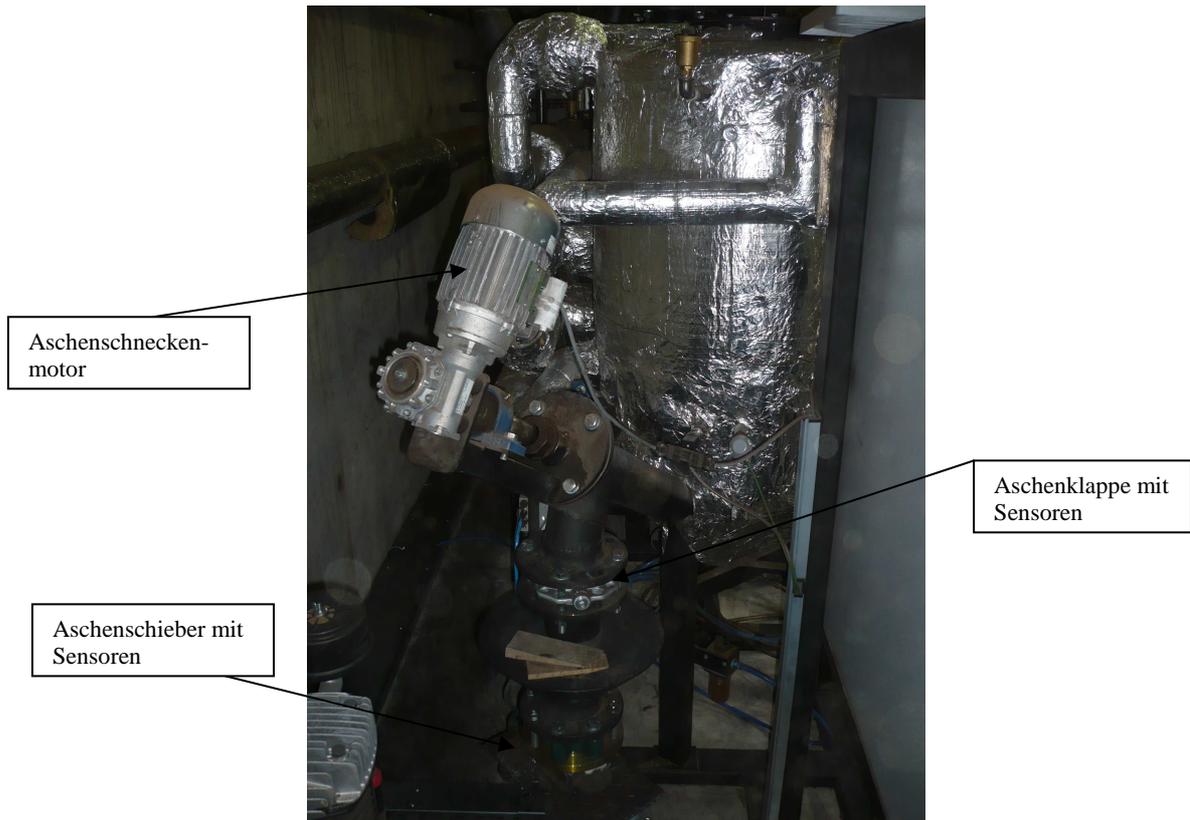


Abbildung 13: Ascheaustrag

3.1.5 Notfilter

Der Notfilter oder Sicherheitsfilter dient als Motorschutz, falls ein Filterdefekt auftritt und Stäube/Asche oder eine erhohte Teerfracht im Synthesegas vorhanden sind.

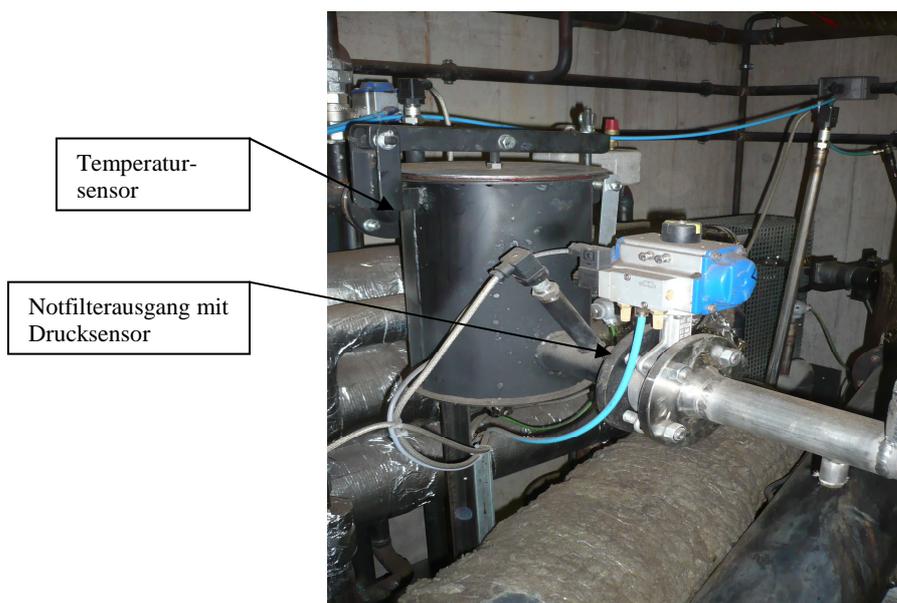


Abbildung 14: Notfilter

3.1.6 Blockheizkraftwerk

Das im Reaktor gewonnene Synthesegas wird einem Blockheizkraftwerk (BHKW) der Firma Weigel in Elektrizität und Wärme umgewandelt. Das BHKW besteht aus einem Motor, Generator und einem internen Abgaswärmetauscher.

Der Motor, mit Turbolader, 5,7 Liter Hubraum, 1500 Umdrehungen pro Minute, 8 Takt, bestimmt in gewisser Weise die Zufuhr des Gasgemisches Synthesegas/Luft in den Reaktor sowie in das BHKW. Es kann nicht mehr Luft durch den Seitenkanalverdichter zugeführt werden, als durch den Motor abgenommen werden kann. Der Verbrennungsmotor kann mit Erdgas gestartet werden.

Das Mischungsverhältnis aus Synthesegas und Luft am BHKW wird über eine Lambda Sonde geregelt. Die Regelung der Lambda Sonde erfolgt über die Lambda Spannung, die wiederum einen Belimo-Antrieb steuert, der mehr Luft oder weniger hinzuführt.

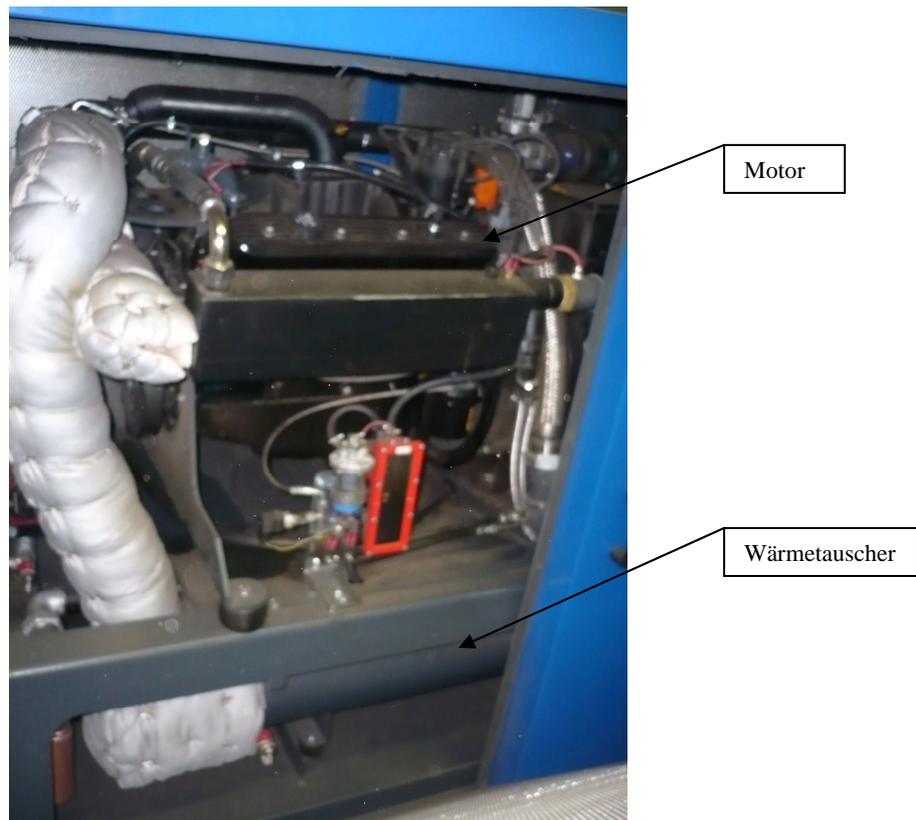


Abbildung 15: BHKW mit Wärmetauscher

3.1.7 Pufferspeicher

Damit die erzeugte Wärmemenge überhaupt vom Wärmenetz abgenommen werden kann, wird ein Pufferspeicher benötigt.

Damit kann die nicht benötigte Energie zwischengespeichert und später abgerufen werden, für Heiz- beziehungsweise Trocknungszwecke der Holzhackschnitzel.

Die Wärmeströme der abgenommenen Wärme am Reaktor und am Abgaswärmetauscher des BHKW gelangen in den Pufferspeicher (s. Abbildung 16).

3.2 Anlagenbeschreibung – Funktionsweise

Die in den vorausgegangenen Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.7 beschriebenen Anlagenkomponenten lassen sich in dem in Abbildung 16 dargestellten Fließbild zusammenfassen.

Über die Befüllung und Beschickung (s. Kapitel 3.1.1) wird das Holz dem Reaktor zugefügt. Die Anforderung des Holzes übernimmt ein Füllstandsensor im Beschicker sowie im Reaktor. Das Synthesegas verlässt den Reaktor an der Unterseite mit 600°C-700°C. Dieses Gas wird in den ersten Wärmetauscher (s. Kapitel 3.1.3) geführt und runtergekühlt.

Anschließend durchläuft das Synthesegas drei Wärmetauscher und wird im Filter gereinigt.

Nachdem das Synthesegas den Filter verlassen hat, wird es über einen weiteren Wärmetauscher weiter abgekühlt, sodass es den Notfilter/Sicherheitsfilter (s. Kapitel 3.1.5) mit ungefähr 80°C- 90°C passiert.

Das Synthesegas wird nach dem Luftfilter am Gasmischer mit Luft vermischt und dem BHKW mit 70°C-80°C zugeführt.

Die Motorabgase des BHKW werden über einen Abgaskatalysator und einen Abgaswärmetauscher ins Freie abgeführt.

Bei den verschiedenen Verfahrensschritten fällt Abwärme an, die für Heizzwecke genutzt werden soll.

Die Abwärme wird von zwei mit Wasser gefüllten Heizkreisen aufgenommen. Beim ersten Kreislauf wird zuerst das Wasser durch die drei Gas/Wasser Wärmetauschern nach dem Reaktor und dem Wärmetauscher nach dem Filter, geschickt. Anschließend gelangt das erwärmte Wasser zum Filter, um diesen auf Temperatur zu bringen (ungefähr 130°C).

Über einen Plattenwärmetauscher wird dem System zum Wasserkreislauf des Verbrauchers gekoppelt, um Wärme abzuziehen.

Das BHKW, mit dem internen Wärmetauscher, wird mit dem zweiten Wasserkreislauf verbunden. Die anfallende Abwärme wird an den Verbraucher abgegeben, indem der Wasserkreislauf an einen weiteren Plattenwärmetauscher gekoppelt ist.

Die beiden Plattenwärmetauscher wiederum sind mit einem Pufferspeicher gekoppelt. (s. Kapitel 3.1.7)

Mithilfe dieses Pufferspeichers wird Luft erwärmt und die Hackschnitzel mit ungefähr 70°C vorgetrocknet.

3.2.1 Fließbild

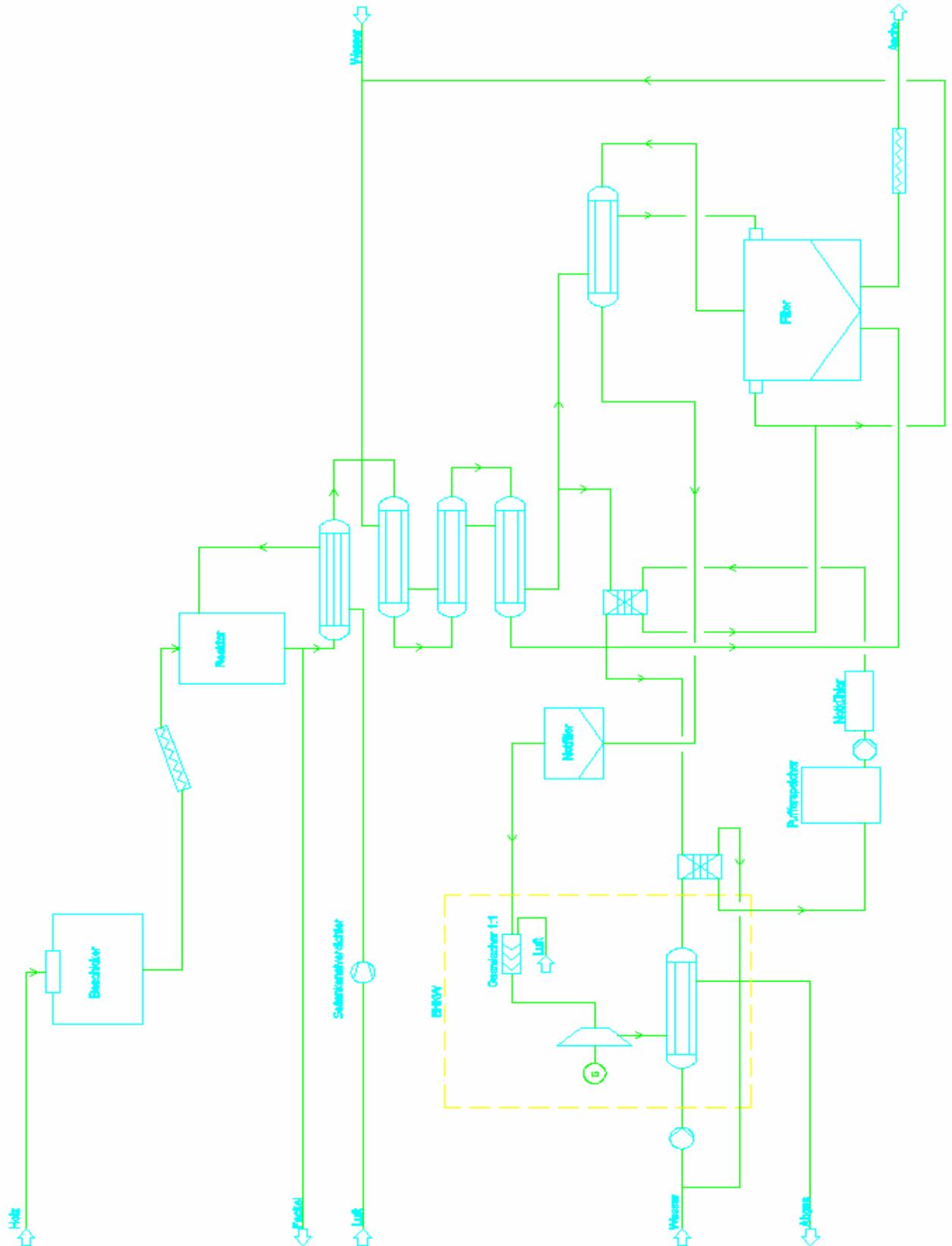


Abbildung 16: Fließbild

3.3 Zwischenergebnis

Die Entwicklung von dezentralen Vergasungssystemen wird vor allem in Europa vorangetrieben. Bei neuen Anlagen und Projekten zeigt sich aber immer wieder, dass die Probleme unterschätzt werden und sich deshalb lange Inbetriebzeiten ergeben können. Probleme ergeben sich einerseits aus dem im Gas enthaltenen Teeren, sowie die Brennstoffförderung, die mit dem inhomogenen Brennstoff nicht zu recht kommt. Ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb scheitert oft an dem trivial erscheinenden Problem der kontinuierlichen Brennstoffzufuhr. [14]

Die Beschickung der Holzvergasungsanlage war zunächst auch in der zu untersuchenden Anlage das zentrale Problem. Häufige Ursache für Störungen des Betriebs sind zu große Partikel, welche die Förderschnecken blockieren, in der Anlage verkanten und dadurch die Zufuhr von Holz unterbrechen.

Dies geschah, obwohl die Holzhackschnitzel ohne abstehendes Geäst geliefert wurden und nicht größer als 10 cm waren.

Die beiden Kratzböden waren nicht mit der Querförder- und der Trogschnecke aufeinander abgestimmt, sodass es immer wieder zu Verstopfungen in den Förderschnecken und im Aufgabentrichter kam. Dies führte wiederholt zum Stillstand der Anlage.

Sobald es zum Stillstand der Anlage kommt, bleibt auch die Trocknung der Holzhackschnitzel aus, da die beiden Wasserkreisläufe mit Pufferspeicher (s. Kapitel 3.2.1) mit der erzeugten Abwärme zusammenhängen. Wird keine Abwärme erzeugt, kann auch keine Trocknung stattfinden.

Die Gasqualität wird von der Feuchte der Holzhackschnitzel mit beeinflusst (s. Kapitel 2.5). Feuchte Holzhackschnitzel erzeugen mehr Emission beziehungsweise es geht mehr Energie im Reaktor verloren, da diese aufgewendet werden muss, das Wasser zu verdampfen.

Nach der Trocknung haben die Holzhackschnitzel eine Feuchte von 3-11%. Ohne die Trocknung wurde eine Feuchte von bis zu 30% gemessen.

Durch die Reaktorgeometrie, die getaktete Brennstoffzugabe in sehr kleinen Einheiten und die ständige Vergleichmäßigung der Reaktionsoberfläche sollte das Problem des Teers nicht bestehen und nahezu teerfreies Gas erzeugt werden.

Der Reaktor ist so ausgelegt, dass alle entstandenen Gase durch den eingeschnürten Bereich des Reaktors (Glutbett) hindurch strömen müssen. So wird versucht zu verhindern, dass kalte Zonen (Zonen mit tieferer Temperatur) entstehen und kondensierbare, organische Bestandteile im Synthesegas vorkommen.

Zur Überprüfung der Temperaturen sind fünf Temperaturfühler am Reaktor angebracht. Allerdings befinden sich diese alle auf einer Ebene mit der Vergasungslufteinbringung. Die Temperaturen werden zu einem Mittelwert gebildet. Es werden Temperaturen von 430°C – 470°C gemessen. Die Fühler befinden sich oberhalb der Reduktionszone, damit ist die Temperatur zu niedrig, um in der Oxidationszone zu liegen. Das bedeutet, dass dort die Temperatur der vorgewärmten eingeströmten Vergasungsluft gemessen wird.

Eine Kontrolle zu anderen Temperaturzonen, wie z.B. der tatsächlichen Temperatur in der Oxidationszone ist nicht vorhanden.

Die Holzvergasungsanlage hat zunächst durchschnittlich 30-35 kW/h erzeugt. Die angestrebten 50 kW/h wurden nicht erreicht.

Um eine Problemanalyse der Anlage durchzuführen und die verschiedenen Parameter einzustellen, wird eine geeignete Messtechnik benötigt.

Die Massebestimmung der zugeführten Holzhackschnitzel-Menge über Abwiegung ist nicht möglich. Somit ist der Verbrauch an Holzhackschnitzeln (Massenstrom Holzhackschnitzel) pro Stunde und die erzeugte elektrische Leistung unbekannt.

Die Ermittlung von Volumenstrom an Synthesegas und Volumenstrom an Vergasungsluft (durch Seitenkanalverdichter) werden messtechnisch nicht aufgenommen.

Der Motor steuert im Wesentlichen die Menge des abzunehmenden Synthesegases (durch den Motorsaugzuges), während der Füllstandsensoren im Reaktor die benötigten Holzhackschnitzel nachregelt.

Der Volumenstrom an Synthesegas lässt sich über den Motorsaugzug berechnen. Der Volumenstrom an Vergasungsluft kann nur abgeschätzt werden, da der Volumenstrom von der Gesamtdruckdifferenz abhängig ist.

Die Druckmessung beim Beschicker, an der unteren Schleuse (s. Kapitel 3.2, Fließbild), kommt dem Gesamtdruck demnach am Nächsten. Allerdings befinden sich dazwischen noch die zu vergasenden Holzhackschnitzel und die gefüllte Förderschnecke zum Reaktor, was die Abschätzung zum Gesamtdruck ungenau werden lässt.

Um die Synthesegasqualität zu verbessern beziehungsweise Vergleiche herstellen zu können, wird die Vergasungsluftzufuhr frequenzweise erhöht oder erniedrigt (am Seitenkanalverdichter). Mit einer Gasanalyse können die Gasqualität und die dadurch erwirkte elektrische Leistung verglichen und optimiert werden.

Des Weiteren fehlt die Aufnahme der Wärmemenge über einen Wärmehähler. Es können nur Abschätzungen über die ausgekoppelte Wärme getroffen werden.

Somit kann bereits an dieser Stelle festgehalten werden, dass die in der Anlage verwendete Messtechnik zwar für den Grundbetrieb der Anlage ausreicht, nicht jedoch für ihre Optimierung. Um ihre Effizienz zu erhöhen, wären weitere messtechnische Aufnahmen der Anlage und ein Vergleich der Ergebnisse in Form von Energiebilanzen notwendig. Das ist bei einer Anlage, die insgesamt fast 500.000 Euro teuer ist, eigentlich unverständlich.

4. Datenanalyse

Die Datenaufnahme an der Anlage gestaltete sich als schwierig (s. Kapitel 3.3).

Der Massenstrom an Holz, der Volumenstrom an Synthesegas und die entstandene Wärmemenge werden messtechnisch nicht erfasst. Es ist unklar welche Menge an Holzhackschnitzel pro Stunde wie viel Synthesegas entstehen lassen, um die angezeigte elektrische Leistung zu erreichen, die das BHKW dabei an Strom in das Netz einspeist. Daher war es notwendig, durch eigene einfache Messungen die Volumen- und Energieströme in der Anlage abzuschätzen.

So kann beispielsweise auch der Volumenstrom der zugeführten Vergasungsluft nicht direkt gemessen werden. Allerdings wird neben der elektrischen Leistung der Gesamtanlage auch die Lüfterleistung erfasst, mit der der Seitenkanalverdichter Luft in den Reaktor einführt. Mit einer Änderung der Lüfterleistung wird eine Frequenz- und damit Druckänderung des Lüfters bewirkt, die wiederum die Zufuhr an Vergasungsluft bestimmt. Damit wäre zumindest eine grobe Abschätzung der Gesamtdruckdifferenz der Vergasungsluftzufuhr über die Lüfterleistung möglich. Allerdings ist die nächste Druckmessung erst an der unteren Schleuse des Beschickers. Dazwischen liegen noch die zu vergasenden Holzhackschnitzel (s. Kapitel 3.3).

Der Seitenkanalverdichter wurde anfangs mit 75% (37,5 Hz) Lüfterleistung betrieben, woraus sich auf dem beschriebenen Weg etwa die in Abbildung 17 dargestellte Druckkennlinie ableiten lässt.

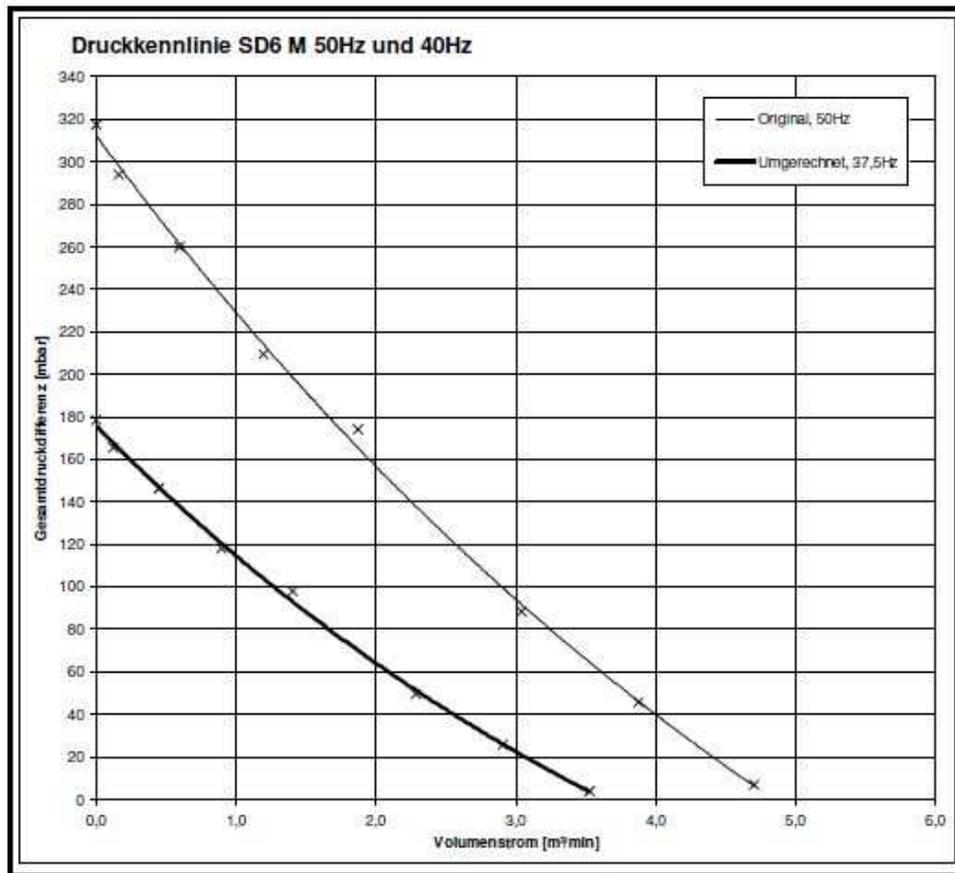


Abbildung 17 : Vergleich der Kennlinien des SD der Firma Elektor - 100% und 70% Lüfterleistung

4.1 Durchführung der Messreihen

Die erzeugte elektrische Leistung des BHKW hängt unter anderem von der Synthesegasqualität ab. Diese wiederum ist abhängig von dem Luftverhältnis (s. Kapitel 2.5 und Abbildung 6).

Um eine erste Optimierung der Anlage zu erlangen, wurden die Frequenzen des Seitenkanalverdichters verändert und so die Luftzufuhr im Reaktor geregelt. Diese Umstellung kann eine Änderung der Gaszusammensetzung nach sich ziehen. Darüber hinaus wurde mit der Frequenzänderung die erzeugte elektrische Leistung dokumentiert. Zu jeder Frequenzänderung wurde der Massenstrom an Holz, die elektrische Leistung und die Gaszusammensetzung des entstandenen Synthesegases aufgenommen, was in den nachfolgenden Abschnitten näher ausgeführt werden soll.

4.1.1 Holzanalyse

Bei den Holzhackschnitzeln handelt es sich um Mischholz mit dem Hauptbestandteil Buche. Eine Elementaranalyse von Holz, die eine Bestimmung des Massenanteils (in Prozent) der Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Aschegehalt, ergibt:

$$\text{C: } 0,4975 \quad \text{H: } 0,0597 \quad \text{O: } 0,4378 \quad \text{a: } 0,005 \text{ [12]}$$

Die Elementaranalyse ist für die Berechnung des rechnerischen Mindestluftbedarfs nötig (s. Gl. 7).

Der Feuchteanteil im Holz ist bei der Vergasung von entscheidender Bedeutung (s. Kapitel 2.5). Bei jeder Messung wurde der energetische Zustand der Holzhackschnitzel durch Probenentnahme untersucht. Die Proben zur Holzfeuchtebestimmung wurden an der Fachhochschule Offenburg durch Trocknung im Trockenofen bei 105°C durchgeführt.

$$w = \frac{m_{Brfe} - m_{Brtr}}{m_{Brfe}} \quad \text{[Gl.8]}$$

m_{Brfe} : Gewicht feuchter Brennstoff

m_{Brtr} : Gewicht trockener Brennstoff

Zusätzlich wurde der Brennwert (früher auch oberer Heizwert genannt) des trockenen Holzes mit Hilfe eines Bombenkalorimeters bestimmt. Die Bestimmung ergab folgendes Ergebnis:

$$H_{o Br tr} = 19088 \frac{J}{g}$$

4.1.2 Gasanalyse

Die Entnahme der Gasproben erfolgte über einen Kugelhahn, der hinter dem Notfilter installiert wurde. Da die Anlage unter Unterdruck betrieben wird, wurde mithilfe einer Membranpumpe das Synthesegas in einen Gasbeutel gepumpt. Die Analyse der Gaszusammensetzung erfolgte an der Fachhochschule. Zum Einsatz kam dabei ein Gasanalysesystem mit Kühler zur Messung der trockenen Komponenten CO, CO₂, H₂, CH₄ und O₂.



Abbildung 18: Synthesegasentnahmestelle

4.1.3 Probleme bei den Messreihen

Die ersten Aufnahmen der Messreihen gestalteten sich als schwierig, denn die Anlage schaltete sich durch mehrere und wiederholt auftretende Probleme immer wieder aus.

Zunächst musste immer wieder die Beschickung optimiert werden. Neben dem Auftreten von Verstopfungen durch die Holzhackschnitzel musste die Taktung der verschiedenen Transportschnecken und Kratzböden aufeinander angepasst werden, sodass der Beschicker oder die Reaktorschnecke nicht mehr leer lief oder sogar zu voll wurde. Die Querförderschnecke wurde aufgrund dieser auftretenden Probleme auch ausgetauscht.

Teilweise fiel auch die Sensorik der einzelnen Anlagenkomponenten aus, was zur Abschaltung der Anlage führt. Ebenfalls häufig kam es zu Störungen der Sensoren am Beschicker, was den gesamten Ablauf wiederholt behinderte.

Zudem ist während der Messreihen auch die untere Schleusenklappe im Beschicker gebrochen.

Zwar kamen Probleme am Reaktor selbst eher selten vor, aber auch hier kam es im Falle von einzelnen quergestellten Holzhackschnitzeln zum Ausschalten der Anlage. Der Füllstandsensor erkennt dies als unbegründete Verstopfung.

4.2 Messreihen

Bei den ersten Leistungsmessungen wurde die Lüfterleistung schrittweise von 72,5% (36,3 Hz Lüfterleistung auf 80% (40 Hz) erhöht. Dabei wurde der Holzhackschnitzel-Eintrag, anhand der vom Beschicker durchgeführten Hübe, aufgenommen (s. Kapitel 5.1.1) und die Gaszusammensetzung des trockenen Synthesegases analysiert.

1. Leistungsmessung

Lüfterleistung	kWh	Hübe	Feuchte Holz %	Gaszusammensetzung trocken Vol.%			
				CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
72,5	34	20	3,03	9,2	25,7	2,5	18,4
75,0	35	20	3,03	9,5	25,2	2,4	18,5
77,5	37	21	3,03	9,0	26,0	2,3	18,3

Tabelle 2: 1. Leistungsmessung

2. Leistungsmessung

Lüfterleistung	kWh	Hübe	Feuchte Holz %	Gaszusammensetzung trocken Vol.%			
				CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
75,0	34	20	3,2	9,1	25,7	2,4	18,4
77,5	35	21	3,2	9,3	25,3	2,3	18,3
80,0	36	21	3,2	8,7	26,2	2,2	18,3

Tabelle 3: 2. Leistungsmessung

Als Ergebnis dieser Leistungsmessungen kann formuliert werden, dass einer Erhöhung der Lüfterleistung eine Erhöhung der kWh folgt. An der Gaszusammensetzung ändert sich jedoch kaum etwas.

Das wiederum bedeutet, dass die Luft die der Seitenkanalverdichter in den Reaktor einbringt, keine Verbesserung der Gasqualität und somit auch keine Erhöhung der elektrischen Leistung erwirkt. Viel mehr bringt der Seitenkanalverdichter einen Vorschub des entstehenden Synthesegases zum Motor.

Der Motor muss den gesamten Volumenstrom an Synthesegas somit nicht alleine bewältigen. Weitere Messungen haben dann diese Annahme bestätigt.

Eine deutliche Erhöhung der kWh wurde erst erreicht, als die Lambdaspaltung (s. Kapitel 3.1.6) manuell durch den Betreiber der Anlage Spanner GmbH geändert wurde. Der Belimo-

Antrieb war defekt und so konnte folglich kein geeigneter Volumenstrom des Gasgemisches aus Verbrennungsluft und Synthesegas dem Motor zugeführt werden. Je kleiner die Lambdaspaltung, desto höher die Regelung des Belimo-Antriebs, der damit mehr Gasgemisch dem Motor zuführt. Die Lambda Spannung wurde von ungefähr 40 mV auf 20 mV umgestellt.

Messreihen mit der veränderten Lambdaspaltung:

3. Leistungsmessung

Lüfterleistung	kWh	Hübe	Feuchte Holz %	Gaszusammensetzung trocken Vol. %			
				CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
75	42	24	3,1	8,9	26,3	2,1	18,8
77,5	44	25	3,1	8,6	26,2	2,9	17,7
80	45	24	3,1	9,5	25,2	2,3	17,8

Tabelle 4: 3. Leistungsmessung

4. Leistungsmessung

Lüfterleistung	kWh	Hübe	Feuchte Holz %	Gaszusammensetzung trocken Vol. %			
				CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
75	43	24	3,5	9,9	24,6	2,4	18,1
77,5	45	26	4,1	10,0	24,4	2,3	18,3
80	47	26	3,5	10,0	24,5	2,5	18,3

Tabelle 5: 4. Leistungsmessung

Nach der Umstellung der Lambdaspaltung hat sich die elektrische Leistung und die Anzahl der Hübe des Beschickers erhöht. Die Gaszusammensetzung ist nahezu identisch geblieben verglichen mit der der vorherigen Leistungsmessungen. Die erhöhte elektrische Leistung lässt sich mit einem erhöhten Volumenstrom des Gasgemisches erklären, welches dem Motor zugeführt wurde (s. Kapitel 5.5.4).

5. Auswertung

Die Auswertung beinhaltet die in der Analyse der Anlage aufgenommenen Messdaten, um Massen- und Energiebilanzen zu erstellen. Auf diese Weise lassen sich die unterschiedlichen Versuche vergleichen.

Die Massenbilanz lässt sich aus dem gemessenen Massenstrom an zu vergasendem Holz und des dabei entstandenen Synthesegas erstellen. Weitere Faktoren sind die zugeführten Vergasungsluft und die Vergasungsrückstände.

Für die Energiebilanz müssen der untere Heizwert des Synthesegases und die Enthalpie-Ströme des Holzes und des Synthesegases bestimmt werden.

Aus der Energiebilanz lassen sich dann die verschiedenen Wirkungsgrade errechnen.

5.1 Massenbilanzen

Die Massenbilanz des Holzvergasers kann wie folgt angegeben werden:

$$\overset{\bullet}{m}_{Br, fe} + \overset{\bullet}{m}_{VL, fe} = \overset{\bullet}{m}_{Syn, fe} + \overset{\bullet}{m}_{Asche} \quad [Gl.9]$$

Der Massenstrom an Vergasungsluft ist unbekannt. Der Massenstrom kann aber bei bekannter Masse an Asche, welche bei der Vergasung entsteht, berechnet werden.

Allerdings ist der Ascheaustrag zeitlich getaktet, sodass immer der gleiche Massestrom an Asche ausgetragen wird. Dies erfolgt unabhängig von der Lüfterleistung und somit der Vergasungsluftzufuhr des Seitenkanalverdichters.

Die Masse an Asche kann auch über die Elementaranalyse berechnet werden. Holz hat einen Aschegehalt von 0,5% (s. Kapitel 4.1.1).

Die Vergasung der Holzhackschnitzel erfolgt jedoch nicht vollständig, aufgrund dessen sich weiterhin Kohlenstoffreste in der Asche befinden. Dies macht eine genaue Berechnung nicht möglich.

Nach Bestimmung des Glührückstandes bei 550°C bestand die abgeführte „Asche“ aus 70% Kohlenstoffresten und 30% Asche.

5.1.1 Massenstrom Brennstoff

Messtechnisch wurde der Massenstrom an Holzhackschnitzeln nicht erfasst.

Eine Abschätzung des Massenstroms erfolgte über die Auswiegung des im Beschicker (zwischen oberer und unterer Schleuse) befindlichen Hubes.

Um die getaktete Brennstoffzugabe in den Reaktor zu gewährleisten, wird die untere Klappe im Beschicker bei niedrigem Füllstand geöffnet. Schließt die untere Klappe, öffnet sich die obere Klappe und es werden zeitgesteuert wieder Holzhackschnitzel über die Trogschnecke eingebracht.

Die einzelnen Hübe wurden über die Zeit gezählt.

$$\dot{m}_{Br, fe} = \frac{m_{Hub}}{t} \cdot n_{Hub} \quad [Gl.10]$$

m_{Hub} : Masse ausgewogener Hub in kg

t : Zeit in h

n_{Hub} : Anzahl Hübe in der Zeit t

5.1.2 Volumenstrom Gasmischung (Luft/Synthesegas)

Der Massenstrom an Synthesegas wird messtechnisch nicht ermittelt.

Die ungefähre Menge an Ansaugvolumen des Motors lässt sich anhand der Motordrehzahl und dem Hubraum ermitteln. Mit dem so ermittelten Ansaugvolumen und dem Mischungsverhältnis, von Synthesegas und Verbrennungsluft, kann der Volumenstrom an Synthesegas abgeschätzt werden.

Motor:

- Drehzahl $n = 1500 \text{ min}^{-1}$
- Hubraum: 5,7 Liter bzw. 0,0057 m³
- 8 Taktzylindermotor mit Turbolader

$$\dot{V}_S = \frac{V_H \cdot n}{2} \quad [\text{Gl.11}]$$

V_S : Ansaugvolumenstrom

V_H : Hubvolumen

n : Drehzahl

Die Division durch zwei erfolgt, da pro Umdrehung immer nur zwei Kolben das Hubvolumen ansaugen.

$$\dot{V}_S = \frac{0,057 \text{ m}^3 \cdot 1500}{2 \cdot 60 \text{ s}} \quad [\text{Gl.12}]$$

$$\dot{V}_S = 0,07125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 256,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad [\text{Gl.13}]$$

Die zur Verbrennung benötigte genaue Menge an Luft, die durch den Motor angesaugt wird, wird nicht erfasst.

Aus diesem Grund müssen die theoretischen Berechnungen des Motors mit Holzgas der Firma Weigel zu Hilfe heran gezogen werden, um so das Mischungsverhältnis Synthesegas/Luft zu berechnen (s. Kapitel 5.1.4), da dies zur Berechnung des Volumenstroms an Synthesegas benötigt wird.

5.1.3 Volumenstrom Synthesegas

In Kapitel 5.1.2 wurde das theoretische Ansaugvolumen des Motors berechnet. Bei idealer Motorleistung würde immer genau dieser Volumenstrom an Gasmisch eingezogen werden. Der Motor hat jedoch 1500 Umdrehungen pro Minute, weshalb nicht viel Zeit für die Einströmung bleibt. Das einströmende Synthesegas/Luft Gemisch erfährt Strömungswiderstände und muss beschleunigt sowie abgebremst werden. Aus diesem Grund

kann nach dem Ladungswechsel im Zylinder die Frischgasmenge (Liefergrad) höher oder niedriger sein, als es dem Hubraum entspricht.

Die Firma Weigel hat Abschätzungen zu den Liefergraden bei erzeugten elektrischen Leistungen durchgeführt, wobei die Erfahrungen gerade mit Holzgas noch begrenzt sind. Der dabei entstandene Gasverbrauch wurde von der Firma Weigel am Prüfstand gemessen.

Elektrische Leistung	Liefergrad	Gasverbrauch
30 kW	80 %	120 kW
40 kW	106 %	160 kW
50 kW	132 %	200 kW

Tabelle 6: Gasmotorenberechnung der Fa. Weigel

Das genaue Ansaugvolumen berechnet sich aus dem Liefergrad und dem theoretischen Ansaugvolumen des Motors:

$$\dot{V}_{saug} = \dot{V}_s \cdot \text{Liefergrad} \quad [\text{Gl.14}]$$

Der Gasvolumenstrom berechnet sich wie folgt:

$$\dot{V}_{SG,fe} = \frac{\text{Gasverbrauch}}{H_{u,SG,fe}} \quad [\text{Gl.15}]$$

$$\dot{V}_L = \dot{V}_{saug} - \dot{V}_{SG} \quad [\text{Gl.16}]$$

Angaben vom Hersteller des BHKW:

Gasverbrauch in kW

$H_{u,SG,fe}$: unterer Heizwert (s. Kapitel 5.2.1) in $\frac{kWh}{m^3}$

\dot{V}_L : Luftvolumenstrom

5.1.4 Massenstrom an Synthesegas

Der Massenstrom an Synthesegas lässt sich aus dem Volumenstrom und der Dichte des Synthesegases berechnen:

$$\dot{m}_{SG,fe} = \dot{V}_{SG,fe} \cdot \rho_{SG,fe} \quad [\text{Gl.17}]$$

Die Dichte des Synthesegases lässt sich wie folgt berechnen:

$$\rho_{SG,fe} = \sum (y_i \cdot \rho_i) \quad [\text{Gl.18}]$$

Mit der Dichte ρ_i der Einzelkomponenten aus der Gaszusammensetzung ergibt sich:

$$\rho_i = \frac{p_{SG} \cdot M_i}{R \cdot T_{SG}} \quad [\text{Gl.19}]$$

Dabei bedeutet:

$$R : \text{allgemeine Gaskonstante } 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

5.2 Energiebilanzen

5.2.1 Unterer Heizwert feuchtes Synthesegas

Der untere Heizwert H_u gibt den Wert der brennstoffmengenbezogene frei werdenden Energie wieder, welche bei vollständiger Verbrennung entsteht. Diese wird frei, wenn die Verbrennungsprodukte zurück auf die Bezugstemperatur gekühlt werden, wobei Wasserdampf gedacht dampfförmig bleibt. [13]

Der untere Heizwert berechnet sich durch den Brennwert abzüglich der Kondensationswärme des sich bildenden Wassers. [9]

Der untere Heizwert des Synthesegases berechnet sich anteilig aus dem Heizwert der einzelnen Komponenten i .

Die Inertgase, welche bei der Verbrennung nicht oxidieren, werden nicht mit einbezogen.

Der Heizwert wird also nur aus den Komponenten CO, H₂ und CH₄ gebildet.

$$H_{U,SG,fe} = \sum H_{U,i,fe} \cdot \xi_i \quad [\text{Gl.22}]$$

mit:

$$\xi_i = \frac{\rho_i}{\rho_{SG,fe}} \cdot y_i \quad [\text{Gl.23}]$$

Dabei bedeutet:

ξ_i = Massenanteil Einzelkomponente

Die in der Gleichung verwendeten spezifischen unteren Heizwerte für die Gase sind nach [14]:

- CO 10,103 MJ/kg
- H₂ 119,962 MJ/kg
- CH₄ 50,012 MJ/kg

5.2.2 Unterer Heizwert feuchter Brennstoff

Der ermittelte Brennwert der Holzhackschnitzel (s. Kapitel 4.1.1) wird in den unteren Heizwert umgerechnet:

$$H_{U,Br,fe} = h_{o,Br,tr} (1 - w) - \Delta h_{v,H_2O} (8,937 \cdot h + w) \quad [Gl.24]$$

Mit der Kondensationsenthalpie bei 25°C:

$$\Delta h_{v,H_2O} = 2442 \frac{kJ}{kg}$$

5.2.3 Wärmemenge

Aufgrund der zwei Wasserkreisläufe gibt die Holzvergasungsanlage Wärme ab (s. Kapitel 3.2.1).

Das Synthesegas verlässt den Reaktor mit 650-670°C und wird durch mehrere Wärmetauscher auf 70-80°C abgekühlt.

Sowohl diese Wärme, als auch die, die beim BHKW abgeführt wird, können zu Heizzwecken genutzt werden. Die Wärme am BHKW wird durch einen Abgaswärmetauscher von ungefähr 415°C auf 150°C gekühlt.

Fühlbare Wärme des Synthesegases :

$$\dot{Q}_{SG,fe} = \sum (\dot{m}_i \cdot c_{p,i,1\vartheta_{SG}} \cdot \vartheta_{1,SG}) - \sum (\dot{m}_i \cdot c_{p,i,2\vartheta_{SG}} \cdot \vartheta_{2,SG}) \quad [Gl.25]$$

mit:

$$\dot{m}_i = \rho_i \cdot y_i \cdot \dot{V}_{SG,fe} \quad [Gl.26]$$

Die Wärme, die vom Vergaser zum Motor verloren geht ist jedoch unklar, genauso wie die Wärmemenge, die am Abgaswärmetauscher abgeführt wird

Es wird kein Volumenstrom/Massenstrom aufgenommen und eine Abgasanalyse konnte auch nicht durchgeführt werden.

Aus diesem Grund ist es auch schwierig, Abschätzungen zur genutzten Wärmemenge zu machen. Laut Hersteller sollte ungefähr 10 kWh thermisch am Vergaser und 85-110 kWh thermisch am Abgaswärmetauscher abgeführt werden.

5.3 Wirkungsgrade

Die Bewertung energetischer Anlagen erfolgt oftmals über die Wirkungsgrade. Um die einzelnen Messreihen der Holzvergasungsanlage vergleichen zu können, müssen auch hier die Wirkungsgrade berechnet werden. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Wirkungsgrade eingegangen.

5.3.1 Elektrischer Wirkungsgrad

Der elektrische Wirkungsgrad gibt das Verhältnis von elektrischer erzeugter zu eingesetzter Energie an.

$$\eta_{el} = \frac{\dot{P}_{el}}{\dot{m}_{Br,fe} \cdot H_{u,Br,fe}} \quad [\text{Gl.27}]$$

mit:

$$P_{el} = \frac{W_{el}}{\Delta t} \quad [\text{Gl.28}]$$

Im Zähler steht die erfasste elektrische Arbeit, im Nenner, der der Anlage zugeführte Massenstrom an Holzhackschnitzel mit dem zugehörigen unteren Heizwert.

5.3.2 Thermischer Wirkungsgrad der Vergasung

Der thermische Wirkungsgrad gibt das Verhältnis von den nutzbaren Energieströmen, zur eingesetzten Energie an.

$$\eta_{therm} = \frac{\dot{m}_{SG,fe} \cdot H_{u,SG,fe} + \dot{Q}_{SG,fe}}{\dot{m}_{Br,fe} \cdot H_{u,Br,fe}} \quad [\text{Gl.29}]$$

Im Zähler steht der erfasste Massenstrom an Synthesegas mit dem zugehörigen unteren Heizwert wie auch die erfasste Wärme, die das Synthesegas abgibt.

Im Nenner, die der Anlage zugeführte Massenstrom an Holzhackschnitzel mit dem zugehörigen unteren Heizwert.

5.3.3 Vergasungswirkungsgrad/Kaltgas-Wirkungsgrad

Der Vergasungswirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der zugeführten zu der mit dem Synthesegas abgeführten Energie.

$$\eta_{KG} = \frac{\dot{m}_{SG,fe} \cdot H_{u,SG,fe}}{\dot{m}_{Br,fe} \cdot H_{u,Br,fe}} \quad [Gl.30]$$

5.4 Korrektur der Gasanalyse

Der Sauerstoffgehalt bei Holzgas liegt bei fast 0 Vol-%. Dies wurde auch durch eigene Messungen bestätigt.

Bei einigen Messreihen ist es aber nicht gelungen, saubere Gasproben zu nehmen. Es kam zu einer Beimischung von Umgebungsluft.

Der Sauerstoffgehalt konnte aber nach der Gasanalyse herausgerechnet werden.

Zuerst wird die enthaltene Luftmenge über den gemessenen Sauerstoffgehalt bestimmt:

$$y_{Luft} = \frac{y_{O_2}}{0,21} \quad [Gl.31]$$

Mit der Luftmenge y_{Luft} kann das Analysevolumen des Synthesegases ermittelt werden:

$$y_{SG} = 1 - y_{Luft} \quad [Gl.32]$$

Mit dem Analysevolumen des Synthesegases können die einzelnen Komponenten berechnet werden:

$$y_i = \frac{y_{i,Luft}}{y_{SG}} \quad [Gl.33]$$

5.5 Auswertung Messergebnisse

Die Gaszusammensetzung des Synthesegases änderte sich über die Versuchs- und Messreihen kaum. Die durchschnittliche trockene Gaszusammensetzung mit dem Vergasungsmittel Luft sieht wie folgt aus:

Gaskomponente	mit Vergasungsmittel Luft in Vol-%
CO	25,4
H ₂	18,3
CH ₄	2,3
CO ₂	9,4
N ₂	44,6

Tabelle 7: trockene Gaszusammensetzung Messreihen

Für die Auswertung und Vergleich der Ergebnisse wurde ein Excel-Datenblatt erstellt.

Als Konstanten konnte die durchschnittliche trockene Gaszusammensetzung, die durchschnittliche Holzfeuchte von 3,36% und die ausgewogene Masse der einzelnen Hübe (wurde zu einem Mittelwert verrechnet) gesehen werden.

Allerdings besteht das Synthesegas, welches dem Motor zugeführt wird, nicht aus der trockenen Gaszusammensetzung. Wasserdampf befindet sich zusätzlich in der feuchten Gaszusammensetzung. Da allerdings kein Messinstrument für die Feuchte des Synthesegases in der Anlage installiert ist, muss aus der Elementaranalyse, der trockenen Gaszusammensetzung und der Holzfeuchte der Wassergehalt im Synthesegas berechnet werden.

5.5.1 Berechnung des Wassergehalts im Synthesegas

Aus der durchschnittlichen Holzfeuchte von 3,36% folgt:

$$1 \text{ kg}_{Br,fe} = 0,9664 \text{ kg}_{Br,tr}$$

Nach der Elementaranalyse (s. Kapitel 4.1.1) besteht trockenes Holz aus 497,5 g C, 59,7g H, 437,8g O und 5 g Asche. Die Differenz aus gebundenem Wasserstoff im trockenem Holz und

gebundenem Wasserstoff im Synthesegas ist der Wasseranteil für die feuchte Gaszusammensetzung. Im nachfolgenden wird die Rechnung dazu ausgeführt:

Aus dem Anteil der Masse an Kohlenstoff im trockenen Brennstoff lässt sich die Masse im feuchten Brennstoff berechnen:

$$497,5 \frac{gC}{kg_{Br,tr}} \cdot 0,9664 kg_{Br,tr} = 480,784 \frac{gC}{kg_{Br,fe}}$$

Die Masse Kohlenstoff pro feuchten Brennstoff wird in mol Kohlenstoff pro feuchten Brennstoff umgerechnet:

$$\frac{480,784 \frac{gC}{kg_{Br,fe}}}{12,0107 \frac{g}{mol}} = 40,03 \frac{molC}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.34]$$

In der trockenen Gaszusammensetzung befindet sich 25,4% CO, 2,3% CH₄ und 9,4% CO₂. Daraus folgt der Kohlenstoff im Synthesegas:

$$0,254 + 0,023 + 0,094 = 0,371 \frac{molC}{molSG} \quad [Gl.35]$$

und

$$\frac{40,03 \frac{molC}{kg_{Br,fe}}}{0,371 \frac{molC}{molSG}} = 107,89 \frac{molSG}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.36]$$

In der trockenen Gaszusammensetzung befinden sich 2,3% CH₄ und 18,3% H₂. Aus diesen Anteilen lässt sich der gebundene Wasserstoff im feuchten Synthesegas berechnen:

$$2,3\% \cdot 2 + 18,3\% = 22,9\% H_2$$

$$0,229 \cdot 107,89 \frac{\text{molSG}}{\text{kg}_{Br,fe}} = 24,709 \frac{\text{molH}_2}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.37}]$$

Aus dem Anteil an Wasserstoff im Synthesegas werden folglich 24,709 mol Wasserstoff pro feuchten Brennstoff entstehen. Zur Berechnung fehlt jedoch noch der Anteil von mol Wasserstoff, der schon im Holz vorhanden ist. Das sind nach der Elementaranalyse 59,7 g Wasserstoff pro trockenen Brennstoff.

Daraus folgt, dass im trockenen Holz folgender Anteil mol Wasserstoff pro kg feuchten Brennstoff vorkommt:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{59,7 \frac{\text{gH}}{\text{kg}_{Br,tr}} \cdot 0,9664 \text{ kg}_{Br,tr}}{1,0078 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 28,62 \frac{\text{molH}_2}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.38}]$$

Die Differenz aus [Gl. 38] und [Gl. 39] ergibt die, aus den gebundenen Wasserstoff pro Kilogramm feuchten Brennstoff enthaltenden, mol H₂O:

$$28,62 - 24,709 = 3,911 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.39}]$$

Dazu wird das Wasser aus der Holzfeuchte [Gl.33] addiert, mit 3,36% Holzfeuchte bezogen auf 1 Kilogramm Brennstoff:

$$\frac{33,6 \frac{\text{gH}_2\text{O}}{\text{kg}_{Br,fe}}}{18,0152 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1,87 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.40}]$$

Mit der Addition der [Gl.39] und [Gl.40] erfolgt die im Synthesegas vorhandenen Molmenge an Wasser:

$$3,911 + 1,87 = 5,78 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.41}]$$

Daraus folgt der Wassergehalt im feuchten Synthesegas mit:

$$\frac{5,78}{107,89 + 5,78} = 0,051 = 5,1\% \quad [\text{Gl.42}]$$

Mit diesem Wert des Wassergehalts lässt sich die feuchte Gaszusammensetzung in Tabelle 8 berechnen.

Gaskomponente	mit Vergasungsmittel Luft in Vol-%
CO	24,1
H ₂	17,4
CH ₄	2,2
CO ₂	8,9
N ₂	42,3

Tabelle 8: feuchte Gaszusammensetzung Messreihen

5.5.2 Berechnung des Luftverhältnisses am Vergaser

Die zugeführte Vergasungsluft für die Vergasung ist unklar. Mit der Kohlenstoffbilanz aus der feuchten Gaszusammensetzung kann aber λ (s. Kapitel 2.5) berechnet und abgeschätzt werden. Zuerst wird der Tatsächliche Sauerstoffverbrauch anhand der Gaszusammensetzung berechnet.

Tatsächlicher Sauerstoffverbrauch aus der Umgebung:

Aus der Elementaranalyse mit der Holzfeuchte folgt:

$$\frac{480,784 \frac{gC}{kg_{Br,fe}}}{12,0107 \frac{g}{mol}} = 40,03 \frac{molC}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.43]$$

$$\frac{422,8 \frac{gO}{kg_{Br,fe}}}{15,9994 \frac{g}{mol}} = 26,43 \frac{molO}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.44]$$

Kohlenstoffbilanz:

Aus der feuchten Synthesegaszusammensetzung für 8,9% CO₂, 24,1% CO und 2,2% CH₄ folgt:

$$0,089 + 0,241 + 0,022 = 0,352 \frac{molC}{molSG} \quad [Gl.45]$$

Wird [Gl.43] durch [Gl.45] dividiert, erhält man die entstanden mol Synthesegas pro feuchten Brennstoff:

$$\frac{40,03 \frac{molC}{kg_{Br,fe}}}{0,352 \frac{molC}{molSG}} = 113,72 \frac{molSG}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.46]$$

Im Kohlenstoff befinden sich dann folgende Anteile an Sauerstoff:

$$0,089[CO_2] + 0,5 \cdot 0,241[CO] = 0,2095 \frac{molO_2}{molSG} \quad [Gl.47]$$

Mit [Gl.47] und [Gl.46] lässt sich dann die benötigten mol Sauerstoff pro feuchten Brennstoff berechnen:

$$0,2095 \frac{molO_2}{molSG} \cdot 113,72 \frac{molSG}{kg_{Br,fe}} = 23,83 \frac{molO_2}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.48]$$

Der tatsächlich benötigte Sauerstoff berechnet sich aus den Sauerstoffanteilen aus der Kohlenstoffbilanz [Gl.48] und dem Sauerstoff der benötigt wird, um den Wasserstoff für das Wasser zu binden [Gl.41] abzüglich des vorhanden Sauerstoffs aus der Elementaranalyse [Gl.44]:

$$23,83 + \frac{5,78}{2} - 0,5 \cdot 26,43 = 13,505 \frac{molO_2}{kg_{Br,fe}} \quad [Gl.49]$$

13,505 mol Sauerstoff pro feuchten Brennstoff werden benötigt, um den tatsächlichen Sauerstoffbedarf, ausgehend von der Gaszusammensetzung und der Elementaranalyse, zu decken.

Theoretischer Sauerstoffbedarf:

Der theoretische Sauerstoffbedarf lässt sich wie folgt berechnen:

$$o_{\min} = 0,083256 \cdot C + 0,2480233 \cdot H - 0,0312512 \cdot O \quad [Gl.50]$$

$$o_{\min} = 0,083256 \cdot 0,4975 + 0,2480233 \cdot 0,0597 - 0,0312512 \cdot 0,4378$$

$$o_{\min} = 42,55 \frac{\text{mol}O_2}{\text{kgBr}}$$

Luftverhältnis Vergaser:

$$\lambda = \frac{13,505 \frac{\text{mol}O_2}{\text{kgBr}}}{42,55 \frac{\text{mol}O_2}{\text{kgBr}}} = 0,317 \quad [\text{Gl.51}]$$

Das Luftverhältnis kann auch über die Stickstoffbilanz der Gaszusammensetzung berechnet werden. Es ist jedoch über die Kohlenstoffbilanz genauer, da der Stickstoff aus der Synthesegaszusammensetzung berechnet wird.

Mit einem Luftverhältnis von ungefähr 0,32 kann man durchaus zufrieden sein. Allerdings kann das Luftverhältnis und dementsprechend die Synthesegaszusammensetzung noch optimiert werden.

5.5.3 Berechnung des Luftverhältnisses am BHKW

Nachdem die Lambdaspaltung am BHKW umgestellt wurde, erhöhte sich die elektrische Leistung (s. Kapitel 4.2). Das Luftverhältnis des Gasgemisches Luft/Synthesegas wird über einen Belimo-Antrieb gesteuert und im Folgenden berechnet.

Über den theoretischen Mindestsauerstoffbedarf kann der theoretische Mindestluftbedarf für die Gaszusammensetzung berechnet werden.

Theoretischer Mindestsauerstoffbedarf:

$$o_{\min} = 0,5 \cdot CO + 0,5H_2 + 2 \cdot CH_4 \quad [\text{Gl.52}]$$

$$o_{\min} = 0,5 \cdot 0,241 + 0,5 \cdot 0,174 + 2 \cdot 0,022 = 0,2515 \frac{\text{kmol} O_2}{\text{kmol}_{Br,fe}}$$

$$o_{\min}^* = \frac{o_{\min}}{M_{SG,fe}} = \frac{0,2515 \frac{\text{kmol} O_2}{\text{kmol}_{Br,fe}}}{\sum c_i \cdot M_i \frac{\text{kg}_{Br,fe}}{\text{kmol}_{Br,fe}}} = 0,0104 \frac{\text{kmol} O_2}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.53}]$$

Theoretischer Mindestluftbedarf:

$$L_{\min} = \frac{o_{\min}^*}{0,20948} = 0,049 \frac{\text{kmol} L}{\text{kg}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.54}]$$

$$L_{\min,V} = L_{\min} \cdot V_n \quad [\text{Gl.55}]$$

mit Normvolumenstrom:

$$V_n = 22,41383 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \quad L_{\min,V} = 1,11 \frac{\text{m}^3 L}{\text{kg}_{Br,fe}}$$

Luftverhältnis BHKW:

Das Luftverhältnis am BHKW wird über den tatsächlichen Luftvolumenstrom der Luft [Gl.16] pro feuchten Brennstoff, durch den theoretischen Luftbedarf [Gl.54] berechnet.

$$\lambda = \frac{L_V}{L_{\min,V}} \quad [\text{Gl.56}]$$

mit:

$$L_V = \frac{\dot{V}_L}{\dot{m}_{Br,fe}} \quad [\text{Gl.57}]$$

5.5.4 Excel Auswertung der Messergebnisse

Lieferleistung %	erzeugte kWh	Hübe n	Masse[kg/h]	SG [kg/h]	V Luft [m³/h]	V Gas [m³/h]	λ BHKW	Hu SG [MJ/kg]	Q Vergaser [kW]	η elektrisch %	η Vergasung %
72,5	34	20	33,174	72,738	145,96	85,92	1,8	5,68	16,35	29,6	87,75
75	35	20	33,174	74,877	150,1	88,44	1,8	5,68	16,83	29,6	90,33
77,5	36	21	34,83	77,016	154,24	90,97	1,8	5,68	17,32	29,6	88,49
80	37	21,5	35,66	79,156	158,39	93,49	1,79	5,68	17,79	29,6	88,84
Nach Umstellung der λ -Spannung am BHKW:											
75	43	24	39,81	91,992	183,24	108,66	1,78	5,68	20,68	29,6	92,48
77,5	45	25,5	42,29	96,27	191,52	113,71	1,78	5,68	21,64	29,6	91,11
80	46	26	43,13	98,41	195,67	116,24	1,78	5,68	22,13	29,6	91,32

Tabelle 9: Excel Auswertung

Anhand dieser Messergebnisse fällt auf, dass eine Erhöhung der Lüfterleistung eine Erhöhung der elektrischen Leistung erfolgt. Proportional zur steigenden elektrischen Leistung steigt die Masse des zu vergasenden Holzes und so der Enthalpie-Strom des feuchten Brennstoffs. Aus diesem Grund ist der Wirkungsgrad des Motors konstant bei 29,6%.

Wie in Kapitel 3.3 schon erklärt, steuert der Motor beziehungsweise das BHKW im wesentlichen die Menge des abzunehmenden Synthesegases. Durch den Vergaser wird die Brennstoffzufuhr nachgeregelt, um die elektrische Leistung wieder zu erreichen.

Das Luftverhältnis am BHKW beträgt auch nach der Umstellung der Lambda Spannung durchgehend ungefähr 1,8. Das bedeutet, dass die Erhöhung der Leistung nicht eine Optimierung des Luftverhältnisses Luft/Synthesegas zur Folge hatte, sondern eine Erhöhung des Volumenstroms des Gasgemisches.

Mit steigender elektrischer Leistung steigt auch die Wärme, die am Vergaser abgenommen werden kann. Da mit steigender elektrischer Leistung mehr Masse an Holz vergast wird und somit ein höherer Volumenstrom an Synthesegas entsteht. Jedoch ist unklar, wie viel Wärme davon wirklich genutzt wird.

Aufgrund der gleich bleibenden Gaszusammensetzung ergibt es einen konstanten unteren Heizwert des Synthesegases von 5,68 MJ/kg.

Den thermischen und den Gesamtwirkungsgrad der Anlage konnte aus den oben aufgeführten Gründen nicht berechnet werden. Mit den Kaltgaswirkungsgraden von um die 90% erreicht die Anlage jedoch gute Werte.

6. Zusammenfassung

Mit Abschluss meiner Arbeit lief die Anlage konstant mit 44kWh – 47kWh bei 1658 Betriebsstunden. Durchschnittlich wurden über den Zeitraum meiner Arbeit 38 kWh erzeugt.

Die Inbetriebnahme der Anlage war gekennzeichnet von Verzögerungen und Rückschlägen. Besonders kritisch zu betrachten ist das Zusammenwirken der verschiedenen Zulieferer und Komponenten (Kratzboden, Beschicker, Vergaser, BHKW usw.).

Für die Hauptarbeit des Messens und Bilanzierens bestand das Problem der messtechnischen Analysemöglichkeit. Fehlende Durchflussmesser für Volumenströme des Synthesegases sowie der zugeführten Vergasungsluft im Reaktor und Verbrennung im BHKW erschwerten die Problemanalyse bzw. die Optimierung.

Deshalb konnte auch lange Zeit nicht der Grund für die „gedrosselte“ elektrische Leistung von durchschnittlich 35 kWh gefunden werden. Erst eine manuelle Umstellung der Lambdaspannung und somit einer Veränderung des Volumenstroms des Gasgemisches, (der für die Gasmischung zuständige Belimo-Antrieb war defekt), ermöglichte eine erhöhte elektrische Leistung. Bis zum Ende meiner Arbeit wurde kein neuer Belimo-Antrieb in das BHKW eingebaut.

Unklar war auch die abgegebene Wärmemenge des Vergasers und BHKWs durch fehlende Wärmemengenzähler.

Die Wärmemenge am Vergaser lässt sich über die Abkühlung des Gasgemisches berechnen. Mit einer Integration von Wärmemengenzähler in die beiden Heizkreisläufe mit Plattenwärmetauscher könnte die Leistung genau bestimmt werden.

Einen möglichst großen Teil der nutzbaren Abwärme sollte erstens für Heizzwecke und zweitens für die Holzhackschnitzel-Trocknung genutzt werden. Allerdings wird bisher die Wärme von ca. 10 kWh am Vergaser und ca. 85kWh - 110 kWh am Abgaswärmetauscher des BHKW nicht komplett abgenommen.

Für wenig Geld ließen sich der Volumenstrom der Vergasungsluft und des Synthesegases sowie die Wärmeabgabe genauer messen, dafür aber die Steuerbarkeit und Optimierbarkeit der Anlage deutlich erhöhen. Die hierfür notwendigen Kosten dürften bei wenigen 1000 Euro liegen, was in anbetracht der Kosten der gesamten Anlage eigentlich enthalten sein sollte. Außerdem macht die Anlage an der einen oder anderen Stelle einen sehr „handwerklichen“ Eindruck. So sind beispielsweise bestimmte Kabel nicht hitzebeständig ausgeführt und schon nach wenigen Wochen der Inbetriebnahme angebrannt.

Das Problem der feuchten Holzhackschnitzel bei Stillstand der Anlage bestand nicht mehr. Die Anlage lief kontinuierlich und dadurch wurde eine durchschnittliche Feuchte von 3% - 4% durch dauerhafte Trocknung erreicht.

Die Reaktorgeometrie, die getaktete Brennstoffzugabe in kleinen Einheiten und die ständige Vergleichmäßigung der Reaktorgutoberfläche sorgen für eine definierte Glutzone. Mit der Gasführung und dem relativ einfachen Prinzip der Gasreinigung wird ein nahezu teerfreies motorverträgliches Synthesegas hergestellt. Eine merkliche Teerbelastung konnte an der Anlage nicht festgestellt werden.

Allerdings ist offen, was mit der Asche dem Staub in den Wärmetauschern vor der Gasreinigung passiert. Weiterhin noch unklar ist, ob Ablagerungen entstehen.

Mit den Ergebnissen aus den Messreihen ist eine Bewertung der Anlage mit Wirkungsgraden teilweise möglich.

Dabei sollte beachtet werden, dass die vom Generator abgegebene elektrische Energie direkt in das Stromnetz eingespeist wird. Der benötigte Eigenbedarf für Gebläse (Holzhackschnitzel-Trocknung) und die diversen Motoren an den Transportvorrichtungen für Holz beziehungsweise Asche wird aber aus dem Stromnetz entnommen und nicht mit einberechnet. Wie viel Leistung aufgewendet werden muss ist nicht klar.

Der elektrische Wirkungsgrad von 29,6 % könnte noch erhöht werden, wenn nach dem Turbo ein Gaskühler das Gas verdichten würde. Allerdings besteht durch die Kühlung die Gefahr der Teerbildung.

Der thermische- beziehungsweise der Gesamtwirkungsgrad konnte nicht berechnet werden. Es ist unklar, wie viel Wärme durch Verluste verloren geht. Der thermische Wirkungsgrad lässt sich jedoch erhöhen, wenn die abgenommene Wärmemenge am Abgaswärmetauscher mitbilanziert wird.

Als weiterführende Arbeit könnte die Wirtschaftlichkeit der Holzvergasungsanlage betrachtet werden. Die Wirtschaftlichkeit ist vor allem von der Jahresvollbenutzungsdauer abhängig.

Darüber hinaus, gehen in diese Rechnung die Investitions- und Brennstoffkosten ein, sowie die Strom- und Wärmeerlöse. Es könnte überprüft werden, ob es eigentlich gerechtfertigt ist, für so eine kleine Leistung (elektrisch), so eine teure Anlage zu bauen.

Mit der Fertigstellung dieser Arbeit lässt sich sagen, dass die schon lange bekannte Technik der Holzvergasung noch nicht weit genug entwickelt ist. Dies gilt insbesondere den

verschiedenen nicht aufeinander abgestimmten Komponenten und der, mit mehr Kosten verbundener, Messtechnik.

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, durch Zitate kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Literaturverzeichnis:

- [1] Sachstandbericht IPCC
http://www.bmu.de/files/download/application/pdf/syr_kurzzusammenfassung_071117_v5-1.pdf
Stand: 18.05.2010
- [2] Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien vom 25.Oktober 2008
http://bundesrecht.juris.de/eeg_2009/
§1 Absatz 1
Stand: 18.05.10
- [3] Fraunhofer UMSICHT/Isi
Gülzower Fachgespräch
16.-17.05.2000
http://wirbelschicht.info/WWW/UMSICHT/Produkte/ET/pdf/fnr-fachgespraech_mai2000.pdf
Stand: 18.05.10
- [4] Bierter, Willy
Holzvergasung: umweltfreundliche und effiziente Energieholznutzung
Alternative Konzepte, Band 39
1982
- [5] Fischer, Joachim
Regenerative Energietechnik
Kapitel 7, Biomasse
Springer Verlag 2009
- [6] Kaltschmitt, Martin; Hartmann Hans
Energie aus Biomasse-Grundlagen, Techniken und Verfahren
Springer Verlag 2009
- [7] Steinbrecher, Nils; Walter, Joachim
Marktübersicht dezentrale Holzvergasung:
Marktanalyse 2000 für Holzvergasersysteme bis 5MW
Öko-Institut 2001
<http://www.oeko.de/service/bio/dateien/de/bio-marktuebersicht-2001.pdf>
Stand: 18.05.2010
- [8] <http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Watter/Stud-Projekte/Inhalt/Funktion%20des%20Imbert-Gaserzeugers-Dateien/image002.jpg>
- [9] Jochum, Joachim
Skript Biomassevergasung zur Stromerzeugung
SS 2010
- [10] http://www.holz-kraft.de/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=2&lang=de

Stand: 18.05.10

- [12] Fuderer, Daniel
Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mittels Synthesegaserzeugung aus
Holzhackschnitzeln
Diplomarbeit SS 2007

- [13] Cerbe, Günter; Wilhelms, Gernot
Technische Thermodynamik, 15. Auflage
Carl Hanser Verlag 2008

- [14] Jochum, Joachim
Skript Feuerungstechnik
SS 2009

- [15] Schüßle, Ingmar; Bräkow, Dieter; Treppe, Konrad; Salomo, Bert; Zschunke, Tobias
Schwachstellenanalyse an BHKW-Vergaseranlagen
Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.
Dresden, 26.02.2009

- [16] Kontinuierlicher Betrieb einer Holzvergasungsanlage zur Strom- und Wärme­gewinnung
Zantropp, Christian
Diplomarbeit WS 1999/2000

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
Handbuch
Bioenergie-Kleinanlagen

Oesterle, Mario
Anpassung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes für den Versuchbetrieb,
Inbetriebnahme und Leistungsabnahme
Bachelorarbeit SS 2009

Meßmer, Jonas
Gewerbliche Nutzung von Synthesegas aus der Holzvergasung in einer Ziegelei
Bachelorarbeit SS 2009

Anhang:

	A	B	C	D	E
1	Stoff	Molmasse kg/kmol	Normdichte kg/m³	Heizwert h_u MJ/kg	Brennwert h_o MJ/kg
2	H ₂	2,0158	0,8988	119,962	141,8
3	C	12,0107			
4	CH ₄	16,0430	0,7175	50,012	55,5
5	H ₂ O	18,0152			
6	CO	28,0104	1,2505	10,103	10,1
7	N ₂	28,0134	1,2504		
8	CO ₂	44,0098	1,9770		
9	O ₂	31,9988	1,4290		
10	Luft _{tr}	28,9630	1,2930		
11					
12					

Abbildung 19: Excel Datentabelle

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3	Feuchte Holz	5,1 %							
4									
5	Massenstrom Brennstoff $\dot{m}_{Br,fe}$	36,762 kg/h							
6									
7	Massenstrom Brennstoff $\dot{m}_{Br,tr}$	38,637 kg/h							
8									
9									
10	Temperatur Motoreingang	70 °C							
11									
12	Lüfterleistung	80 %							
13									
14	Erzeugte kW/h	46 kW							
15									
16	λ Verbrennung	1,79							
17									
18	Brennwert Holz $h_{o,Br,tr}$	19088 kJ/kg							
19									
20	Brennwert Holz $h_{o,Br,fe}$	18114,51 kJ/kg							
21									
22									

Gasanalyse			
	Vol. % trocken mit O ₂	Vol. % trocken	Vol. % feucht
CO ₂	0,094	0,094	0,0892
CO	0,254	0,254	0,2410
CH ₄	0,023	0,023	0,0218
H ₂	0,183	0,183	0,1737
O ₂	0	-----	-----
N ₂	0,446	0,446	0,4233
H ₂ O	-----	-----	0,0510
Summe	1	1	1

Abbildung 20: Excel Eingabefeld Berechnung

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Unterer Heizwert des Synthesegases $\Delta h_{u,sg}$						Unterer Heizwert feuchter Brennstoff $\Delta h_{u,Br,fe}$				
2			Massenanteil								
3		ρ_i kg/m ³	ζ trocken	ζ feucht			$\Delta h_{v,H_2O}$	2442 kJ/kg			
4	CO ₂	1,54260726	0,16896828	0,1625409							
5	CO	0,98180511	0,29059019	0,27953645							
6	CH ₄	0,5623304	0,01507097	0,01449769							
7	H ₂	0,07065671	0,01506699	0,01449386							
8	N ₂	0,98191026	0,51030357	0,49089216							
9	H ₂ O	0,63145886		0,03803895							
10	Summe		1	1							
11											
12											
13	$\Delta h_{u,sg,tr}$	5,57886611	MJ/kg								
14											
15	$\Delta h_{u,sg,fe}$	5,68316875	MJ/kg				$\Delta h_{u,Br,fe}$	14199,8356 kJ/kg			
16								14,1998356 MJ/kg			
17		5,69861831	MJ/m ³								
18											
19	Enthalpie Strom des Synthesegases $\Delta H_{u,sg}$										
20											
21	$\Delta H_{u,sg,tr}$	556,51	MJ/h								
22											
23	$\Delta H_{u,sg,fe}$	559,28	MJ/h				$\Delta H_{u,Br,fe}$	522014,357 kJ/h			
24											
25											

Abbildung 21: Excel Heizwert Berechnung

H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
			Motor					Liefergrad :	121,6 %			
	Hubraum V_H	5,7 L		0,0057 m³								
	Drehzahl n	1500 1/min		25 1/s								
	Verhältnis 1:1							Gasverbrauch :	184 kW			
	$V = V_H \cdot n / 2$							unterer Heizwert :	1,583 kWh/m³			
	Volumenstrom Motor		0,07125 m³/s		256,5			Ansaugvolumen :	0,08664 m³/s			
	Volumenstrom V_{syn}		0,03228853 m³/s						311,904 m³/h			
	Normvolumen		22,41283 m³/kmol					Gasvolumen :	116,238703 m³/h		37,27 %	
								Luftvolumen :	195,665297 m³/h		62,73 %	
	Elementaranalyse Holz											
	C	0,4975										
	H	0,0597										
	O	0,4378										
	N											
	S											
	a	0,005										
	Summe	1										

Abbildung 22: Excel Motordaten Berechnung

G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
		0	100	500	1000	1200	600	700 °C				
	H2	28,6202	28,9427	29,247	29,7892	30,1158	29,3176	29,4083	KJ/kmol*K			
	N2	29,0899	29,1151	29,8209	31,2548	31,7673	30,1066	30,4006	KJ/kmol*K			
	CO	29,1063	29,1595	30,0805	31,6454	32,1717	30,408	30,7356	KJ/kmol*K			
	H2O	33,4708	33,7121	35,5888	38,557	39,7583	36,1544	36,7415	KJ/kmol*K			
	CO2	35,9176	38,1699	44,6584	49,5017	50,8522	45,8462	46,9063	KJ/kmol*K			
	CH4	34,59	37,02	48,02	60,25	64,13	50,7	53,34	KJ/kmol*K			
	gesuchte cmp (Temperatur)		70	343,15 K		650	923,15 K					
	Lineare Temperatur 1		0			600						
	Lineare Temperatur 2		100			700						
	70°C	cmp gesucht	cp kJ/kg*K	m kg/h	Q kW	650°C	cmp gesucht	cp kJ/kg*K	m kg/h	Q kW		
	H2	28,84595	14,3099266	1,42633479	1,94554098	H2	29,36295	14,5664004	1,426334786	5,32774576		
	N2	29,10754	1,03905774	48,308508	4,76459088	N2	30,2536	1,07996887	48,30850803	13,3764142		
	CO	29,14354	1,04045426	27,509074	2,72822677	CO	30,5718	1,09144461	27,50907396	7,69923265		
	H2O	33,63971	1,86729595	3,74339792	0,66628595	H2O	36,44795	2,02317765	3,743397924	1,94209195		
	CO2	37,49421	0,85195138	15,9955874	1,29896218	CO2	46,37625	1,05377098	15,99558736	4,32231286		
	CH4	36,291	2,26210808	1,42671216	0,30763179	CH4	52,02	3,24253569	1,426712161	1,18629009		
				Q motor	11,7312385							
				Q Reaktor	33,8560875							
							22,1248489	kW				

Abbildung 23: Excel Wärme Berechnung