

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik



Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik

# MESSBERICHT: VARIATION VERGASUNGSMITTEL-TEMPERATUR BEI DER FESTBETT-GLEICHSTROM-VERGASUNG

Autoren	DiplIng. (FH) Roman Schneider
	DiplIng. (FH) Ralf Pohl
Ausgabe	29.03.2022
Revision	3



Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik



Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik

Messbericht

# VARIATION VERGASUNGSMITTELTEMPERATUR BEI DER FESTBETT-GLEICHSTROM-VERGASUNG

im Projekt

## HORA

## < Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen >

März 2022

- Projektleiter Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
- Autoren Roman Schneider, Ralf Pohl
- Projektlaufzeit 01.05.2019 31.12.2021
- Dienststelle Hochschule Zittau/Görlitz, University of Applied Sciences Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik (IPM) Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau
- Thema Betriebsvariation Vergasungsmitteltemperatur



## Abstract

#### FREIGABE

Autor(en)

Geprüft

Freigegeben



# Änderungen

Rev	Datum	Name	Änderung(en)
1	02.03.2022	Schneider	Ersterstellung
2	23.03.2022	Schneider	Weiterbearbeitung
3	29.03.2022	Schneider	Inhaltliche Fertigstellung



I

# Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Ziel5
2	Materialien und Methoden6
2.1 2.2 2.3 2.4	Versuchsanlage
3	Laboranalysen11
3.1 3.2 3.3	Analysenmethoden zur Bestimmung
4	Datenauswertung der Versuchsphasen13
4.1 4.1.1 4.1.2 4.1.3	Stoffströme
4.2 4.3 4.4 4.5	Verlaufsdiagramme15Vertikales Temperaturprofil im Reaktor19Vergleichende Darstellung der Messdaten20Stoff- und Energiestrombilanzierung20
5	Bewertung der Temperaturvariationen23
5.1 5.2 5.2.1 5.2.2 5.2.2 5.2.3	Vergleich der Auswirkungen23Kennzahlen zum Vergasungsprozess24Kohlenstoffumsatzgrad24Kaltgaswirkungsgrad24Elektrischer Anlagenwirkungsgrad24
5.3 5.4 5.5 5.6	Stoffstromverhältnisse zum Vergasungsprozess
Literaturve	erzeichnis



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Kaltgaswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Vergasungslufttemperaturen
	[1]5
Abb. 2-1	Integration des Lufterhitzers in die Vergasungsmittelzuführung zum Reaktor
Abb. 2-2	Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der Messfahrten 7
Abb. 2-3	Grafische Darstellung des Verlaufes der Vergasungsmitteltemperaturen an unterschiedlichen Betriebsstellen und des stationären Zustandes in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur nach der internen Luftvorwärmung
Abb. 4-1	Mittlere Zusammensetzung und entsprechender Heizwert des Produktgases während der Versuchsphasen
Abb. 4-2	Verlauf der Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen 16
Abb. 4-3	Verlauf der Vergasungsmitteltemperaturen während der Versuchsphasen
Abb. 4-4	Verlauf der Temperaturen (Vergasungsmittel Reaktoreintritt, Reaktorwandtemperatur, Produktgas Reaktoraustritt)
Abb. 4-5	Verlauf der Volumenströme von Vergasungsmittel und Produktgas während der Versuchsphasen
Abb. 4-6	Verlauf der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter sowie elektrische Leistung des BHKW während der Versuchsphasen
Abb. 4-7	Profil der vertikalen Temperatur im Reaktor während der Versuchsphasen 1 und 2 mit Darstellung der Reaktorgeometrie
Abb. 4-8	Bilanzraum zur Bewertung der Versuche
Abb. 5-1	Vergleichende Darstellung von Mess- und Versuchsdaten in Abhängigkeit der Vergasungsmitteltemperatur
Abb. 5-2	Min-, Max-, u. Mittelwerte von Produktgasanteilen im Vergleich der Versuchsphasen 1 bis 3
Abb. 5-3	Für Versuchsabschnitt 1 (n=19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Bewertungsparameter und -kennzahlen in Abhängigkeit von der
Abb. 5-4	Vergasungsmitteltemperatur
Abb. 5-5	Vergasungsmitteltemperatur



# Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme	7
Tab. 2-2	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten	8
Tab. 2-3	Reaktoreintrittstemperaturen des Vergasungsmittel Luft in den	
	Versuchsphasen	9
Tab. 3-1	Ergebnisse der Immediat-, Brennwert- und Elementartanalyse der	
	Brennstoff- und Filterstaubproben, Messfahrt LuVo 2-2	12
Tab. 4-1	Brennstoffcharakteristika für die Versuchsphasen	13
Tab. 4-2	Vergasungsmittelcharakteristika der Versuchsphasen	13
Tab. 4-3	Mittlere Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen	14
Tab. 4-4	Produktgascharakteristika der Versuchsphasen	15
Tab. 4-5	Anfallmenge Filterstaub	15
Tab. 4-6	Versuchsdatenauszug für die jeweilige Versuchsphase	20
Tab. 4-7	Daten der Stoffstrombilanzen für die Versuchsphasen in kg/h	22
Tab. 4-8	Daten der Energiestrombilanzen für die Versuchsphasen in kW	22
Tab. 5-1	Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse für die	
	Vergasungsmitteltemperaturen	27



# Abkürzungsverzeichnis

#### ABKÜRZUNGEN

А	Asche
С	Kohlenstoff
DIN	Deutsches Institut für Normung
Fa.	Firma
GC	Gaschromatograph
Н	Höhe
Н	Wasserstoff elementar
h	Stunde
HHS	Holzhackschnitzel
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
i.N.	im Normzustand
ISO	International Organization for Standardization
m	Masse
Ma.	Masse
MF	Messfahrt
MFC	Multifuel Conversion GmbH
min	Minute
Ν	Stickstoff elementar
0	Sauerstoff elementar
Р	Druck
Q	Leistung
S	Schwefel
Т	Temperatur
TCV	Thermochemisches Versuchsfeld
TGA	Thermogravimetrische Analyse
TS	Trockensubstanz
V*	Volumenstrom
VM	Vergasungsmittel
WÜ	Wärmeübertrager

5



## 1 Motivation und Ziel

Ausgehend von detaillierten Betrachtungen in [1], [2] hinsichtlich des Einflussparameters Temperatur auf den Vergasungsprozess sollte die Prozesseffizienz mit steigender Eintrittstemperatur des Vergasungsmittels steigen (vgl. Abb. 1-1). In Anlehnung an die Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen wird damit - wie auch mit der Trocknung der Biomasse - eine effektive Ausnutzung der in der Biomasse gespeicherten Energie bei höherem Brennstoffumsatz, eine erhöhte chemische Energie des Brenngases und letztlich bezogen auf den Gesamtprozess die Erhöhung der Stromausbeute bezweckt. Auch kann aus kinetischer Sicht die Baugröße des Reaktors bei gleichbleibender Leistung reduziert werden [1].

Mit Hilfe der Vorwärmung des Vergasungsmittels, die nach dem Stand der Technik bei den Anlagen in der Regel eingesetzt wird, können folglich höhere Prozesswirkungsgrade erreicht werden. Eine definierte bzw. regulierbare Vorwärmung des Vergasungsmittels ist jedoch nicht Stand der Technik.



Abb. 1-1 Kaltgaswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Vergasungslufttemperaturen [1] WC...Wassergehalt Brennstoff, AIT...Temperatur Vergasungsmittel

Bei weiteren Untersuchungen wurde der Massenstrom des Vergasungsmittels variiert und damit eine Änderung des Luftverhältnisses erreicht, mit entsprechender Auswirkung auf Prozessgüte und Produktgaszusammensetzung [3], [4]. Jedoch beziehen sich diese Variationen meist auf Laborversuchsstände ohne nachgeschaltete Gasnutzung wie z.B. einer motorischen Gasverbrennung (hier i.d.R. freie Verbrennung in Gasfackel). Demzufolge bestehen bei diesen Untersuchungen des Vergasungsprozesses keine Einflüsse durch die nachfolgende Gasnutzung.

Im Unterschied dazu wird im Rahmen der hier beschriebenen Vergasungsversuche ein marktübliches Biomasse-Vergasung-BHKW eingesetzt und die Variationsauswirkungen erfasst. Motivation dieser Parametervariationen ist sowohl die weitere Optimierung der thermochemischen Umsetzungsreaktionen mit dem Ziel die Effizienz zu steigern als auch nachfolgend die schrittweise Anpassung der Vergasungsparameter auf die Eigenschaften alternativer Brennstoffe.



## 2 Materialien und Methoden

### 2.1 Versuchsanlage

Für die Durchführung der Vergasungsversuche wurde im Rahmen des TCV folgende Anlage eingesetzt:

 Holz-Kraft-Anlage der Fa. Spanner Re<sup>2</sup> GmbH (30 kW elektr. Nennleistung; 70 kW therm. Nennleistung)

Bezüglich der Anlagenbeschreibung wird auf die vorhandene umfangreiche Dokumentation verwiesen [5].

Für die definierte Erwärmung des Vergasungsmittels wurde die Reaktorzuführung des Vergasungsmittels Luft umgebaut und ein elektrischer Lufterhitzer (Typ 10000 DF-R HT, LEISTER) integriert (vgl. Abb. 2-1), der mit einer maximalen Leistung in Höhe von Q = 15 kW unter standardisierten Bedingungen Lufttemperaturen bis zu T = 900 °C generieren kann. Außerdem erfolgte die Installation einer pneumatisch angetriebenen Gasdrosselklappe, die bei Anlagenstörung automatisch schließt und damit die Gasrückströmung aus dem Reaktor bis zum Lufterhitzer verhindert. Folglich wird somit der Kontakt zwischen der evtl. noch glühenden Innenkeramik des Lufterhitzers (LuVo) mit dem Produktgas unterbunden.



Abb. 2-1 Integration des Lufterhitzers in die Vergasungsmittelzuführung zum Reaktor

### 2.2 Brennstoff

Als Brennstoff wurden Nadelholz-Holzhackschnitzel (HHS) aus Stamm- und Waldrestholz einer Charge eingesetzt (Qualität gemäß P31S nach DIN EN ISO 17225-4). Diese wurden versuchsbegleitend auf einen konstanten Wassergehalt technisch getrocknet.

## 2.3 Messtechnische Ausstattung

Hinsichtlich der im TCV eingesetzten Messtechnik (Brennstoffbedarf, Temperaturen, Produktgasmenge und -zusammensetzung, Anlagenleistung, Datenerfassung etc.) wird ebenfalls auf die vorhandene Dokumentation verwiesen [5]. Darüber hinaus wurde für die Messfahrten (MF) zur redundanten Erfassung der Produktgaszusammensetzung ein Mikro-Gaschromatograph (I-Graph XSII, I-GRAPHX GmbH) und zur Erfassung der Motorabgaszusammensetzung ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) (DX4000, Ansyco GmbH) eingesetzt.



Einen Überblick der identifizierten Stoffströme und deren für eine Bewertung erfassten Eigenschaften zeigt Tab. 2-1. Die hierfür zur Verfügung stehenden Mess- und Probenahmestellen sind in Abb. 2-2 ersichtlich.

#### Tab. 2-1 Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme

Stoffstrom	Eigenschaften
Brennstoff	Massenstrom
Vergasungsmittel/Vergaserluft	Volumenstrom, Temperatur
Produktgas	Volumenstrom, Temperatur, Zusammensetzung
Filterstaub	Massenstrom



Abb. 2-2 Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der Messfahrten

### 2.4 Vorgehensweise

Die in dem Bericht beschriebenen Versuche wurden wie folgt in Versuchsabschnitte unterteilt:

- Versuchsabschnitt 0 (Messfahrtbezeichnung LuVo 0-x): Testeinsatz Lufterhitzer (Sicherheitsüberprüfung, Ansteuerung, Parameterveränderung)
- Versuchsabschnitt 1 (Messfahrtbezeichnung LuVo 1-x): Testeinsatz Lufterhitzer und Abfahren verschiedener Temperaturrampen in kurzen Zeiträumen
- Versuchsabschnitt 2 (Messfahrtbezeichnung LuVo 2-x): Einsatz Lufterhitzer und Abfahren von 3 definierten Temperaturbereichen des Vergasungsmittels Luft über einen längeren Zeitraum



In der nachfolgenden Tab. 2-2 sind die durchgeführten Versuchsfahrten mit Zuordnung zu den Versuchsabschnitten dargestellt.

Versuchs- abschnitt	Versuchs- bezeichnung	Versuchsziel	Startzeit	Endzeit	Versuchsdauer Gesamt
Einheit			h:min	h:min	h
	LuVo 0-1	Testeinsatz Lufterhitzer,	09:38	15:04	5,4
(0)	LuVo 0-2	Sicherheitsprüfung (Gasrückschlagklappe, Tempüberwachung)	10:00	17:38	7,6
	LuVo 1-1	Auswahl geeigneter	09:34	16:40	7,1
(1)	LuVo 1-2	Temperaturbereiche	09:34	17:05	8,5
	LuVo 1-3	Vergasungsmittel, Vorbewertung der Prozessauswirkungen mit Hilfe von Kennzahlen	09:30	17:00	8,5
(2)	LuVo 2-1	Durchführung der Variation in 3 Temp bereichen, abschließende Bewertung	08:45	23:32	15,3
	LuVo 2-2	Durchführung der Variation in 3 Temp bereichen, abschließende Bewertung	08:40	0:10	15,7

#### Tab. 2-2 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

Die Funktionskontrolle sowohl des LuVo inkl. seiner Kontrollmesstechnik als auch der Gasdrosselklappe wurde während der zwei Versuche in Abschnitt 0 vorgenommen. Dies beinhaltete die Ansteuerungsautomatik, die Luftstromüberwachung, die Temperaturüberwachung und -regelung sowie eine allgemeine Kontrolle der einzusetzenden Messtechnik.

Im Rahmen des Versuchsabschnittes 1 und der Messfahrten LuVo 1-1 bis 1-3 wurde mithilfe des Lufterhitzers das Vergasungsmittel Luft in 30 min-Intervallen auf verschiedene Temperaturen erhitzt und anschließend die Prozessauswirkungen erfasst und bewertet. Dieser Versuchsabschnitt diente folglich der Auswahl geeigneter Temperaturbereiche des Vergasungsmittels für die Variation und möglicher Bewertungsparameter und Stoffstromverhältnisse (vgl. Kapitel 5.4).

Anschließend wurde im Versuchsabschnitt 2 im stationären Anlagenzustand die aus Abschnitt 1 abgeleiteten Reaktoreintrittstemperaturen des Vergasungsmittel Luft mit Hilfe des elektrischen Lufterhitzers eingestellt und für einen definierten Zeitraum beibehalten. Die drei Eintrittstemperaturen ergaben sich zum einen aus dem Betrieb ohne Lufterhitzer (Phase 1) sowie aus den manuell vorgegebenen Lufterhitzer-Solltemperaturen 450 °C (Phase 2) und 650 °C (Phase 3). Diese Temperaturen basieren auf den Erfahrungen der Vorversuche im Versuchsabschnitt 1.

Bezeichnung	Lufterhitzer-Solltemperatur in °C	Eintrittstemperatur Vergasungsmittel in °C
Phase 1	kein Lufterhitzerbetrieb	181
Phase 2	450	400
Phase 3	650	579

#### Tab. 2-3 Reaktoreintrittstemperaturen des Vergasungsmittel Luft in den Versuchsphasen

Die Messfahrten LuVo 2-1 und LuVo 2-2 dienten somit zur Ermittlung von Kennzahlen für die jeweilige Versuchsphase und entsprechend der Prozessbewertung bei Einsatz unterschiedlicher Vergasungsmitteltemperaturen. Zu beachten ist, dass während der Messfahrt LuVo 2-1 kein konstanter Wassergehalt des Brennstoffes gewährleistet werden konnte. Somit erfolgt die in diesem Bericht aufgeführte abschließende Bewertung ausschließlich auf Basis der Daten aus Messfahrt LuVo 2-2!

Die Datenerfassung erfolgte über die eingesetzte Messtechnik jeweils mit unterschiedlichem Intervall zur Datenspeicherung. Diese voneinander abweichende Datenrate wurde im Nachgang miteinander abgeglichen. Hierbei wurde eine einheitliche Datenrate von 1 Wert aller 10 Sekunden umgesetzt. Die Datenauswertung wurde nur für den stationären Zustand vorgenommen, welcher durch den Temperaturverlauf des Vergasungsmittels Luft nach der internen Vorwärmung (vgl. Abb. 2-3) definiert wird. Für den dann gewählten Auswertungszeitraum wurde eine Mittelwertbildung der Messdaten vorgenommen. Darüber hinaus wurde zwischen den Phasen immer erst eine Einlaufzeit von ca. 40 min berücksichtigt, für die keine Datenauswertung erfolgte. Im Anschluss an die jeweilige Messfahrt bzw. Versuchsphase wurde die Anfallmenge des Filterstaubes abgewogen und Proben für Laboranalysen entnommen.

Zur Protokollierung der Versuche wurden alle aktuellen Messdaten (Brennstoffbedarf, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Produktgasanalyse etc.) erfasst und in einer Versuchsdatenbank gespeichert. Für die Versuchsauswertung werden, wie zuvor beschrieben, nur die Daten während des stationären Anlagenzustandes verwendet. Außerdem wurden evtl. aufgetretene Anlagenstörungen, durchgeführte Probenahmen u.ä. im Logbuch protokolliert. Während der Versuchsfahrten wurden mehrere Brennstoffproben direkt aus der Gesamtbrennstoffmasse entnommen, um diese anschließend im Brennstofflabor zu analysieren.

Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung der (CO, Produktgaszusammensetzung CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>,  $CH_4$ , O<sub>2</sub>,  $H_2O)$ sowie des Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Störungen, Filterstaubanfall).



Abb. 2-3 Grafische Darstellung des Verlaufes der Vergasungsmitteltemperaturen an unterschiedlichen Betriebsstellen und des stationären Zustandes in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur nach der internen Luftvorwärmung



## 3 Laboranalysen

### 3.1 Analysenmethoden zur Bestimmung

Auf das Probenmaterial wurden folgende Analysemethoden im Lehrlabor für Brennstoffanalytik der HSZG angewendet. Zum einen wurde der Gesamtwassergehalt des Brennstoffes nach DIN EN 14774-2 ermittelt und zum anderen für alle Proben sowohl Immediatanalysen nach DIN 51718-51720 mit einem thermogravimetrischen Multianalysensystem (TGA701, LECO) durchgeführt als auch der Brennwert nach DIN 51900-1/-3 mit einem Kalorimeter (C5000, IKA) bestimmt. Darüber hinaus wurde die Elementarzusammensetzung (CHNS) der Proben mit einem Multianalysensystem (vario MICRO cube, Elementar Analysensysteme) nach DIN 51732/51733 und DIN 51724-3 bestimmt. Alle Analysedaten der jeweiligen Probe wurden bezüglich ihrer Abweichung zueinander nach den geltenden Normen (DIN 51734 und DIN ISO 5725-5) bewertet.

### 3.2 Probenmaterial

Als Standardbrennstoff wurden Holzhackschnitzel aus Stamm- und Waldrestholz (Kiefer, P31S nach DIN EN ISO 17225-4) einer Charge verwendet. Die jeweilige Probenahme erfolgte manuell aus dem Brennstoffstrom zwischen Trockner und Vorlagebehälter der Vergasungsanlage in einem zeitlichen Abstand von ca. 1 h. Die Proben des Filterstaubes wurden nach jeder Versuchsphase in jeweils identischer Art und Weise aus dem Sammelbehälter nach dessen Wägung entnommen. Zu beachten ist hierbei, dass der Zeitverzug zwischen Filterstaubanfall im Reaktor und Filterstaubaustrag in den Sammelbehälter nicht definiert werden kann und somit bei der Probenahme unberücksichtigt blieb.

#### 3.3 Ergebnisse der Laboranalysen

Die Ergebnisse der Immediat-, Brennwert- und Elementaranalysen des bei den Versuchsphasen der Messfahrt LuVo 2-2 eingesetzten Brennstoffes und der Filterstaubproben sind nachfolgend, bezogen auf den wasserfreien Zustand, in Tab. 3-1 zusammengestellt.



Parameter	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3
			Brennstoff	
Gesamtwassergehalt	Ma%	2,6	3,2	3,2
Flüchtige Bestandteile	Ma% TS		82,8	<u> </u>
Fixer Kohlenstoff	Ma% TS		16,8	
Aschegehalt	Ma% TS		0,44	
Kohlenstoff	Ma% TS		50,26	
Wasserstoff	Ma% TS		6,32	
Stickstoff	Ma% TS		0,01	
Schwefel	Ma% TS		0,01	
Sauerstoff*	Ma% TS		43,0	
Brennwert	MJ/kg TS		20,24	
			Filterstaub	
Flüchtige Bestandteile	Ma% TS	12,1	12,2	12,9
Fixer Kohlenstoff	Ma% TS	67,9	68,4	68,6
Aschegehalt	Ma% TS	20,02	19,37	18,53
Kohlenstoff	Ma% TS	77,29	77,53	78,47
Wasserstoff	Ma% TS	0,46	0,43	0,46
Stickstoff	Ma% TS	0,04	0,04	0,04
Schwefel	Ma% TS	0,12	0,10	0,06
Sauerstoff*	Ma% TS	2,10	2,50	2,40
Brennwert	MJ/kg TS	27,25	26,43	27,09

# Tab. 3-1ErgebnissederImmediat-,Brennwert-undElementartanalysederBrennstoff-undFilterstaubproben,Messfahrt LuVo 2-2

\*rechnerischer Rest zu 100%



## 4 Datenauswertung der Versuchsphasen

#### 4.1 Stoffströme

Die in den folgenden Kapiteln aufgeführte Darstellung und Auswertung der Stoffstromdaten bezieht sich ausschließlich auf die abschließende **Messfahrt LuVo 2-2**. Dies beinhaltet die für den Auswertungszeitraum der jeweiligen Versuchsphase gemittelten Messwerte der erfassten Stoffströme (Brennstoff, Vergasungsmittel Luft, Produktgas, Filterstaub).

#### 4.1.1 Brennstoff

Wie in Tab. 4-1 ersichtlich, wurde für die Versuchsphasen ein nahezu konstanter Brennstoffbedarf von 27,9 kg/h für Phase 1 und Phase 2 sowie 28,4 kg/h für die Phase 3 erfasst. Der Wassergehalt lag dabei ebenfalls konstant bei ca. 3 Ma.-%. Die ermittelten Massenströme beziehen sich ausschließlich auf den jeweiligen Auswertungszeitraum von 3 Stunden. Unter Berücksichtigung des ermittelten Heizwertes kann außerdem die chemische Brennstoffleistung (auch Feuerungswärmeleistung) berechnet werden, die aufgrund des leicht gestiegenen Brennstoffmassestromes in Phase 3 etwas größer als bei den Versuchsphase 1 und 2 ist.

Bezeichnung	Auswertungs- zeitraum	Brennstoff- bedarf	Wasser- gehalt	Heizwert	chem. Brennstoff- leistung
Einheit	h	kg/h	Ma%	MJ/kg	kW
Phase 1	3,0	27,9	2,6	18,29	141,74
Phase 2	3,0	27,9	3,2	18,17	140,82
Phase 3	3,0	28,4	3,2	18,17	143,36

#### Tab. 4-1 Brennstoffcharakteristika für die Versuchsphasen

#### 4.1.2 Vergasungsmittel Luft / Produktgas

Die Volumenströme des Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Die resultierenden Volumen- und Massenströme der Luft sind zur Übersicht in Tab. 4-2 aufgeführt. Außerdem sind die Eintrittstemperaturen der Luft am Reaktoreintritt enthalten.

Tab 4.0	Maxim a supervisite tale and the visitizer along Maximus banks	
Tap. 4-2	vergasungsmitteicnarakteristika der versuchsphä	sen

Bezeichnung	Reaktoreintritts- temperatur	Volumenstrom	Massenstrom	
Einheit	C°	m³∕h (i.N.)	kg/h	
Phase 1	181	34,1	43,9	
Phase 2	400	34,4	44,3	
Phase 3	579	34,1	43,9	

In Tab. 4-3 werden die ermittelten Produktgasanteile (in Vol.-%, feucht) als Mittelwerte für den jeweiligen Auswertungszeitraum dargestellt.



Bezeichnung	СО	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> *	H <sub>2</sub> O
Einheit	Vol% f.	Vol% f.	Vol% f.	Vol% f.	Vol% f.	Vol% f.	Vol%
Phase 1	20,8	14,4	2,3	7,2	0,0	46,6	8,8
Phase 2	22,5	15,5	2,2	6,5	0,0	44,8	8,5
Phase 3	23,2	16,3	2,2	6,4	0,0	43,5	8,5

Tab. 4-3	Mittlere	Produktgaszusamme	nsetzung während	der Versuchsphasen
----------	----------	-------------------	------------------	--------------------

\* rechnerisch, Rest zu 100

Aufgrund der zuvor dargestellten Produktgaszusammensetzungen ergaben sich beim Vergleich der Produktgasqualität Unterschiede des Heizwertes (vgl. Tab. 4-4). Der Heizwert des Produktgases lag im Auswertungszeitraum der Versuchsphase 1 bei 4,6 MJ/kg, bezüglich Phase 2 bei 5,0 MJ/kg und bei Phase 3 bei 5,5 MJ/kg.



Abb. 4-1 Mittlere Zusammensetzung und entsprechender Heizwert des Produktgases während der Versuchsphasen

Durch die Erfassung der Zusammensetzung und des Massenstromes des Produktgases wurde die Produktgasleistung (entspricht dem chemischen Produktgasenergiestrom) berechnet und diese für die Versuchsphasen miteinander verglichen und in Tab. 4-4 dargestellt. Dabei ist ein tendenziell sinkender Produktgasmassenstrom bei gleichzeitig steigendem Produktgasheizwert zu bemerken, was wiederum zu einer leicht steigenden chemischen Produktgasleistung führt.

Bezeichnung	Reaktoraustritts- temperatur	Heizwert		Heizwert		Massenstrom	Chemische Leistung
Einheit	°C	MJ/m³ (i.N.)	MJ/kg	kg/h	kW		
Phase 1	848	5,00	4,62	68,52	87,88		
Phase 2	859	5,30	4,97	66,16	91,33		
Phase 3	868	5,47	5,17	65,48	94,04		

#### Tab. 4-4Produktgascharakteristika der Versuchsphasen

#### 4.1.3 Filterstaub

Wie in Tab. 4-5 ersichtlich, wurde für Phase 1 ein Filterstaubmassenstrom von 0,53 kg/h berechnet. Bei den Vergasungsmitteltemperaturen der Phase 2 und 3 wurden dann Filterstaubmassenströme von 0,55 kg/h bzw. 0,53 kg/h ermittelt. Diese ermittelten Massenströme beziehen sich ausschließlich auf den jeweiligen Auswertungszeitraum. Die manuelle Abwägung der entsprechenden Auffangbehälter erfolgte immer im Anschluss an die jeweilige Versuchsphase.

#### Tab. 4-5 Anfallmenge Filterstaub

Bezeichnung	Auswertungs- zeitraum	Gesamtmenge	Massenstrom
Einheit	h	kg/h	kg/h
Phase 1	3,00	1,59	0,53
Phase 2	4,07	2,25	0,55
Phase 3	3,67	1,96	0,53

### 4.2 Verlaufsdiagramme

Um die Anlagenfahrweise beispielhaft zu dokumentieren, sind im folgenden Diagramme zur Beschreibung der maßgeblichen Stoffströme über die Laufzeit der drei Versuchsphasen aufgeführt.

Die erfassten Bestandteile des Produktgases und der Verlauf dieser Zusammensetzung ist in Abb. 4-2 aufgeführt. Durch die farblich gekennzeichneten Felder sind die unterschiedlichen Versuchsphasen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass zwischen den Phasen immer erst eine Einlaufzeit von ca. 40 min berücksichtigt wurde, in der keine Datenauswertung erfolgte. Außerdem ist die kurze Anlagenstörung um 19:29-19:33 Uhr erkennbar. Für diesen Zeitraum und die darauffolgenden 30 min erfolgte keine Datenauswertung. Diese startete als zweiten Teil für die Phase 2, erst nachdem die Wiederanfahrphase abgeschlossen war.

Zu erkennen sind über die Versuchsphasen steigende Anteile an CO und  $H_2$  sowie leicht sinkende Anteile an CO<sub>2</sub> und  $H_2O$ . Der CH<sub>4</sub>-Anteil war hingegen relativ konstant.





Abb. 4-2 Verlauf der Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen

Ähnlich wie beim Verlauf der Produktgaszusammensetzung (vgl. Abb. 4-2) sind auch beim Verlauf der Temperaturen des Vergasungsmittels Luft vor und nach dem Seitenkanalverdichter sowie nach der internen Vorwärmung in Abb. 4-3 keine maßgeblichen Änderungen erkennbar. Deutlich erkennbar sind die drei Temperaturbereiche (Phase 1: 181 °C; Phase 2: 400 °C und Phase 3: 579 °C°) des Vergasungsmittels am Reaktoreintritt.



Abb. 4-3 Verlauf der Vergasungsmitteltemperaturen während der Versuchsphasen



In Abb. 4-4 sind die Temperaturverläufe an den Reaktormessstellen dargestellt. Auch hier sind die drei Versuchsphasen anhand der Vergasungsmitteltemperatur deutlich erkennbar. Die Auswirkung der gestiegenen Eintrittstemperatur auf die Wandtemperatur des Reaktors sind ebenfalls sichtbar. So stieg die mittlere Wandtemperatur von 472 °C bis auf 597 °C, wobei außerdem eine deutlich größere Spreizung der maximalen und minimalen Wandtemperaturen im Vergleich von Versuchsphase 1 zu Phase 2 und vor allem zu Phase 3 auffällt. Die Austrittstemperatur des Produktgases wurde von der Temperaturvariation ebenfalls beeinflusst und stieg von 848 °C bis auf 868 °C.



Abb. 4-4 Verlauf der Temperaturen (Vergasungsmittel Reaktoreintritt, Reaktorwandtemperatur, Produktgas Reaktoraustritt)

In Abb. 4-5 sind die Verläufe der Betriebsvolumenströme des Vergasungsmittel und des Produktgases aufgeführt. Zu erkennen ist der über die Versuchsphasen tendenziell leicht sinkende Produktgas-Volumenstrom und der mit einer relativ großen Schwankungsbreite verbundene Volumenstrom des Vergasungsmittels. Außerdem gut zu erkennen ist der kurze Anlagenausfall gegen 19:29 Uhr.





Abb. 4-5 Verlauf der Volumenströme von Vergasungsmittel und Produktgas während der Versuchsphasen

Die erfassten Absolutdrücke und daraus berechneten Differenzdrücke in der Produktgasleitung über Reaktor und Gasfilter sind in Abb. 4-6 enthalten. Außerdem wird hier die elektrische Leistung des BHKW dargestellt, deren negatives Vorzeichen nur die aus Bilanzsicht abgegebene Leistung darstellt.



Abb. 4-6 Verlauf der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter sowie elektrische Leistung des BHKW während der Versuchsphasen



## 4.3 Vertikales Temperaturprofil im Reaktor

Analog zur Darstellung wie in [6], wurde das Temperaturprofil im Reaktor aufgenommen. Für die Messung der Temperatur im Reaktor wurde dabei ein 1000 mm Thermoelement Typ N (Mantelthermoelement, Durchmesser 4,5 mm) verwendet und händisch von oben in den Reaktor eingeführt. Das Thermoelement wurde dabei vertikal in Schritten von je einer Minute jeweils einen Zentimeter nach unten bewegt. Die Messungen erfolgten während der drei Versuchsphasen jeweils im stationären Anlagenzustand. Für die Versuchsphase 3 konnte keine Messung der Temperatur durchgeführt werden, da während dieser das Thermoelement ausfiel und ein Wechsel während des Anlagenbetriebes nicht möglich ist.

Die Darstellung des Temperaturverlaufes innerhalb des Reaktors ist in Abb. 4-7 aufgeführt und dabei zusätzlich die Reaktorgeometrie so dargestellt, dass sie zu der im Diagramm angegebenen Skalierung passt und der Temperaturverlauf der jeweiligen Position im Reaktor zugeordnet werden kann. Im Reaktorfreiraum oberhalb der Brennstoffschüttung lagen die Temperaturen konstant bei ca. 100 °C. Ab Schichthöhe 25 cm steigen die Temperaturen auf über 1000 °C bei Schichthöhe 15 cm an. Die Temperaturpeaks liegen bei beiden Messungen identisch bei 14 cm Schichthöhe über dem Reaktorrost, damit im Bereich der Luftdüsen und betrugen 1088 °C für Phase 1 und Phase 2. Beim Vergleich der Phasen sind vor 1354 °C für allem die Temperaturunterschiede der heißen Zone in des Festbettes ersichtlich (Oxidationszone), wohingegen Temperaturen die oberhalb (Trocknunasund (Reduktionszone) Pyrolysezone) und unterhalb ähnlich sind. Die mittlere Festbetttemperatur in der Schichthöhe von 8 bis 18 cm und damit in der heißen Zone des Festbettes lag bei 927 °C für Phase 1 und 1074 °C für Phase 2.



Abb. 4-7 Profil der vertikalen Temperatur im Reaktor während der Versuchsphasen 1 und 2 mit Darstellung der Reaktorgeometrie



## 4.4 Vergleichende Darstellung der Messdaten

In Tab. 4-6 sind die für eine Bilanzierung notwendigen Messdaten, die daraus berechneten weiteren Versuchsparameter sowie die den Versuchsphasen zuzuordnenden Ergebnisse der Laboranalysen zusammengefasst dargestellt.

Parameter	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Einheit	Datenherkunft
Brennstoff					
Massenstrom	27,9	27,9	28,4	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	18,3	18,2	18,2	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Wassergehalt	2,6	3,2	3,2	Ma%	Laboranalyse
Aschegehalt	0,4	0,4	0,4	Ma% TS	Laboranalyse
Vergasungsmittel Luft					
Massenstrom	43,9	44,3	43,9	kg/h	Messung/Berechnung
Temperatur (Reaktoreintritt)	181	400	579	⊃°	Messung
Thermische Energie (Reaktoreintritt)	1,9	4,7	6,8	kW	Berechnung
Produktgas					
Massenstrom	68,5	66,2	65,5	kg/h	Berechnung
Temperatur (Reaktoraustritt)	848	859	868	°C	Messung
Thermische Energie (Reaktoraustritt)	21,0	20,7	20,9	kW	Berechnung
Zusammensetzung					_
O2	0,0	0,0	0,0	E.	Messung
CO	22,8	24,6	25,3	, v	Messung
CO <sub>2</sub>	7,9	7,1	7,0	<u><u> </u></u>	Messung
CH <sub>4</sub>	2,5	2,4	2,4	^ ^	Messung
H <sub>2</sub>	15,8	16,9	17,8	<u>0</u>	Messung
N2	51,0	49,0	47,5	ਯ	Berechnung
H <sub>2</sub> O	8,8	8,5	8,5	Vol%	Messung
Heizwert	4,6	5,0	5,2	MJ/kg	Berechnung
Filterstaub					
Massenstrom	0,53	0,55	0,53	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	26,3	25,6	26,4	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Aschegehalt	20,0	19,4	18,5	Ma% TS	Laboranalyse

Tab. 4-6 Versuchsdatenauszug für die jeweilige Versuchsphase

## 4.5 Stoff- und Energiestrombilanzierung

Für die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme um den Reaktor wurden die Daten für die jeweilige Versuchsphase erfasst und diese über den Zeitraum gemittelt (vgl. Tab. 4-6). Es wurden, wie in Abb. 4-8 dargestellt, die jeweiligen Stoffmassenströme am Einund Austritt des Reaktors ermittelt. Für Produktgas und Filterstaub war der Gasfilteraustritt die maßgebliche Bilanzgrenze. Die bilanziellen Abweichungen zwischen den insgesamt zugeführten und abgeführten Stoffströmen wurden als absolute und als relative Werte, die sich auf den summarischen Massenstrom am Eintritt beziehen, berechnet. Die Abweichung der Bilanz wird absolut und relativ angegeben, wobei die eintretenden Stoffströme ein positives und die austretenden Stoffströme ein negatives Vorzeichen besitzen. Entsprechend weist eine positive Bilanzabweichung auf eine im Vergleich größere Inputsumme und eine negative Bilanzabweichung auf eine im Vergleich größere Outputsumme hin.

Unter Berücksichtigung dieser Abweichungen kann schließlich eine Bewertung der Messdatenerfassung und -auswertung erfolgen und eventuelle Unsicherheiten detektiert werden.





#### Abb. 4-8 Bilanzraum zur Bewertung der Versuche

In Tab. 4-7 sind die Stoffstrombilanzen der Versuchsphasen um den Bilanzraum aufgestellt. Bezüglich der Abweichungen der Stoffstrombilanzen ist erkennbar, dass Abweichungen der einzelnen Elementbilanzen von -9 bis 89 % auftreten. So weist die Schwefelbilanz einen großen Fehler von 77, 80 bzw. 89 % auf, was mit der Nichterfassung schwefelhaltiger Verbindungen im Produktgas erklärt werden kann. Zu beachten ist dabei außerdem, dass die absoluten Schwefelmengen im Vergleich zu den anderen Stoffströmen sehr gering sind. Die Abweichung der Aschebilanz von 14, 12 bzw. 20 % weist auf eine Ungenauigkeit am Sammelbehälter des Filterstaubes oder auf eine Ansammlung des Filterstaubes innerhalb der Anlage (z.B. Gewebefilter, Transport- und Übergabesystem) für den Zeitraum der Versuchsphasen hin. Diese Abweichung hat ebenfalls Auswirkung auf die Kohlenstoffbilanz, da dieser den massebezogenen Hauptanteil am Filterstaub ausmacht und ebenfalls eine positive Bilanzabweichung von 21 bis 22 % aufweist. Maßgebliche Unterschiede in den anderen Stoffbilanzen der jeweiligen Versuchsphase sind bis auf die der Aschebilanz nicht auszumachen. So liegen deren Abweichungen zwischen -9 und 14 %. Somit können unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aufgrund von Probenahme, Laboranalyse etc. die ermittelten Stoffwerte als belastbar eingeschätzt werden. Auch die Gesamtmassebilanz weist bei allen Versuchsphasen eine Abweichung von <10% auf und wird daher ebenfalls als belastbar eingeschätzt.

In Tab. 4-8 sind die Energiestrombilanzen um den Bilanzraum aufgestellt. Bezüglich der Abweichung der Energiestrombilanz ist erkennbar, dass eine Abweichung der Energiebilanz von absolut 31, 30 und 31 kW bzw. relativ 22, 20 und 21% ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum eintretenden Energiestrom ein um 20 bis 22% niedrigerer Energiestrom den Reaktor verlässt. Da die im Bilanzraum auftretenden Oberflächenwärmeverluste an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion bilanztechnisch nur eingeschränkt erfasst werden können, bilden diese vermutlich den hauptsächlichen Anteil am Bilanzfehler der jeweiligen Messfahrt.

Bei der Energiestrombilanz sind keine maßgeblichen Unterschiede beim Vergleich der Versuchsphasen untereinander festzustellen. Somit können die Auswertungen der Betriebsvariation in den Versuchsphasen vorgenommen werden.



#### Tab. 4-7 Daten der Stoffstrombilanzen für die Versuchsphasen in kg/h

Stoffströme	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Filterstaub	Produktgas	Abweichung absolut	Abweichung relativ
		Phase	1			
Kohlenstoff	13,65	0,00	-0,40	-10,27	2,99	22%
Wasserstoff	1,80	0,00	0,00	-1,58	0,21	12%
Sauerstoff	12,31	10,23	-0,02	-19,84	2,68	12%
Stickstoff	0,00	33,68	0,00	-36,83	-3,14	-9%
Schwefel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77%
Asche	0,12	0,00	-0,10	0,00	0,02	14%
Gesamtmasse	27,89	43,91	-0,53	-68,52	2,75	4%
		Phase	2			
Kohlenstoff	13,58	0,00	-0,42	-10,38	2,78	21%
Wasserstoff	1,81	0,00	0,00	-1,58	0,22	12%
Sauerstoff	12,40	10,31	-0,03	-19,46	3,22	14%
Stickstoff	0,00	33,95	0,00	-34,74	-0,78	-2%
Schwefel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80%
Asche	0,12	0,00	-0,10	0,00	0,01	12%
Gesamtmasse	27,91	44,26	-0,55	-66,17	5,45	8%
		Phase	3			
Kohlenstoff	13,82	0,00	-0,41	-10,55	2,87	21%
Wasserstoff	1,84	0,00	0,00	-1,62	0,21	12%
Sauerstoff	12,62	10,22	-0,02	-19,64	3,17	14%
Stickstoff	0,00	33,65	0,00	-33,67	-0,02	0%
Schwefel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89%
Asche	0,12	0,00	-0,10	-0,00	0,02	20%
Gesamtmasse	28,41	43,86	-0,53	-65,48	6,26	9%

#### Tab. 4-8 Daten der Energiestrombilanzen für die Versuchsphasen in kW

Energieströme	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Filterstaub	Produktgas	Abweichung absolut	Abweichung relativ
		Phase 1				
Chemische Energie	141,74	0,00	-3,87	-87,88		
Thermische Energie	0,00	1,93	0,00	-20,95		
Energiebilanz	141,74	1,93	-3,87	-108,84	30,96	22%
		Phase 2				
Chemische Energie	140,82	0,00	-3,94	-91,33		
Thermische Energie	0,00	4,66	0,00	-20,72		
Energiebilanz	140,82	4,66	-3,94	-112,05	29,49	20%
		Phase 3				
Chemische Energie	143,36	0,00	-3,88	-94,04		
Thermische Energie	0,00	6,83	0,00	-20,89		
Energiebilanz	143,36	6,83	-3,88	-114,92	31,39	21%



## 5 Bewertung der Temperaturvariationen

#### 5.1 Vergleich der Auswirkungen

In Abb. 5-1 sind zum Vergleich u.a. die in Tab. 4-6 dargestellten Mess- und Versuchsdaten der jeweiligen Versuchsphase dargestellt. Um eine gemeinsame Darstellung der Werte in den Diagrammen zu ermöglichen, wurden für die Darstellung der Produktgasheizwert sowie der Massenstrom des Filterstaubes mit dem Faktor 10 multipliziert.

Ersichtlich sind mit steigender Vergasungsmitteltemperatur folgende Tendenzen:

- Sinkender Produktgasmassenstrom
- Steigender Anteil von CO und H<sub>2</sub> im Produktgas und damit steigender Heizwert
- Steigende mittlere Reaktorwandtemperatur
- Steigende Temperatur in der Oxidationszone des Reaktorbettes (Auswertung hier nur f
  ür Phase 1 und 2)
- Steigende Produktgastemperatur am Reaktoraustritt

Bei den anderen im Diagramm aufgeführten Parametern sind keine Tendenzen ersichtlich. Die Massenströme von Brennstoff, Vergasungsmittel und Filterstaub, der chemische Energiestrom des Filterstaubes und die elektrische Leistung des BHKW sind bei dem Vergleich der 3 Eintrittstemperaturen des Vergasungsmittels nahezu identisch.



Abb. 5-1 Vergleichende Darstellung von Mess- und Versuchsdaten in Abhängigkeit der Vergasungsmitteltemperatur

Um darzustellen wie stark die Anteile von CO und  $H_2$  im Produktgas steigen, werden im folgenden Diagramm (Abb. 5-2) die wichtigsten Gasanteile und deren Mittelwert mit der Schwankungsbreite zwischen minimalen und maximalen Wert für die jeweilige Versuchsphase aufgeführt. Ersichtlich ist dabei der Anstieg von CO um absolut



2,6 Vol.-% tr. und von  $H_2$  um absolut 1,9 Vol.-% tr., was einen relativen Anstieg von 11% für beide Gase bedeutet.



Abb. 5-2 Min-, Max-, u. Mittelwerte von Produktgasanteilen im Vergleich der Versuchsphasen 1 bis 3

#### 5.2 Kennzahlen zum Vergasungsprozess

#### 5.2.1 Kohlenstoffumsatzgrad

Als Effizienzkennzahl kann der Kohlenstoffumsetzungsgrad für die betrachteten Messfahrten herangezogen werden. Dafür wird der Kohlenstoffmassestrom im Filterstaub zu der Kohlenstofffracht im Brennstoff in Beziehung gesetzt. Er beschreibt somit, wieviel des mit dem Brennstoff zugeführten festen Kohlenstoffs in die Gasphase des zu nutzenden Produktgas umgesetzt wird und kann folglich auch als Kennzahl des Vergasungsprozesses dienen. In [7] werden für Festbett-Gleichstrom-Vergaser bei Einsatz von Biomasse als typische Kohlenstoffumsatzgrade 97 bis 99 % angegeben.

#### 5.2.2 Kaltgaswirkungsgrad

Der Kaltgaswirkungsgrad wird nach [8] aus dem Quotient der chemischen Gasleistung und der Brennstoffleistung berechnet und beschreibt folglich, wie groß das Verhältnis zwischen der im Produktgas chemisch gebundenen Energie und der mit dem Brennstoff eingebrachten chemischen Energie ist. Die Brennstoff- und Gasleistung wiederum werden als Produkt des jeweiligen Massenstroms und Heizwertes berechnet. In [9] werden für kleintechnische Festbett-Gleichstrom-Vergaser bei Einsatz von Biomasse typische Kaltgaswirkungsgrade von 65 bis 75 % angegeben.

#### 5.2.3 Elektrischer Anlagenwirkungsgrad

Der elektrische Anlagenwirkungsgrad gibt das Verhältnis der zur Verfügung gestellten (eingespeisten) elektrischen Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten chemischen

Energie an. Für den hier relevanten Leistungsbereich unterhalb 50 kW<sub>el</sub> gibt [10] für Holzvergaser-BHKW einen in der Praxis erreichbaren elektrischen Anlagenwirkungsgrad von etwa 25 % an.

## 5.3 Stoffstromverhältnisse zum Vergasungsprozess

Es kann das Luftverhältnis des Vergasungsprozesses gebildet werden, indem nach [11] das Verhältnis zwischen der mit dem Vergasungsmittel zugeführten Sauerstoffmenge und der für eine vollständige Oxidation stöchiometrisch benötigten Sauerstoffmenge gebildet wird. Bei der Vergasung mit dem Vergasungsmittel Luft werden dabei typischerweise Luftverhältnisse von 0,3 bis 0,5 erreicht [11], [12].

Außerdem können für die Bewertung der Stoffumsätze im Vergasungsprozess aus den zum Reaktor ein- und austretenden Stoffströmen Verhältnisse gebildet und für verschiedene Prozesszustände miteinander verglichen werden. Mögliche Stoffstromverhältnisse sind dabei:

- Produktgas zu Brennstoff
- Produktgas zu Brennstoff Trockensubstanz
- Produktgas zu Vergasungsmittel

Ziel der Berechnung und Darstellung dieser Stoffstromverhältnisse ist die Anzeige einer Tendenz, ob die Vergasungsmitteltemperatur einen Einfluss auf die generierte Menge an Produktgas aus den eintretenden Stoffströmen Brennstoff und Vergasungsmittel hat.

## 5.4 Auswahl geeigneter Bewertungskennzahlen auf Basis der Daten der Vorversuche aus Versuchsabschnitt 1

In Versuchsabschnitt 1 (siehe Kapitel 2.4) wurde testweise das Vergasungsmittel mit dem Lufterhitzer in 30 min-Intervallen auf verschiedene Temperaturen erhitzt und anschließend für die kurzen Zeiträume die Prozessauswirkungen erfasst und bewertet. Dieser Versuchsabschnitt diente somit der Auswahl geeigneter Variationsbereiche der Vergasungsmitteltemperatur. Außerdem wurden die Messdaten ausgewertet und erste Bewertungskennzahlen sowie Stoffstromverhältnisse berechnet, um damit eventuelle Tendenzen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur sichtbar zu machen. Zu berücksichtigen ist jedoch dabei die große Unsicherheit aufgrund der kurzen 30 min-Zeitintervalle. So sind z.B. die erfassten Brennstoffmassenströme aufgrund der diskontinuierlichen Zuführung mit einer relativ großen Unsicherheit für diese Zeitintervalle verbunden. Für die guantitative Darstellung eventueller Tendenzen dieser Stoffstromverhältnisse Abhängigkeit Parameter bzw. in von der Vergasungsmitteltemperatur sollen diese trotz der beschriebenen Unsicherheit in den 5-4 aufgezeigt folgenden Abb. 5-3 sowie Abb. werden. Ziel dieser Abhängigkeitsuntersuchung ist es, geeignete Bewertungsparameter zu detektieren um diese anschließend für eine intensivere Analyse mit den Daten aus dem Versuchsabschnitt 2 anzuwenden.

Dabei ist aus Abb. 5-3 ersichtlich, dass mit steigender Vergasungsmitteltemperatur keine Abhängigkeit des Kaltgaswirkungsgrades festzustellen ist. Dies erklärt sich möglicherweise aus dem Verlauf von Massenstrom und Heizwert des Produktgases. Der Heizwert steigt hier mit höheren Vergasungsmitteltemperaturen, der Massenstrom sinkt hingegen. Die Ursache hierfür liegt an dem definierten Gasvolumen (Hubraum) welches der Motor durch seine Kolbenbewegungen transportieren kann. Sollte also der Anteil brennbarer Bestandteile im Produktgas steigen (und damit der Heizwert), steigt ebenfalls der Anteil der vom Motor angesaugten Luft (Motorluft), da die brennbaren Gasanteile im Motor nahezu vollständig umgesetzt - also oxidiert - werden. Die Steuerung dieser



Massenströme obliegt der Lambdaregelung mit einer Klappensteuerung vor der Mischkammer von Produktgas und Motorluft. Da jedoch das Gesamtfördervolumen des Motors fest gegeben ist, muss der Produktgasanteil am Gesamtgemisch sinken, was zu einem sinkenden Produktgasmassenstrom führt.

Für den nachfolgenden Vergleich und Bewertung der Variationen werden trotz dieser Abhängigkeit alle drei hier dargestellten Parameter bzw. Kennzahlen verwendet.



Abb. 5-3 Für Versuchsabschnitt 1 (n=19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Bewertungsparameter und -kennzahlen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

In Abb. 5-4 sind aus die aus den erfassten Massenströmen von Brennstoff, Vergasungsmittel und Produktgas ermittelten Stoffstromverhältnisse aufgezeigt. Dabei wird eine generelle Tendenz sichtbar. Alle Stoffstromverhältnisse sinken mit steigender Vergasungsmitteltemperatur. Vermutlich werden sie maßgeblich durch den mit höheren Vergasungsmittel-Eintrittstemperaturen sinkenden Produktgasmassenstrom (siehe Ausführungen zuvor) beeinflusst. Folglich können die Stoffstromverhältnisse nicht zur Bewertung des Vergasungsprozesses angewendet werden.





Abb. 5-4 Für Versuchsabschnitt 1 (n=19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

## 5.5 Vergleich der Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse für die Versuchsphasen

Werden die für die Bewertung ausgewählten Kennzahlen und Stoffstromverhältnisse aus den Mess- und Analysedaten des Versuchsabschnittes 2 (Messfahrt LuVo 2-2) berechnet, ergeben sich für die jeweilige Vergasungsmitteltemperatur bzw. Versuchsphase die in Tab. 5-1 dargestellten Werte. Zusätzlich sind diese Werte noch einmal grafisch in Abb. 5-5 abgebildet. Im Vergleich zum vorherigen Kapitel 5.4 wurden in dem abschließenden Versuchsabschnitt 2 Zeitintervalle von mind. 3 Stunden für die jeweilige Phase mit Berücksichtigung einer Einlaufzeit eingehalten und damit vergleichsweise belastbarere Messdaten ermittelt.

		Phase 1	Phase 2	Phase 3
Parameter	Einheit	Т∨м: 181°С	T <sub>∨M</sub> : 400°С	Т∨м: 579°С
Heizwert Produktgas	MJ/kg	4,62	4,97	5,17
Luftverhältnis		0,27	0,27	0,26
Produktgas zu Brennstoff	kg/kg	2,46	2,37	2,31
Produktgas zu Brennstoff TS	kg/kg	2,52	2,45	2,38
Produktgas zu Vergasungsmittel	kg/kg	1,56	1,50	1,49
Kohlenstoffumsatzgrad	%	97,1	96,9	97,0
Kaltgaswirkungsgrad	%	62,1	64,9	65,7
Elektrischer Anlagenwirkungsgrad	%	20,2	20,6	20,3

Tab 5-1	Rewertungskennzahlen um	d Stoffstromverhältnisse für die	Vergasungsmitteltemperaturen
Tab. 5-1	Deweitungskennzamen un		vergasungsmillenemperaluren

Beim Vergleich der Versuchsphasen 1 bis 3 ergeben sich mit steigender Vergasungsmitteltemperatur folgende Tendenzen der Bewertungsparameter und - kennzahlen:



- Signifikant steigender Heizwert des Produktgases
- Leicht steigender Kaltgaswirkungsgrad
- Keine Veränderung des Kohlenstoffumsatzgrades
- Keine Veränderung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades

Das Luftverhältnis lag nahezu konstant bei 0,27 und damit in einem typischen Bereich für Vergasungsreaktionen dieses Anlagentyps, wies jedoch keinen signifikanten Unterschied bei steigender Vergasungsmitteltemperatur auf.

Hinsichtlich der gewählten Stoffstromverhältnisse ist bei allen eine leicht sinkende Tendenz festzustellen. Dies ist, wie zuvor in Kapitel 5.4 beschrieben, vermutlich das Resultat des sinkenden Produktgasmassenstromes bei annähernd konstanten Massenströmen von Brennstoff und Vergasungsmittel.



Abb. 5-5 Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

#### 5.6 Zusammenfassung und abschließende Bewertung

Die Betriebsvariation der Vergasungsmitteltemperatur mit einem marktüblichen Biomasse-Vergasung-BHKW konnte durch Integration einer Lufterhitzerstrecke und deren Einbindung in die Anlagensteuerung erfolgreich durchgeführt werden. Die bei vergleichbaren Rahmenbedingungen (Brennstoffqualität, Anlagenzustand) erfassten Variationsauswirkungen wurden ausgewertet und verglichen.

grundlegende Ziel dieser Parametervariation, die Optimierung Das der thermochemischen Reaktionen um damit eine signifikante Steigerung der Effizienz (Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsetzungsgrad) zu erreichen, konnte nur teilweise nachgewiesen werden. Einzig bei der Produktgaszusammensetzung stiegen die Anteile von CO und H<sub>2</sub> dahingehend, dass der entsprechende Heizwert um relativ 12 % zwischen Phase 1 und 3 gesteigert werden konnte. Auch eine leichte Steigerung der Kaltgaswirkungsgrades um 6 % relativ zwischen den Phasen wurde erreicht. Jedoch ist durch die Kombination der Gaserzeugung und Gasnutzung im Motor die Gesamtanlage in ihrem Betriebspunkt festgelegt. Dies ist auch an dem nahezu konstanten elektrischen



Anlagenwirkungsgrad zu erkennen. Somit fehlen für eine Variation bestimmter Betriebsparameter zur Untersuchung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen die Freiheitsgrade in der Anlagenfahrweise. Hierfür wäre ein Versuchsstand mit einem Festbett-Gleichstromvergaser und freier Ausströmung des Produktgases aus dem Reaktor notwendig.

Derzeitig wird vom Hersteller der maximale Brennstoffwassergehalt mit 13 Ma.-% angegeben [13]. Unter Beachtung der Erfahrungen aus dieser Betriebsvariation ist es ggf. möglich, mit einer Erhöhung der Eintrittstemperatur des Vergasungsmittel Luft zumindest zeitweise einen Brennstoff mit einem deutlich höheren Wassergehalt einzusetzen. Die für die Trocknung des Brennstoffes notwendige zusätzliche Energie würde das Vergasungsmittel aufgrund seiner höheren Temperatur mitbringen. Dies könnte die Einsatzflexibilität hinsichtlich Brennstoffen mit schwankendem Wassergehalt erhöhen. Natürlich muss demgegenüber der zusätzliche Aufwand für die Erhöhung der Vergasungsmitteltemperatur beachtet werden. Darüber hinaus sind durch die damit höheren Reaktorwandtemperaturen entsprechend gestiegene Materialbelastungen und höhere Wärmeverluste zu beachten. Dies wäre ein möglicher Untersuchungspunkt in Anschlussprojekten.



## Literaturverzeichnis

[1] UNGER, C., SCHULZKE, T.: Thermodynamische Herausforderungen der Biomassevergasung, Vortrag zur 5. Internationalen Anwenderkonferenz für Biomassevergasung, Stuttgart, 11.02.2011

[2] MEVISSEN, N., SCHULZKE, T., UNGER, C., MAC AN BHAIRD, S.: Thermodynamics of Autothermal Wood Gasification, Environmental Progress & Sustainable Energy (Vol.28, No.3), American Institute of Chemical Engineers, DOI 10.1002/ep.10393, 2009

[3] FUCHS, J., SCHMID, J.C., MÜLLER, S., MAUERHOFER, A.M., BENEDIKT, F., HOFBAUER, H.: The impact of gasification temperature on the process characteristics of sorption enhanced reforming of biomass, Biomass Conversion and Biorefinery (2020) 10:925-936, https://doi.org/10.1007/s13399-019-00439-9, 2019

[4] NUSSBAUMER, T.: Grundlagen der Holzvergasung, Heizung Klima 7 1990, 52-60

[5] ZSCHUNKE ET AL.: Zittauer Kraftwerkslabor – Thermochemisches Versuchsfeld, Abschlussbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2015, https://ipm.hszg.de/ kompetenzen/kraftwerks-dampferzeuger-und-feuerungstechnik/publikationen

[6] ONG, Z., CHENG, Y., MANEERUNG, T., YAO, Z., TONG, Y.W., WANG, C.H., DAI, Y.: Co-gasification of Woody Biomass and Sewage Sludge in an Fixed-Bed Downdraft Gasifier, American Institute of Chemical Engineers AIChE J, 61: 2508-2521, 2015 10:925-936, DOI 10.1002/aic.14836

[7] REIL, S.: Zur Biomassevergasung in "stratified downdraft" Reaktoren und deren Prozessstabilisierung, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2019

[8] THRÄN, D., PFEIFFER, D.: Methodenhandbuch, Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Methoden zur Bestimmung von Technologiekennwerten, Gestehungskosten und Klimagaseffekten im Vorhaben im Rahmen des BMWi-Forschungsnetzwerkes Bioenergie / BMWi-Förderbereich "Energetische Biomassenutzung", In: Schriftenreihe "Energetische Biomassenutzung" Band 04, 5. Aufl. Leipzig, ISBN 978-3-946629-58-0, DOI: 10.48480/ddpt-ys74

[9] KLEMM, M.: Small Scale Biomass Gasification for Rural Electrification. In Kaltschmitt, M. (ed.), Energy from Organic Materials (Biomass) (S. 715), 2019, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7\_252

[10] SCHRAUBE, C., FEHRENBACH, D., KREMERS, E., BÜCHNER, D., THEURICH, S., WURDINGER, S.: DBFZ Report Nr. 42, Rahmenbedingungen für einen optimierten Betrieb von kleinen biomassebasierten BHKW, Leipzig, DBFZ, 2021, ISBN: 978-3-946629-75-7, DOI: 10.48480/w956-8a59

[11] HOFBAUER, H., KALTSCHMITT, M., KEIL, F., NEULING, U., WAGNER, J.: Vergasung in der Gasatmosphäre. In Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Hg.), Energie aus Biomasse (S. 1059). 3. Auflage, Springer Fachmedien (Springer Vieweg). 2016 https://doi.org/10.1007/978-3-662-47438-9

[12] VDI 3461: 2018-12 Emissionsminderung Thermochemische Vergasung von Biomasse und Kraft-Wärme-Kopplung (Emission Control Thermochemical gasification of biomass in combined heat and power configurations). Berlin: Beuth Verlag

[13] Spanner Re<sup>2</sup> GmbH: Brennstoffe – Holzvergaser & Holzgas-BHKW. https://www.holz-kraft.com/de/holzvergaser/brennstoffe-holzvergaser-bhkw.html, abgerufen am 29.03.2022