



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Institut für Prozeßtechnik,
Prozeßautomatisierung
und Meßtechnik



Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und
Feuerungstechnik



FORSCHUNGSBERICHT: STROHVERGASUNG

Autoren	Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider
	Dipl.-Ing. Steffen Grusla
	Dipl.-Ing. (FH) Michael Hofmeister
	Dipl.-Ing. (FH) Ralf Pohl
	Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Ausgabe	19.02.2021
Revision	3

Forschungsbericht

STROHVERGASUNG

im Projekt

HOCHTEMPERATURKONVERSION VON REST- UND ABFALLSTOFFEN (HORA)

<BRENNSTOFFVARIATION, Einsatz von Rest- und Abfallstoffen>

Februar 2021

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Autoren	Roman Schneider Steffen Grusla Michael Hofmeister Ralf Pohl Tobias Zschunke
Projektlaufzeit	01.05.2019 – 31.07.2021
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	Biomassevergasung

Abstract

Im Thermochemischen Versuchsfeld der Hochschule Zittau/Görlitz wurden Brennstoffvariationen mit Rest- bzw. Abfallstoffen durchgeführt. Dabei wurde test- und zeitweise ein Vergaserprototyp der Fa. MFC GmbH genutzt und als Brennstoff Strohpellets eingesetzt. Besonderheit dieses Festbett-Gleichstrom-Vergasers ist der Umgang mit Verschlackungen während des Anlagenbetriebes und somit die Einsatzfähigkeit von Brennstoffen mit niedriger Ascheerweichungstemperatur und relativ hohen Aschegehalten bei entsprechender Verschlackungsgefahr.

Im Rahmen der Messfahrten (MF) wurden Parametervariationen durchgeführt und als Ergebnis der Variationen ein Parametersatz gewählt, der in der abschließenden Langzeitmessfahrt zur Anwendung kam. Die Begleitung und Bewertung der MF erfolgte durch die Analyse der ein- und austretenden Stoffströme, um neben der Charakterisierung auch eine Abschätzung der Stoff- und Energiestrombilanzen und eine Kenngrößenermittlung aufstellen zu können. Dabei bezog sich die Auswertung hauptsächlich auf den Vergasungsprozess mit den entsprechenden Stoffströmen (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Rostasche, Filterstaub), um anschließend die Einsatzeignung der Strohpellets bewerten zu können.

Als Ergebnis der durchgeführten Messfahrten konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit dem Vergaserprototyp die Vergasung von Strohpellets zum Zwecke der Schwachgasbereitstellung möglich ist. Insgesamt wurden im Rahmen der Untersuchung neun Messfahrten mit über 75 Stunden Betriebszeit durchgeführt.

FREIGABE

Autor(en)

Geprüft

Freigegeben

Änderungen

Rev	Datum	Name	Änderung(en)
0	26.08.2020	Pohl	Erster Entwurf
1	09.09.2020	Schneider	Bearbeitung
1.1	04.12.2020	Schneider	Bearbeitung
1.2	10.01.2021	Schneider	Bearbeitung
2	21.01.2021	Schneider	Zweiter Entwurf
2.1	01.02.2021	Schneider	Überarbeitungen
3	19.02.2021	Schneider	Fertigstellung

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Motivation und Ziel	6
3	Vorgehen	7
4	Kurzbeschreibung der Versuchsanlage	9
5	Kurzbeschreibung der Messtechnik	13
6	Beschreibung der Messfahrten	17
6.1	Allgemeines Vorgehen	17
6.2	Übersicht Messfahrten und Parameterauswahl	17
7	Laboranalysen	19
7.1	Analysenmethoden zur Bestimmung	19
7.1.1	Kurzanalyse bzw. Immediatanalyse	19
7.1.2	Brennwertbestimmung	19
7.2	Probenmaterial	19
7.3	Ergebnisse der Laboranalysen	20
8	Auswertung der Messfahrten	21
8.1	Stoffströme	21
8.1.1	Brennstoff	21
8.1.2	Vergasungsmittel Luft / Produktgas	22
8.1.3	Rostasche und Filterstaub	24
8.1.4	Zusammenfassung der Mess- und Berechnungsdaten	25
8.2	Störungen	25
8.3	Anlagenfahrweise	26
9	Bilanzierung der Messfahrten	30
10	Bewertung	34
	Literaturverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1	Grafische Darstellung des stationären Zustandes in Abhängigkeit von T1106 (Gastemperatur Filteraustritt), MF MFC-Lang	8
Abb. 4-1	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 1 (Vorderansicht)	10
Abb. 4-2	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 2 (Vorderansicht oben)	10
Abb. 4-3	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 3 (Seitenansicht rechts).....	11
Abb. 4-4	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 4 (Seitenansicht links)	11
Abb. 4-5	Auszug aus dem R&I der Versuchsanlage X5 der Fa. MFC GmbH [4]	12
Abb. 5-1	Mikro-Gaschromatograph mit vorgeschaltetem Messgaskühler zur Erfassung der Produktgas-zusammensetzung	13
Abb. 5-2	Prallstrahlpsychrometer zur Erfassung der Wassergehaltes im Produktgas	13
Abb. 5-3	Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF	14
Abb. 5-4	Darstellung der Messstelle (nach Notfilter) zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung	14
Abb. 5-5	Darstellung der Messstelle zur Erfassung des Produktgas-Wassergehaltes	14
Abb. 5-6	Nach der MF deinstallierter Filterstaubbehälter zur Abwägung und Probenahme des Filterstaubes.....	15
Abb. 5-7	Nach der MF deinstallierter Rostaschesammelbehälter zur Abwägung der Rostasche	15
Abb. 5-8	Nach der MF Probenahme der Rostasche bei laufendem Rost	15
Tab. 5-2	Messstellenübersicht mit Bezeichnung und Beispielmesswert	16
Tab. 7-1	Laboranalysergebnisse der Brennstoff- und Reststoffproben der jeweiligen MF	20
Abb. 8-1	Produktgaszusammensetzung während MF MFC-Lang	21
Abb. 8-2	Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume	23
Tab. 8-6	Übersicht der Mess- und Berechnungsdaten, Teil 1	25
Tab. 8-7	Übersicht der Mess- und Berechnungsdaten, Teil 2	25
Abb. 8-3	Verlauf des Wassergehaltes im Produktgas, MF MFC-Lang	26
Abb. 8-4	Verlauf der Produktgaszusammensetzung, MF MFC-Lang	27
Abb. 8-5	Verlauf der Gastemperaturen (Luft, Produktgas),MF MFC-Lang	28
Abb. 8-6	Verlauf der Reaktortemperaturen, MF MFC-Lang	29
Abb. 8-7	Verlauf der Absolut- und Differenzdrücke in der Produktgasstrecke, MF MFC-Lang	29
Abb. 9-1	Darstellung des Bilanzraumes zur Bilanzierung der Langzeitmessfahrt....	30
Abb. 9-2	Sankey-Diagramm der Stoffstrombilanz der MF MFC-Lang	32
Abb. 9-3	Sankey-Diagramm der Energiebilanz der MF MFC-Lang	33
Tab. 10-1	Wirkungsgrade der einzelnen Messfahrten, Mittelwerte für Auswertungszeiträume	34

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten	7
Tab. 5-1	Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme	13
Tab. 6-1	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten	17
Tab. 6-2	Bewertung der Parametervariationen und Parameterauswahl für MF MFC- Lang.....	18
Tab. 7-2	Elementaranalysenergebnis der Brennstoffproben.....	20
Tab. 8-1	Brennstoffcharakteristika bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang ..	22
Tab. 8-2	Vergasungsmittelcharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume.....	22
Tab. 8-3	Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume	23
Tab. 8-4	Produktgascharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume	24
Tab. 8-5	Massenströme von Rostasche und Filterstaub bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang	24
Tab. 9-1	Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten der MF MFC-Lang für den stationären Auswertungszeitraum (ca. 22 h)	31
Tab. 9-2	Daten der Stoffstrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum der MF MFC-Lang in kg/h	32
Tab. 9-3	Daten der Energiestrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum der MF MFC-Lang in kW	33

Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN

A	Asche
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIN	Deutsches Institut für Normung
F	Volumenstrom
Fa.	Firma
GC	Gaschromatograph
GR	Gärrest
H	Höhe
H	Wasserstoff elementar
h	Stunde
HHS	Holzhackschnitzel
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
HORA	Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (Forschungsprojekt)
i.N.	im Normzustand
ISO	International Organization for Standardization
m	Masse
Ma.	Masse
MDF	Mitteldichte Holzfaserplatte
MF	Messfahrt
MFC	Multifuel Conversion GmbH
μGC	Mikro-Gaschromatograph
min	Minute
N	Stickstoff elementar
O	Sauerstoff elementar
P	Druck
S	Schwefel
SP	Strohpellets
T	Temperatur
TCV	Thermochemisches Versuchsfeld
TGA	Thermogravimetrische Analyse
TS	Trockensubstanz
V*	Volumenstrom
WÜ	Wärmeübertrager

1 Zusammenfassung

Im Thermochemischen Versuchsfeld der Hochschule Zittau/Görlitz wurden im Rahmen des Projektes HORA Brennstoffvariationen mit Rest- bzw. Abfallstoffen durchgeführt. Dabei wurde test- und zeitweise ein Vergaserprototyp der Fa. MFC GmbH genutzt und als Brennstoff Strohpellets eingesetzt. Besonderheit dieses Festbett-Gleichstrom-Vergasers ist der Umgang mit Verschlackungen während des Anlagenbetriebes und somit die Einsatzfähigkeit von Brennstoffen mit niedriger Ascheerweichungstemperatur und relativ hohen Aschegehalten bei entsprechender Verschlackungsgefahr.

Im Rahmen der Messfahrten (MF) wurden Parametervariationen durchgeführt und als Ergebnis der Variationen ein Parametersatz gewählt, der in der abschließenden Langzeitmessfahrt zur Anwendung kam. Insgesamt wurden im Rahmen der Untersuchung neun Messfahrten mit über 75 Stunden Betriebszeit durchgeführt.

Die Begleitung und Bewertung der MF erfolgte durch die Analyse der ein- und austretenden Stoffströme, um neben der Charakterisierung auch eine Abschätzung der Stoff- und Energiestrombilanzen und eine Kenngrößenermittlung aufstellen zu können. Dabei bezog sich die Auswertung hauptsächlich auf den Vergasungsprozess mit den entsprechenden Stoffströmen (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Rostasche, Filterstaub), um anschließend die Einsatzeignung der Strohpellets bewerten zu können.

Als Ergebnis der durchgeführten Messfahrten konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit kleintechnischer Festbett-Gleichstromvergasung die Vergasung von Strohpellets zum Zwecke der Schwachgasbereitstellung stabil möglich ist. Die Qualität des Produktgases ist aus energetischer Sicht ähnlich der von Produktgasen bei der Vergasung von Holz. Auch anhand der ermittelten Kenngrößen (Kaltgaswirkungsgrad und Brennstoffausnutzungsgrad) bezogen auf die einzelnen MF kann von einer guten Umsetzungseffizienz des Brennstoffes in diesem Festbett-Gleichstrom-Vergaser-Prototyp ausgegangen werden.

Mit weiteren umfangreichen Tests und MF sollten die Erkenntnisse dieser Versuche überprüft und die Ableitung von allgemeingültigen ingenieurwissenschaftlichen Schlussfolgerungen auf die Betriebsführung von Vergasungsanlagen unterstützt werden.

2 Motivation und Ziel

In vorangegangenen Arbeiten [1] wurde für die Biomassevergasung der Bedarf nach Untersuchungen mit bisher nicht verwendeten Brennstoffen sowohl auf Basis nicht-holzartiger Stoffe (z.B. Gärreste, Klärschlämme, CFK-Abfälle) als auch hinsichtlich holzartiger Rest- und Abfallstoffe (z.B. Sägewerksabfälle) erkennbar. Um diese Nachfragen systematisch zu bearbeiten und beantworten zu können, werden im Rahmen des Projektes HORA (Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen) umfangreiche Untersuchungen zur Erweiterung des Brennstoffbandes durchgeführt.

Diesbezüglich konnte im Thermochemischen Versuchsfeld (TCV) ein weiterer Versuchsstand zur Biomassevergasung aufgebaut werden. Die Grundlage des Versuchsstandes bildet ein Prototyp einer Vergasungsanlage der Fa. MFC Multifuel Conversion GmbH. Dieser soll aufgrund seiner Ausführung und zusätzlicher mechanischer Komponenten in der Lage sein, Brennstoffe über einen Festbett-Gleichstrom-Vergasungsverfahren umzusetzen, die einen - im Vergleich zu Holz - niedrigen Asche-Schmelz-Temperaturbereich und relativ hohe Aschegehalte aufweisen. Beispielhaft hierfür gilt Stroh, das aufgrund seiner enthaltenen Elemente nach [2] für z.B. Weizenstroh eine Ascheerweichungstemperatur von ca. 1.000 °C aufweist. In [3] wurden bei einem Festbett-Gleichstromvergaser lokale Spitzentemperaturen im Reaktorfestbett von > 1.300 °C nachgewiesen, sodass bei Einsatz von Stroh als Brennstoff von einer signifikanten Verschlackungsgefahr des Prozesses auszugehen ist.

Der Vergaser-Prototyp hat mehrere Freiheitsgrade der Prozessparametereinstellung. Unter Nutzung der vorhandenen Messtechnik wurden bei Einsatz des Brennstoffs Strohpellets Messfahrten durchgeführt, bei denen zwei Prozessparameter systematisch variiert wurden, um schlussendlich einen Parametersatz auszuwählen und damit eine Langzeitmessfahrt mit den Strohpellets durchzuführen. Dabei wurde die Einsatzfähigkeit der Strohpellets als Brennstoff dieser Anlage untersucht, da die Strohpellets bei bestehenden Biomassevergasungsanlagen aufgrund ihrer Eigenschaften bisher nicht als Monobrennstoff eingesetzt werden können.

Ziel ist es, zukünftige thermochemische Verfahrensketten zu identifizieren, welche die umweltschonende thermische Umsetzung von bis dato als Problembrennstoff betrachteten Ressourcen für eine Dekarbonisierung des Energiesystems nutzbar machen.

3 Vorgehen

Für die Durchführung der Vergasungsversuche wurde folgende Anlage eingesetzt, die im nachfolgenden Kapitel 4 näher beschrieben wird :

- Vergasungsprototyp X5 der Fa. MFC Multifuel Conversion GmbH, Dresden

Aufgrund ihrer mechanisch beweglichen Bauteile im Reaktor, ist diese Vergasungsanlage in der Lage, zu Verschlackung neigende Brennstoffe einzusetzen und mit der entstehenden Schlacke im Reaktor so umzugehen, dass der Prozess nicht zum Erliegen kommt (vgl. Kapitel 4).

Im Rahmen der MF 6 bis 13 wurden die Parameter i) Volumenstrom Vergasungsmittel und ii) Füllstand Reaktor entsprechend Tab. 3-1 variiert, um die resultierenden Auswirkungen der Variation zu dokumentieren und für die abschließende Langzeitmessfahrt MFC-Lang einen geeigneten Parametersatz auszuwählen. Andere Prozessparameter bzw. Anlageneinstellungen wurden nicht variiert. Weitere Ausführungen zur Parametervariation sind im Kapitel 6.2 enthalten.

Tab. 3-1 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

Datum	Bezeichnung	Auswertungs- zeitraum	Volumenstrom Vergaserluft*	Füllstand Reaktor*	Massenstrom Brennstoff
<i>Einheit</i>		<i>h</i>	<i>m³/h (i.N.)</i>	<i>cm</i>	<i>kg/h</i>
11.06.20	MFC-MF6	02,12	7,50	32	5,11
12.06.20	MFC-MF7	02,83	8,50	32	5,73
17.06.20	MFC-MF8	02,83	9,49	32	6,15
18.06.20	MFC-MF9	03,33	7,48	27	5,05
19.06.20	MFC-MF10	02,50	8,48	27	5,42
22.06.20	MFC-MF11	02,67	9,51	27	6,23
16.07.20	MFC-MF12	03,00	9,51	27	5,66
17.07.20	MFC-MF13	03,00	9,49	32	6,02
09.10.20	MFC-Lang	21,72	8,97	32	5,89

*diese Parameter wurden variiert, der Brennstoffmassenstrom stellt sich ein

Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung der Produktgaszusammensetzung (CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, O₂, H₂O, N₂) sowie des Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Störungen, Rostascheanfall, Filterstaubanfall).

Die Datenerfassung erfolgte über den zum Prototyp zugehörigen Leitrechner der Fa. MFC GmbH und den Messrechner der eingesetzten Messtechnik jeweils mit unterschiedlichem Intervall zur Datenspeicherung. Diese voneinander abweichende Datenrate wurde im Nachgang miteinander abgeglichen. Hierbei wurde eine einheitliche Datenrate von 1 Wert pro Sekunde umgesetzt. Die Datenauswertung wurde nur für den stationären Zustand vorgenommen, welcher durch den stationären Temperaturverlauf der Messstelle T1106 (Gastemperatur Filteraustritt, vgl. Abb. 3-1) definiert wird. Für den dann gewählten Auswertungszeitraum, dessen Länge ebenfalls in Tab. 3-1 dargestellt ist, wurde eine Mittelwertbildung der Messdaten vorgenommen. Im Anschluss an die jeweilige Messfahrt wurden die Anfallmengen von Rostasche und Filterstaub abgewogen und die Proben für die Laboranalyse entnommen.

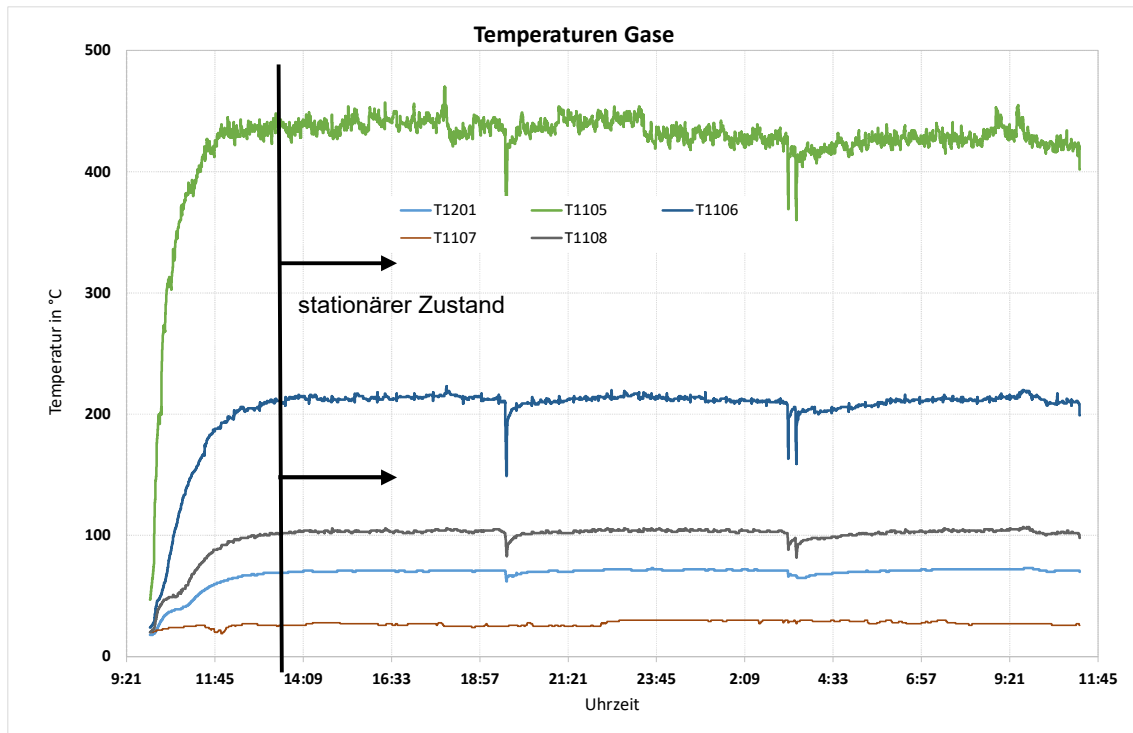


Abb. 3-1 Grafische Darstellung des stationären Zustandes in Abhängigkeit von T1106 (Gastemperatur Filteraustritt), MF MFC-Lang

Abschließend wurde eine Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Arbeiten inkl. Zusammenstellung und Diskussion der ermittelten Daten und Ergebnisse durchgeführt.

4 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage

Die für die Versuche eingesetzte Anlage X5 der Fa. MFC GmbH, ein Festbett-Gleichstromvergaser mit mechanischen Bauteilen zur Beherrschung der Wirkung von Schlackebildungen auf den Prozess, besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Brennstoffbehälter mit seelenloser Austragsschnecke
- Wassertank für den Kühlkreislauf des Reaktorrostes
- Reaktor (Festbett-Gleichstrom)
- Vertikal beweglicher Poker zur Verhinderung von Schlackeschichten
- Wassergekühlter Reaktorrost mit Auffangbehälter
- Gasfilter (mit 2 Filterkerzen sowie Pulsationseinheit) und Auffangbehälter
- Gebläse zur Ansaugung und Förderung des Vergasungsmittels
- Notfilter
- Doppelrohrwärmeübertrager (Gas/Gas) zur Vorwärmung des Vergasungsmittels

Der Brennstoffbehälter mit einem Fassungsvermögen von knapp 60 kg Strohpellets wird manuell mit der entsprechenden Menge an Brennstoff befüllt. Über die am Boden des Vorratsbehälters befindliche Austragsschnecke werden dem Reaktor der Brennstoff bzw. die Pellets zugeführt. Die entsprechende Füllstandsüberwachung und –regelung im Reaktor erfolgt über ein optisches Überwachungssystem per Laser, welches die Ansteuerung der Austragsschnecke des Vorratsbehälters übernimmt. Ein Druckgebläse fördert die notwendige Vergasungsluft von oben in den Reaktor. Außerdem werden sich eventuell im Reaktor bildende Schlackeschichten mechanisch von oben und auf einer ringförmigen Ebene über den s.g. Poker durchstoßen, um die Durchlässigkeit für Brennstoff und Luft zur Vergasungszone sicherzustellen. Im Reaktor werden die Pellets durch den thermochemischen Vergasungsprozess in ein Schwachgas umgewandelt. Bei diesem Prozess bleibt außer dem Gas ein gewisser Anteil an Restkohlenstoff übrig. Dieser wird zum Teil mit dem Gas aus dem Reaktor ausgetragen. Außerdem befindet sich im unteren Teil des Reaktors ein beweglicher Fingerrost, welcher an zwei wassergekühlten Wellen befestigt ist. Dieser hat die Aufgabe, die durch den Poker nach unten verschobenen Schlackebrocken zu zermahlen und in den Rostaschebehälter auszutragen. Das mit Partikeln behaftete Gas wird über den Rost abgeschieden und einer trockenen Gasreinigung (Pulsfilter) zugeführt. Dabei muss das Gas durch einen Kerzenfilter strömen. Der Staub lagert sich am Gewebe an und wird dort bei Erreichen einer bestimmten Druckdifferenz durch einen kurzen Druckimpuls (Pulsfilter) abgereinigt. Der anfallende Filterstaub fällt daraufhin in einen staub- und gasdichten Filterstaubbehälter. Das von Partikeln gereinigte Gas wird anschließend zu einer in der Versuchshalle vorhandenen Fackel zur Verbrennung zugeführt und die Rauchgase über einen Kamin abgegeben. Die gesamte Anlage wird mit maximal 135 mbar Überdruck betrieben und ist gasdicht ausgeführt. Bei einer Störung der Anlage werden alle Zuführungen automatisch geschlossen und das noch entstehende Gas in einer Fackel kontrolliert abgebrannt.

In den nachfolgenden Abb. 4-1, Abb. 4-2, Abb. 4-3 und Abb. 4-4 ist die Anlage dargestellt und die aufgeführten Hauptkomponenten sind noch einmal zur Anschaulichkeit markiert.

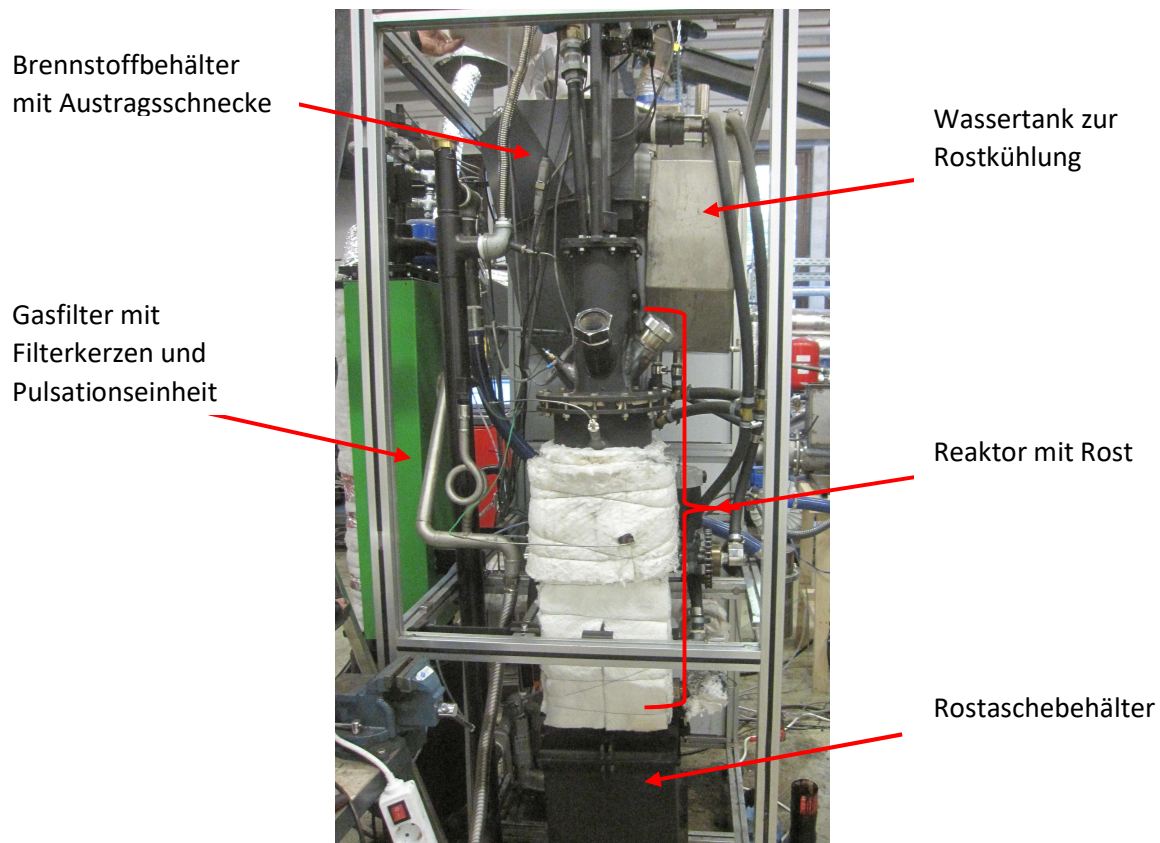


Abb. 4-1 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 1 (Vorderansicht)

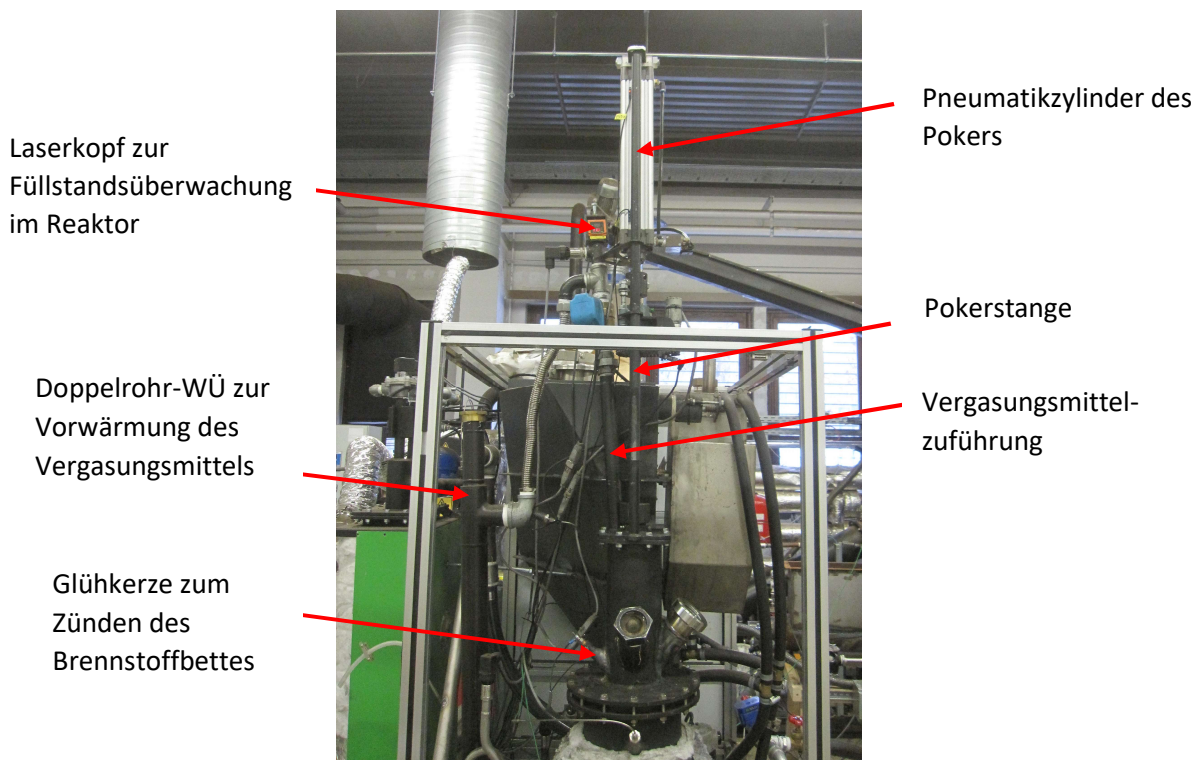


Abb. 4-2 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 2 (Vorderansicht oben)

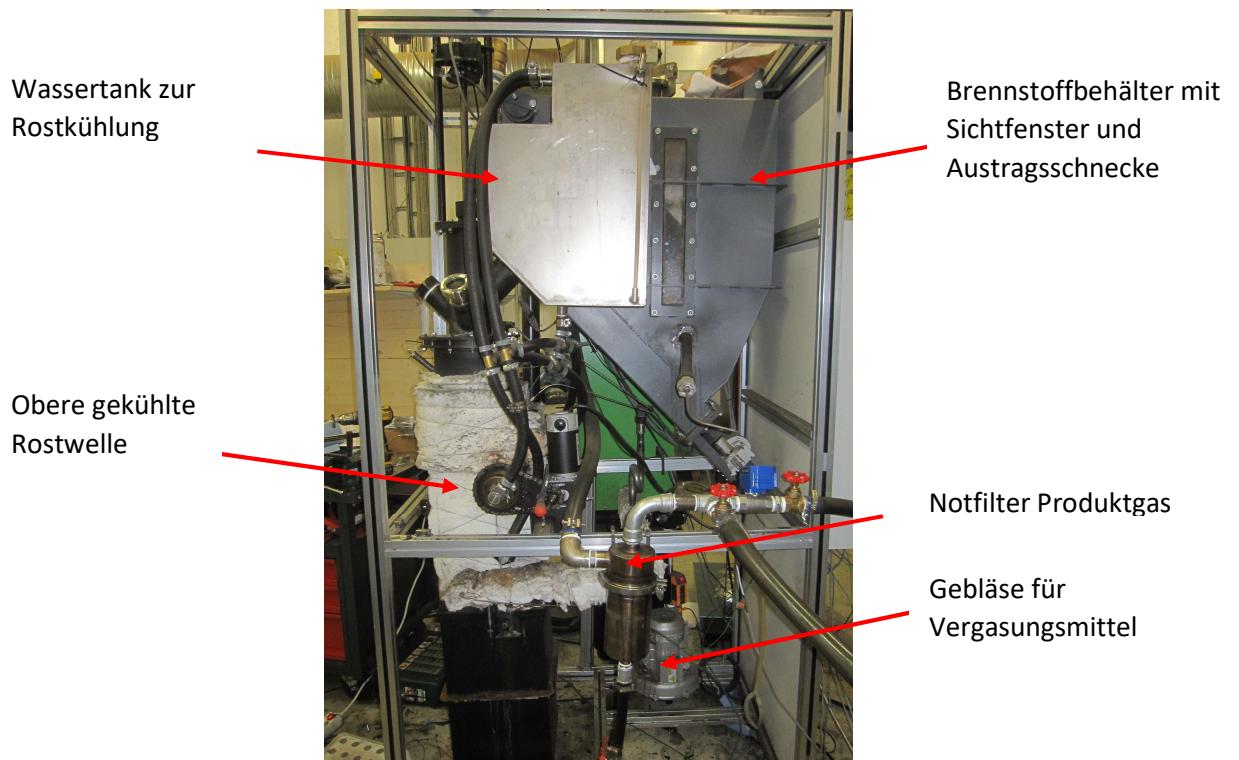


Abb. 4-3 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 3 (Seitenansicht rechts)

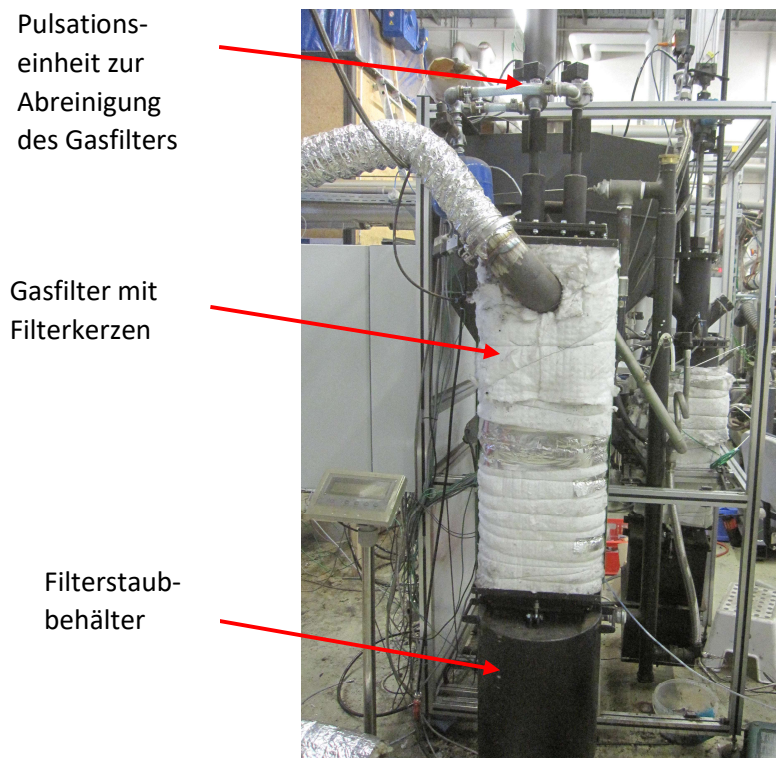


Abb. 4-4 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 4 (Seitenansicht links)

Zur weiteren Veranschaulichung der Anlage und des Prozessablaufes ist in Abb. 4-5 das R&I-Schema der Versuchsanlage abgebildet.

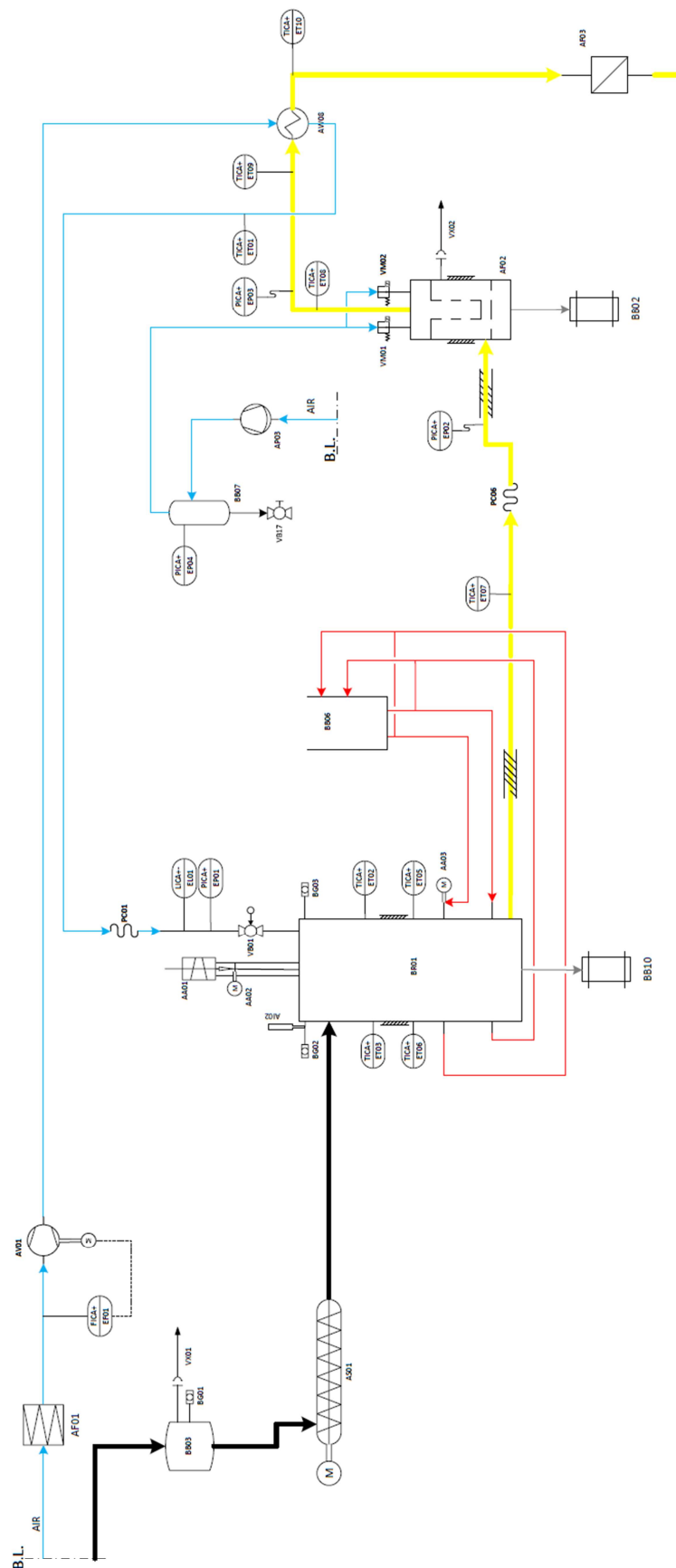


Abb. 4-5 Auszug aus dem R&I der Versuchsanlage X5 der Fa. MFC GmbH [4]

5 Kurzbeschreibung der Messtechnik

Hinsichtlich der für die Versuche eingesetzten Messtechnik wurde zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung ein Mikro-Gaschromatograph (μ GC) der Fa. INRAG AG (I-Graph XSII) (vgl. Abb. 5-1) und zur Erfassung des Wassergehaltes im Produktgas ein Prallstrahlpsychrometer der Fa. Bartec AG (vgl. Abb. 5-2) eingesetzt.



Abb. 5-1 Mikro-Gaschromatograph mit vorgeschaltetem Messgaskühler zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung

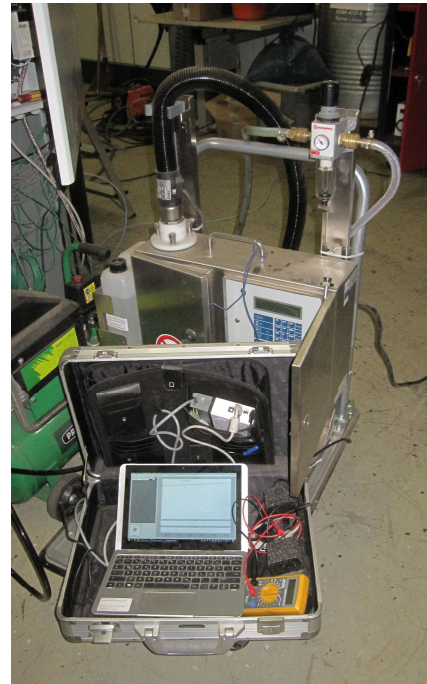


Abb. 5-2 Prallstrahlpsychrometer zur Erfassung des Wassergehaltes im Produktgas

Die Brennstoffmasse wurde manuell vor der jeweiligen Messfahrt abgewogen und dann dem Vorratsbehälter zugegeben, sodass über die Versuchszeit ein Brennstoffmassenstrom ermittelt werden konnte. Im Rahmen des Langzeitversuches wurde der Vorratsbehälter wiederholt während der Messfahrt mit zuvor abgewogenem Brennstoff befüllt.

Einen Überblick der identifizierten Stoffströme und deren für eine Bewertung erfassten Eigenschaften zeigt Tab. 5-1. Die hierfür zur Verfügung stehenden Mess- und Probenahmestellen sind in Abb. 5-3 ersichtlich.

Tab. 5-1 Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme

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

Zu beachten ist, dass der Produktgasmassenstrom nicht messtechnisch erfasst werden konnte und folglich bilanzschließend berechnet wurde. Die Installation einer direkten Volumenstrommessung war im Rahmen dieser Versuche wegen fehlenden Einbauraumes (Berücksichtigung von Ein- und Auslaufstrecken etc.) nicht möglich.

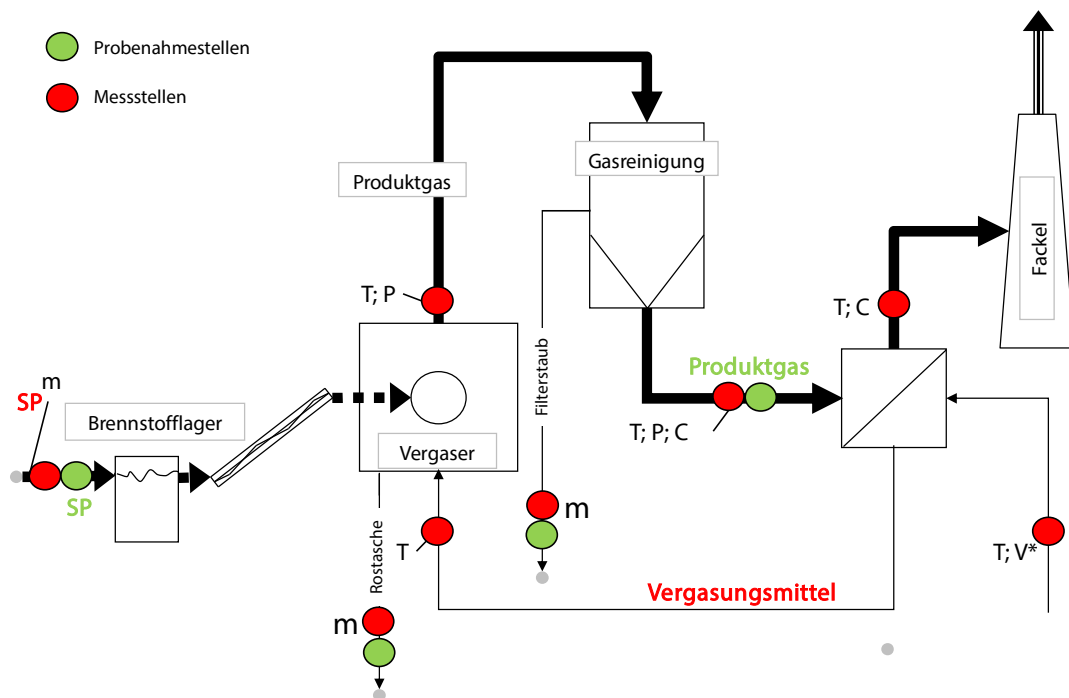


Abb. 5-3 Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF

Die Messstelle für die Zusammensetzung des Produktgases ist in der folgenden Abb. 5-4 und die Messstelle zur Erfassung des Wassergehaltes im Produktgas ist in Abb. 5-5 dargestellt. In den Abb. 5-6 und Abb. 5-7 sind die Sammelbehälter für Rostasche und Filterstaub abgebildet und die Art und Weise der Rostascheprobeentnahme nach der jeweiligen MF wird in Abb. 5-8 dargestellt.

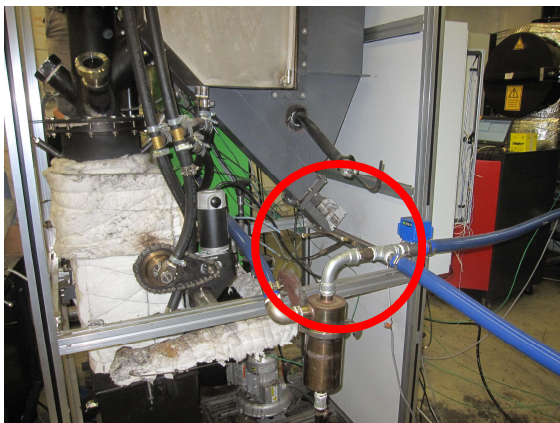


Abb. 5-4 Darstellung der Messstelle (nach Notfilter) zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung



Abb. 5-5 Darstellung der Messstelle zur Erfassung des Produktgas-Wassergehaltes



Abb. 5-6 Nach der MF deinstallierter Filterstaubbehälter zur Abwägung und Probenahme des Filterstaubes



Abb. 5-7 Nach der MF deinstallierter Rostaschesammelbehälter zur Abwägung der Rostasche



Abb. 5-8 Nach der MF Probenahme der Rostasche bei laufendem Rost

Zur Information und für die Lesbarkeit der im Bericht nachfolgenden Diagramme sind in der Tab. 5-2 alle für die Auswertung wesentlichen Messstellen mit deren Bezeichnung und dem Messwert des Auswertungszeitraum der MF MFC Lang aufgeführt. Darüber hinaus wurden auch der Reaktorfüllstand und die Aktivitäten von Poker und Rost aufgezeichnet.

Tab. 5-2 Messstellenübersicht mit Bezeichnung und Beispielmesswert

Messstellenbeschreibung	Bezeichnung MFC	Bezeichnung HSZG	Bsp.-messwert MFC Lang
Volumenstrom Vergasungsmittel	EF01	F1201	8,97 m³/h (i.N.)
Temperatur Vergasungsmittel, Reaktoreintritt	ET01	T1201	70,69 °C
Temperatur Reaktor, oben vorn	ET02	T1101	638,15 °C
Temperatur Reaktor, oben hinten	ET03	T1102	671,46 °C
Temperatur Reaktor, unten vorn	ET04	T1103	835,08 °C
Temperatur Reaktor, unten hinten	ET05	T1104	825,68 °C
Temperatur Produktgas, Reaktoraustritt	ET06	T1105	431,98 °C
Temperatur Produktgas, Filteraustritt	ET07	T1106	211,33 °C
Temperatur Produktgas, WÜ-Eintritt	ET08	T1107	n.b.
Temperatur Produktgas, WÜ-Austritt	ET09	T1108	102,73 °C
Absolutdruck Vergaser	EP01	P1101	37,16 mbar
Absolutdruck Vergaser, Gasaustritt	EP02	P1102	33,71 mbar
Absolutdruck Filter, Gasaustritt	EP03	P1103	15,05 mbar
Absolutdruck Filter, Pulsationstank	EP04	P1104	2118,71 mbar
Differenzdruck Vergaser*		P1105	27,10 mbar
Differenzdruck Filter*		P1106	18,62 mbar

*aus Messwerten berechnet

6 Beschreibung der Messfahrten

6.1 Allgemeines Vorgehen

Zur Protokollierung des Versuches wurden alle aktuellen Messdaten (Volumenstrom, Temperaturen, Absolutdrücke, Produktgasanalyse etc.) erfasst und in einer Versuchsdatenbank gespeichert. Für die Versuchsauswertung wurden nur die Daten während des stationären Anlagen- und Prozesszustandes verwendet.

Außerdem wurden evtl. aufgetretene Anlagenstörungen, durchgeführte Probenahmen u.ä. im Logbuch protokolliert. Vor den Versuchsfahrten wurden mehrere Brennstoffproben direkt aus der Gesamtbrennstoffmasse entnommen, um anschließend diese im Brennstofflabor zu analysieren.

6.2 Übersicht Messfahrten und Parameterauswahl

Zur Übersicht sind in folgender Tab. 6-1 die durchgeführten Messfahrten mit Gesamtversuchsdauer und den jeweiligen Auswertungszeiträumen (stationärer Zustand) dargestellt.

Tab. 6-1 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

Datum	Bezeichnung	Startzeit	Endzeit	Versuchs- dauer Gesamt	Auswertungs- zeitraum
<i>Einheit</i>		<i>h:min</i>	<i>h:min</i>	<i>h</i>	<i>h</i>
11.06.20	MFC-MF6	09:00	17:07	07,83	02,12
12.06.20	MFC-MF7	09:00	15:59	06,98	02,83
17.06.20	MFC-MF8	08:57	15:27	06,50	02,83
18.06.20	MFC-MF9	08:56	17:01	07,92	03,33
19.06.20	MFC-MF10	08:45	16:08	07,38	02,50
22.06.20	MFC-MF11	08:57	15:22	06,42	02,67
16.07.20	MFC-MF12	09:19	16:23	07,07	03,00
17.07.20	MFC-MF13	09:11	15:50	06,65	03,00
09.10.20	MFC-Lang	10:06	11:14	25,13	21,72

Als Ergebnis der Parametervariationen (Volumenstrom Vergasungsmittel V^*_L von 7,5; 8,5 oder 9,5 m³/h (i.N.); Füllhöhe des Festbettes im Reaktor h bei 27 oder 32 cm) wurde anhand der Erfahrungen und Ergebnisse der durchgeführten MF ein Parametersatz ausgewählt und für die Langzeitmessfahrt eingesetzt (vgl. Tab. 6-2). Dabei zeigte sich, dass bei einem Volumenstrom des Vergasungsmittels von 8,5 bis 9,5 m³/h (i.N.) und 32 cm Füllstand im Reaktor mit einem vergleichsweise stabilen Vergasungsverhalten und einer guten Umsetzungseffizienz zu rechnen war. Außerdem bezog sich die Einschätzung hierzu auf die Qualität des Produktgases (entspr. Heizwert) und die Anfallmengen von Rostasche und Filterstaub sowie deren Aschegehalt. Hierzu einordnend muss darauf hingewiesen werden, dass hinsichtlich der Umsetzungseffizienz der Strohpellets zum Produktgas zwischen den Parametervariationen nur sehr geringe Veränderungen auftraten. Für die Langzeitmessfahrt wurde der Parametersatz $V^*_L = 9 \text{ m}^3/\text{h}$ (i.N.) und $h = 32 \text{ cm}$ ausgewählt.

Tab. 6-2 Bewertung der Parametervariationen und Parameterauswahl für MF MFC-Lang

Bezeichnung	Vergasungsmittel Volumenstrom in m³/h (i.N.)	Füllhöhe Reaktor in cm	Einschätzung
MFC-MF6	7,5	32	qualitativ schlechteres Produktgas; O2 im Produktgas
MFC-MF7	8,5	32	keine Besonderheiten
MFC-MF8	9,5	32	großer Brennstoffmassenstrom; qualitativ gutes Produktgas
MFC-MF9	7,5	27	Geringer Brennstoffmassenstrom; sehr geringer Rostascheanfall; qualitativ schlechteres Produktgas; relativ hoher Wassergehalt im Produktgas
MFC-MF10	8,5	27	keine Besonderheiten
MFC-MF11	9,5	27	großer Brennstoffmassenstrom; vergleichsweise hoher CH4-Gehalt
MFC-MF12	9,5	27	starker Rostascheanfall; O2 im Produktgas
MFC-MF13	9,5	32	qualitativ gutes Produktgas; O2 im Produktgas
MFC-Lang	9,0	32	hoher Wassergehalt im Produktgas (Plausibilität prüfen);

7 Laboranalysen

7.1 Analysenmethoden zur Bestimmung

Das Lehlabor für Brennstoffanalytik an der HSZG verfügt über vielfältige Analysemöglichkeiten hinsichtlich der Brennstoffbewertung. Auf das Probenmaterial wurden folgende Analysemethoden angewendet. Zum einen wurden Kurzanalysen nach DIN 51718-51720 durchgeführt und der Brennwert der Brennstoffproben nach DIN 51900-1/-3 bestimmt.

Alle Analysedaten der jeweiligen Probe wurden bezüglich ihrer Abweichung zueinander nach den geltenden Normen (DIN 51734 und DIN ISO 5725-5) bewertet und nur die Daten ausgewertet, die hinsichtlich ihrer Abweichung zueinander die Präzisionsvorgaben erreichten.

7.1.1 Kurzanalyse bzw. Immediatanalyse

Zur Analyse wird ein Thermogravimetrisches Multianalysensystem TGA701 der Fa. LECO¹ verwendet. Es wird das Gewicht von Grundstoffen (hier im speziellen Fall: Wasser, flüchtige Bestandteile, fixer Kohlenstoff und Asche) in einem Stoffgemisch Brennstoff untersucht. Dazu wird der Gewichtsverlust der Proben in Abhängigkeit von der Ofentemperatur innerhalb einer kontrollierten Gasumgebung gemessen.

7.1.2 Brennwertbestimmung

Mittels eines Verbrennungskalorimeters der Fa. IKA² wird die Bestimmung des Brennwertes fester und flüssiger Brennstoffe vorgenommen. Dabei wird in einem geschlossenen Reaktionsgefäß (Aufschlussgefäß/kalorimetrische Bombe) der Brennstoff nach elektrischer Zündung mit überschüssigem Sauerstoff vollkommen und vollständig verbrannt. Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärmemenge erhöht die Temperatur eines Wasserbades, in dem sich das Reaktionsgefäß befindet. Diese Temperaturerhöhung ist ein direktes Maß für den Energiegehalt der verbrannten Substanz.

7.2 Probenmaterial

Als Standardbrennstoff wurden Strohpellets einer Charge verwendet. Die jeweilige Probenahme erfolgte manuell aus der Gesamtmasse des Brennstoffes vor Befüllung des Tagesbehälters in identischer Art und Weise vor jeder Messfahrt.

Die Probenahme der Rostasche erfolgte nach jeder Messfahrt bei laufendem Rost um sicherstellen zu können, dass die jeweilige Rostascheprobe repräsentativ für die durchgeführte Messfahrt ist (vgl. Abb. 5-8). Anschließend wurden die Rostascheproben in einer Laborkohlemühle bis zu einer Korngröße von 60 bis 80 µm fein aufgemahlen, um eine bessere Homogenität der Probenmassen für die Laboranalysen zu erreichen.

Die Proben des Filterstaubes wurden nach jeder Messfahrt und nach Abkühlung der Anlagenkomponenten in jeweils identischer Art und Weise aus dem Sammelbehälter nach dessen Wägung entnommen.

¹ <http://de.leco-europe.com/product/tga701/>

² <http://www.ika.de/>

7.3 Ergebnisse der Laboranalysen

Die Ergebnisse der Kurz- und Brennwertanalyse der eingesetzten Brennstoffe und der Rostasche- bzw. Filterstaubproben sind nachfolgend im analysenfeuchten Zustand in Tab. 7-1 zusammengestellt.

Tab. 7-1 Laboranalysergebnisse der Brennstoff- und Reststoffproben der jeweiligen MF

Bezeichnung	Einheit	MFC-MF6	MFC-MF7	MFC-MF8	MFC-MF9	MFC-MF10	MFC-MF11	MFC-MF12	MFC-MF13	MFC-MFLang
Strohpellets										
Analysenfeuchtigkeit	Ma. %	8,38	8,38	8,31	8,35	8,48	8,51	8,61	8,62	8,53
Flüchtige Bestandteile	Ma. %	72,7	74,0	73,8	74,9	73,7	73,9	72,8	72,6	74,7
Fixer Kohlenstoff	Ma. %	14,5	13,4	13,8	12,6	13,5	13,6	13,8	13,9	13,6
Aschegehalt	Ma. %	4,42	4,20	4,11	4,19	4,34	3,99	4,82	4,84	3,22
Brennwert	MJ/kg	17,21	17,29	17,23	17,30	17,24	17,27	17,15	17,13	17,44
Rostasche										
Analysenfeuchtigkeit	Ma. %	1,23	1,20	0,90	0,76	0,66	0,44	0,40	0,63	1,70
Flüchtige Bestandteile	Ma. %	7,5	7,7	6,5	6,3	4,8	5,6	4,3	5,7	7,3
Fixer Kohlenstoff	Ma. %	27,6	24,3	20,4	18,0	9,4	8,3	3,1	2,9	18,6
Aschegehalt	Ma. %	63,65	66,80	72,18	74,94	85,19	85,67	92,23	90,76	72,40
Brennwert	MJ/kg	12,45	10,37	8,63	8,10	4,17	5,22	2,22	2,69	8,12
Filterstaub										
Analysenfeuchtigkeit	Ma. %	5,19	5,96	4,37	5,72	6,06	6,58	3,73	3,66	7,65
Flüchtige Bestandteile	Ma. %	11,7	11,5	11,9	11,0	11,4	9,8	10,8	9,4	14,5
Fixer Kohlenstoff	Ma. %	36,9	37,0	35,7	40,4	35,2	34,7	18,2	26,8	26,8
Aschegehalt	Ma. %	46,17	45,54	48,01	42,92	47,38	48,96	67,28	60,14	51,02
Brennwert	MJ/kg	14,65	14,95	14,67	15,60	14,01	13,86	9,28	11,14	11,82

Um die Ergebnisse der Immediatanalyse und insbesondere die hohen Aschegehalte (respektive die geringen C-fix-Werte) zu verifizieren, wurden die Proben der Rostasche zusätzlich in einem Muffelofen verascht. Der nachträgliche Vergleich der ermittelten Aschegehalte zwischen den beiden Bestimmungsmethoden ergab nur geringe Abweichungen des Aschegehaltes von absolut 0,5 bis 3,3 Ma.-%, was wiederum eine relative Abweichung von 0,7 bis 4 % bedeutet und somit auf eine gute Übereinstimmung der Analysergebnisse hinweist.

Die Elementaranalyse der eingesetzten Strohpellets ergab die in Tab. 7-2 dargestellten, auf die Trockensubstanz (TS) bezogenen Massenprozente der Elemente N/C/H/S. Der Anteil des Elementes O wurde rechnerisch aus der Summe der analysierten Elemente und der Asche ermittelt.

Tab. 7-2 Elementaranalysergebnis der Brennstoffproben

Brennstoffart	N Ma.-% TS	C Ma.-% TS	H Ma.-% TS	S Ma.-% TS	O_rechn Ma.-% TS	A Ma.-% TS
Strohpellets	0,26	47,33	6,72	0,07	40,5	4,52

Zu beachten ist, dass keine Elementaranalyse der Rostasche- und Filterstaubproben durchgeführt wurde, sondern diese nur hinsichtlich ihrer Zusammensetzung in der Immediatanalyse und hinsichtlich Brennwert in der Brennwertbestimmung untersucht wurden. Mit Hilfe der in der Immediatanalyse ermittelten C-fix-Werte und unter Berücksichtigung vorhandener Korrelationsuntersuchungen zwischen C-fix-Werten und Elementaranalysen vergleichbarer Filterstaubproben erfolgte eine Abschätzung der C/H/N/S-Anteile in den Rostasche- und Filterstaubproben. Die O-Anteile wurden unter Berücksichtigung des Aschegehaltes wiederum als Differenz zu 100 % berechnet.

8 Auswertung der Messfahrten

Zur Bewertung der Strohvergasung mit dem Vergasungsprototyp wurden Messfahrten zur Variation der wesentlichen Prozessparameter (Volumenstrom Vergasungsmittel und Füllstand im Reaktor) durchgeführt. Bei der Auswertung wurde primär auf die Vergasungsparameter und die mit dem Vergasungsreaktor in Verbindung stehenden Stoffströme geachtet und diese Messdaten untereinander verglichen. Abschließend wurde mit ausgewählten Prozessparametern eine Langzeitmessfahrt >24 Betriebsstunden durchgeführt.

Um den Verlauf einer MF zu charakterisieren, ist in Abb. 8-1 der zeitliche Verlauf der im Rahmen von MFC-Lang (Langzeit-MF) erfassten Produktgaszusammensetzung dargestellt. Außerdem wurden im Diagramm die Zeiträume der Datenauswertung grafisch gekennzeichnet. Die im Diagramm erkennbare kurze Störung gegen 03:20 Uhr resultierte aufgrund der manuellen Brennstoffnachfüllung und der damit einhergehenden kurzen Abschaltung der Anlage.

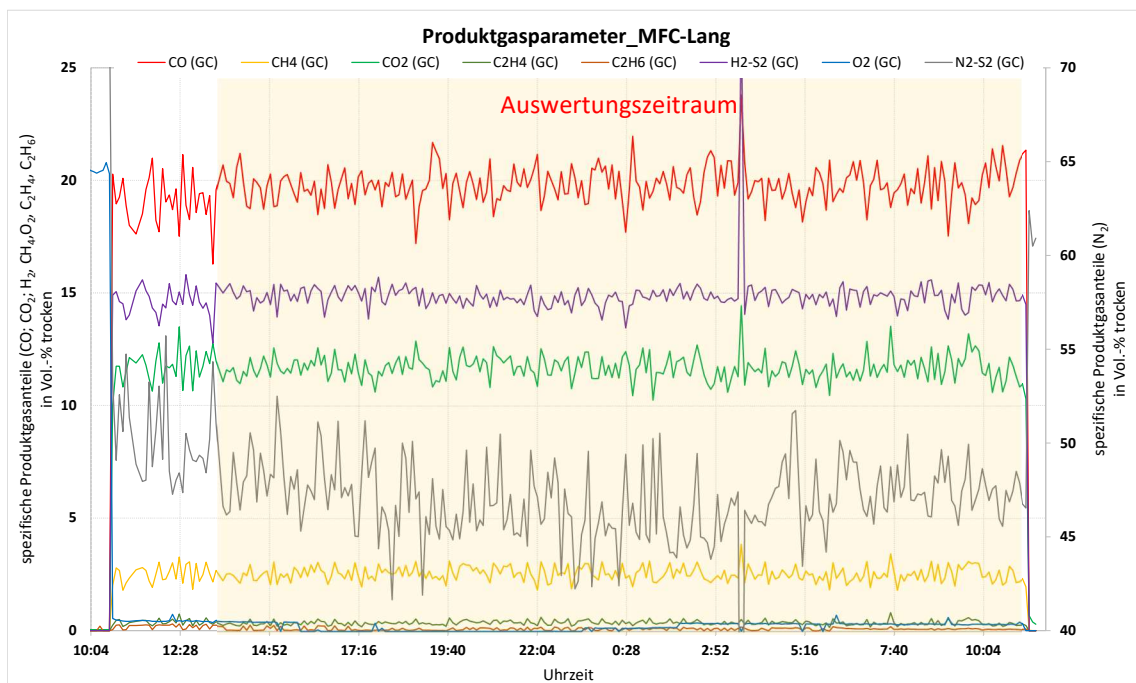


Abb. 8-1 Produktgaszusammensetzung während MF MFC-Lang

8.1 Stoffströme

In den folgenden Kapiteln sind die für den Auswertungszeitraum gemittelten Messwerte der erfassten Stoffströme aufgeführt.

8.1.1 Brennstoff

Wie in Tab. 8-1 ersichtlich, wurde bei Verwendung der Strohpellets ein Brennstoffbedarf von ca. 5,1 bis 6,2 kg/h erfasst, wobei der Wassergehalt nahezu konstant 8,5 Ma.-% betrug. Die eingesetzten Strohpellets wurden vor der MF abgewogen und dann manuell in den Vorratsbehälter gefüllt. Maßgebliche Einflussfaktoren auf den Brennstoffmassenstrom waren die Variationsparameter (Volumenstrom Vergasungsmittel, Füllhöhe Reaktor), was wiederum auch an den Beschreibungen der einzelnen MF in Tab. 6-2 erkennbar ist.

Tab. 8-1 Brennstoffcharakteristika bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang

Datum	Bezeichnung	Versuchsdauer Gesamt	Brennstoffbedarf	Wassergehalt	Heizwert	chem. Brennstoffleistung
<i>Einheit</i>		<i>h</i>	<i>kg/h</i>	<i>Ma.-%</i>	<i>MJ/kg</i>	<i>kW</i>
11.06.20	MFC-MF6	07,83	5,11	8,4	15,65	22,35
12.06.20	MFC-MF7	06,98	5,73	8,4	15,72	25,18
17.06.20	MFC-MF8	06,50	6,15	8,3	15,65	26,93
18.06.20	MFC-MF9	07,92	5,05	8,4	15,73	22,23
19.06.20	MFC-MF10	07,38	5,42	8,5	15,68	23,75
22.06.20	MFC-MF11	06,42	6,23	8,5	15,70	27,36
16.07.20	MFC-MF12	07,07	5,66	8,6	15,59	24,67
17.07.20	MFC-MF13	06,65	6,02	8,6	15,57	26,18
09.10.20	MFC-Lang	25,13	5,89	8,5	15,86	25,95

8.1.2 Vergasungsmittel Luft / Produktgas

Die Volumenströme des zugeführten Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Der jeweilige Volumenstrom des Vergasungsmittels wurde im Rahmen der Variationsplanung für die MF festgelegt und variierte zwischen 7,5 und 9,5 m³/h (i.N.). Die resultierenden Volumen- und Massenströme der Luft sind zur Übersicht in Tab. 8-2 aufgeführt. Anhand der erfassten Zusammensetzung und der Massenströme des Brennstoffes und des Vergasungsmittels Luft konnte darüber hinaus die ebenfalls in Tab. 8-2 für die jeweilige MF aufgeführte Luftzahl der Vergasung berechnet werden.

Tab. 8-2 Vergasungsmittelcharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	Volumenstrom Vergasungsmittel	Massenstrom Vergasungsmittel	Luftzahl
<i>Einheit</i>		<i>m³/h (i.N.)</i>	<i>kg/h</i>	
11.06.20	MFC-MF6	7,50	9,65	0,35
12.06.20	MFC-MF7	8,50	10,94	0,34
17.06.20	MFC-MF8	9,49	12,21	0,35
18.06.20	MFC-MF9	7,48	9,63	0,34
19.06.20	MFC-MF10	8,48	10,92	0,36
22.06.20	MFC-MF11	9,51	12,24	0,35
16.07.20	MFC-MF12	9,51	12,24	0,38
17.07.20	MFC-MF13	9,49	12,21	0,36
09.10.20	MFC-Lang	8,97	11,55	0,35

In Tab. 8-3 werden die ermittelten Produktgasanteile (in Vol.-%, feucht) als Mittelwerte für den jeweiligen Auswertungszeitraum dargestellt. Erkennbar sind die nur geringen Unterschiede der Produktgaszusammensetzung zwischen den einzelnen Parametervariationen. Eine mögliche Ursache für den vergleichsweise hohen Wassergehalt während MFC-Lang ist in Kapitel 8.3 beschrieben.

Anhand der ermittelten Zusammensetzung des Produktgases wurde für jede MF der Stickstoff (N₂) - Anteil als Differenz zu 100 Vol.-% berechnet. Hiermit konnte nun bei Berücksichtigung des Produktgasmassenstromes für die Stoffstrombilanz (vgl. Kapitel 9) der jeweiligen MF ein N - Anteil im Gasstrom ermittelt werden.

Tab. 8-3 Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	O ₂	H ₂ O
Einheit		Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-%
11.06.20	MFC-MF6	17,1	12,8	2,2	0,3	0,03	10,9	0,00	10,9
12.06.20	MFC-MF7	17,3	12,9	2,2	0,3	0,02	10,8	0,01	11,3
17.06.20	MFC-MF8	17,5	12,9	2,2	0,3	0,07	10,7	0,19	10,9
18.06.20	MFC-MF9	16,8	12,3	2,2	0,3	0,03	11,2	0,02	11,5
19.06.20	MFC-MF10	17,2	12,2	2,2	0,3	0,02	11,0	0,06	11,4
22.06.20	MFC-MF11	17,4	12,0	2,3	0,4	0,04	10,8	0,11	11,4
16.07.20	MFC-MF12	17,2	12,4	1,8	0,2	0,00	10,6	0,37	10,5
17.07.20	MFC-MF13	17,5	12,8	2,1	0,3	0,02	10,6	0,39	10,5
09.10.20	MFC-Lang	17,3	13,0	2,2	0,3	0,09	10,2	0,17	12,7

Die in Tab. 8-3 aufgeführten Produktgaszusammensetzungen sind für eine bessere Anschaulichkeit und Vergleichbarkeit noch einmal grafisch in Abb. 8-2 abgebildet.

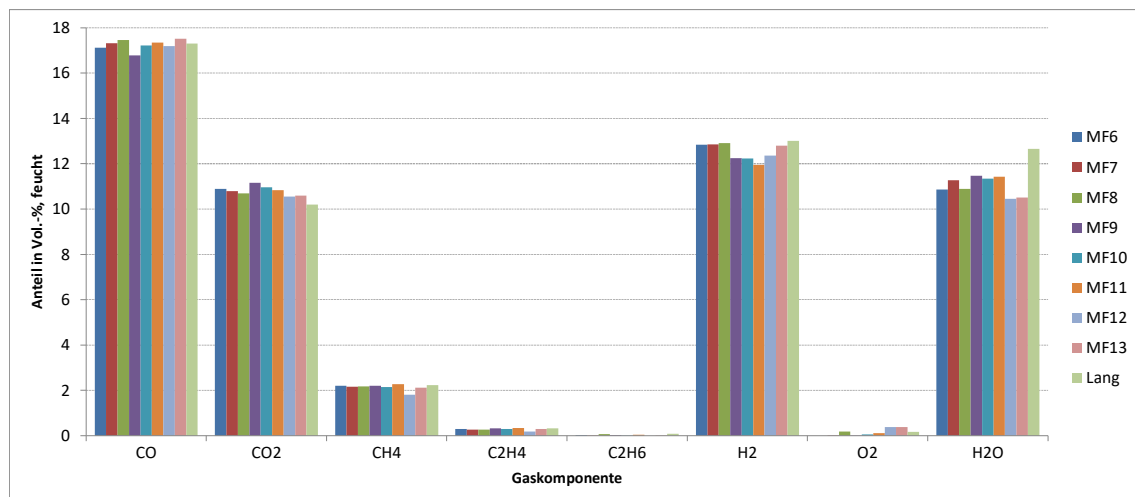


Abb. 8-2 Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Aufgrund der zuvor dargestellten Änderungen der Produktgaszusammensetzung ergaben sich beim Vergleich der Produktgasqualität geringe Unterschiede des Heizwertes (vgl. Tab. 8-4). Der Heizwert des Produktgases variierte zwischen 3,8 bei MF12 und 4,2 MJ/kg bei MF MFC-Lang bzw. 4,5 und 4,9 MJ/m³ (i.N.).

Außerdem wurde über Massenbilanzausgleichsrechnungen der Massenstrom des Produktgases berechnet. Dieser resultiert bilanzschließend aus Summe von zugeführter Luft- und Brennstoffmasse korrigiert mit Rostasche- und Filterstaubmasse. Durch die Erfassung der Zusammensetzung und die Berechnung des Massenstromes des Produktgases wurde die Produktgasleistung (entspricht dem chemischen Produktgasenergiestrom) berechnet und diese für die Versuchsphasen der jeweiligen Messfahrten in Tab. 8-4 miteinander verglichen. Aufgrund der nur geringen Unterschiede der Produktgasqualität (Heizwert) resultiert das unterschiedliche Niveau der Produktgasleistung entsprechend dem berechneten Produktgasmassenstrom und ist damit wiederum maßgeblich vom Massenstrom des Vergasungsmittels Luft abhängig.

Tab. 8-4 Produktgascharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	Heizwert Produktgas		Massenstrom Produktgas	Chem. Produktgasleistung
<i>Einheit</i>		<i>MJ/m³ (i.N.)</i>	<i>MJ/kg</i>	<i>kg/h</i>	<i>kW</i>
11.06.20	MFC-MF6	4,78	4,05	14,39	16,01
12.06.20	MFC-MF7	4,78	4,05	16,30	18,37
17.06.20	MFC-MF8	4,84	4,10	18,03	20,54
18.06.20	MFC-MF9	4,67	3,94	14,43	15,72
19.06.20	MFC-MF10	4,70	3,97	16,04	17,68
22.06.20	MFC-MF11	4,76	4,02	18,18	20,31
16.07.20	MFC-MF12	4,51	3,79	17,48	18,41
17.07.20	MFC-MF13	4,80	4,06	17,89	20,17
09.10.20	MFC-Lang	4,93	4,20	17,16	20,03

Die zur weiteren Information und Auswertung erfassten Absolutdrücke in der Gasleitung zwischen Reaktor und Fackel sowie die Reaktortemperaturen sind für die MF MFC-Lang in dem Kapitel 8.3 in Diagrammform grafisch dargestellt. Auf eine Gegenüberstellung und Vergleich dieser Messdaten für alle MF wurde in diesem Forschungsbericht verzichtet.

8.1.3 Rostasche und Filterstaub

Wie in Tab. 8-5 ersichtlich, wurde im Anschluss an die Messfahrten eine Rostaschemassenstrom von 0,21 bis 0,39 kg/h und ein Filterstaubmassenstrom von 0,04 bis 0,06 kg/h berechnet. Diese ermittelten Masseströme beziehen sich auf die Gesamtdauer der jeweiligen Messfahrt und nicht ausschließlich auf den Auswertungszeitraum. Die manuelle Abwägung der entsprechenden Auffangbehälter erfolgte immer im Anschluss an die jeweilige Messfahrt.

Hinsichtlich des Filterstaubanfalles sind ein relativ konstanter Filterstaubanfall über die MF auch unabhängig von der Parametervariation festzustellen. Der Rostascheanfall hingegen ist durch eine größere Diversität der Anfallmenge gekennzeichnet. Die Ursache hierfür wurde im Rahmen dieser Versuche nicht ermittelt. Dies sollte in weiterführenden Untersuchungen und Langzeitmessfahrten geklärt werden.

Tab. 8-5 Massenströme von Rostasche und Filterstaub bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang

Datum	Bezeichnung	Versuchsdauer Gesamt	Rostasche	Filterstaub
<i>Einheit</i>		<i>h</i>	<i>kg/h</i>	<i>kg/h</i>
11.06.20	MFC-MF6	07,83	0,31	0,06
12.06.20	MFC-MF7	06,98	0,32	0,05
17.06.20	MFC-MF8	06,50	0,29	0,05
18.06.20	MFC-MF9	07,92	0,21	0,04
19.06.20	MFC-MF10	07,38	0,25	0,04
22.06.20	MFC-MF11	06,42	0,26	0,04
16.07.20	MFC-MF12	07,07	0,39	0,04
17.07.20	MFC-MF13	06,65	0,30	0,04
09.10.20	MFC-Lang	25,13	0,24	0,04

8.1.4 Zusammenfassung der Mess- und Berechnungsdaten

Die zuvor beschriebenen Mess- und Berechnungsdaten der jeweiligen Auswertungszeiträume sind zusammengefasst in Tab. 8-6 und Tab. 8-7 aufgeführt.

Tab. 8-6 Übersicht der Mess- und Berechnungsdaten, Teil 1

Datum	Bezeichnung	Massenstrom Vergasungsmittel	Chem. Brennstoffleistung	Luftzahl	Heizwert Produktgas	Chem. Produktgas-	Massenstrom Rostasche	Kohlenstoffanteil Rostasche	Massenstrom Filterstaub	Kohlenstoffanteil Filterstaub
Einheit		kg/h	kW		MJ/kg	kW	kg/h	Ma.-%	kg/h	Ma.-%
11.06.20	MFC-MF6	9,65	22,35	0,35	4,05	16,01	0,31	31,88	0,06	44,44
12.06.20	MFC-MF7	10,94	25,18	0,34	4,05	18,37	0,32	28,11	0,05	44,9
17.06.20	MFC-MF8	12,21	26,93	0,35	4,10	20,54	0,29	23,54	0,05	42,62
18.06.20	MFC-MF9	9,63	22,23	0,34	3,94	15,72	0,21	20,68	0,04	49,01
19.06.20	MFC-MF10	10,92	23,75	0,36	3,97	17,68	0,25	10,85	0,04	42,85
22.06.20	MFC-MF11	12,24	27,36	0,35	4,02	20,31	0,26	9,48	0,04	42,39
16.07.20	MFC-MF12	12,24	24,67	0,38	3,79	18,41	0,39	3,54	0,04	21,59
17.07.20	MFC-MF13	12,21	26,18	0,36	4,06	20,17	0,30	3,31	0,04	31,76
09.10.20	MFC-Lang	11,55	25,95	0,35	4,20	20,03	0,24	21,59	0,04	33,13

Tab. 8-7 Übersicht der Mess- und Berechnungsdaten, Teil 2

Datum	Bezeichnung	Füllstand Reaktor	Auswertungs- zeitraum	Temperatur Vergasungsmittel Reaktoreintritt	Temperatur Produktgas Reaktoraustritt
Einheit		cm	h	°C	°C
11.06.20	MFC-MF6	32	2,12	67,4	370,2
12.06.20	MFC-MF7	32	2,83	76,2	408,9
17.06.20	MFC-MF8	32	2,83	80,0	421,9
18.06.20	MFC-MF9	27	3,33	67,1	386,8
19.06.20	MFC-MF10	27	2,5	72,7	419,6
22.06.20	MFC-MF11	27	2,67	86,2	449,2
16.07.20	MFC-MF12	27	3,0	80,2	454,0
17.07.20	MFC-MF13	32	3,0	79,2	441,2
09.10.20	MFC-Lang	32	21,72	70,7	432,0

8.2 Störungen

Während der ausgewerteten und hier dargestellten Messfahrten traten keine Störungen auf, die eine maßgebliche Auswirkung auf den Betrieb der Anlage hatten.

Die Variationen der Parameter Volumenstrom Luft und Füllstand Reaktor hatten zwar Auswirkungen sowohl auf die Qualität bzw. Quantität der ein- und austretenden Stoffströme als auch auf die Reaktionsbedingungen im Reaktor (z.B. Temperaturen), führten aber zu keiner Störung, die einen Abbruch der Variationsmessfahrt erforderlich gemacht hätte.

Nach Beendigung der jeweiligen Messfahrt wurde immer die sich gebildete Schlackeschicht manuell mit Poker und Rost beseitigt, um ein Aushärten dieser mit dann

entsprechender Beeinflussung des nächsten Anlagenstarts zu verhindern (vgl. Kapitel 10).

8.3 Anlagenfahrweise

Um die Anlagenfahrweise beispielhaft zu dokumentieren, sind im folgenden Diagramme zur Beschreibung der maßgeblichen Stoffströme über die Laufzeit der MF MFC-Lang aufgeführt.

In Abb. 8-3 ist der Wassergehalt im Produktgas während des Messfahrtverlaufes dargestellt. Es ist erkennbar, dass dieser im Verlauf der MF bis zu einem vergleichsweise hohen Wert steigt, was durch gebildetes Kondensat an der Messstelle (vgl. Abb. 5-5) hervorgerufen sein könnte und somit nicht den realen Wassergehalt kennzeichnet. Typische Werte des Wassergehaltes bei den vorangegangenen MF zur Parametervariation waren ca. 10,5 bis 11,5 Vol.-%.

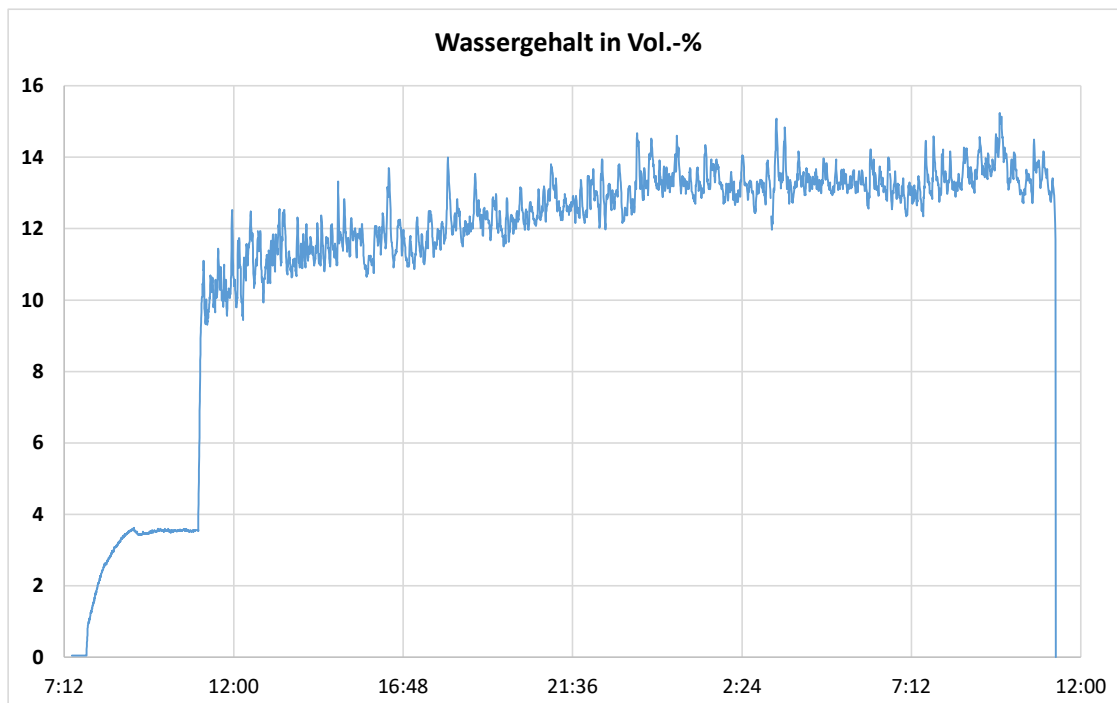


Abb. 8-3 Verlauf des Wassergehaltes im Produktgas, MF MFC-Lang

Die weiteren erfassten Bestandteile des Produktgases und der Verlauf dieser Zusammensetzung während MF MFC-Lang ist in Abb. 8-4 aufgeführt. Hierbei ist vor allem erkennbar, dass keine großen Änderungen der Zusammensetzung aufgetreten sind, was auf einen stabilen Anlagenbetrieb hindeutet. Einzig die kurze Abschaltung der Anlage zur Befüllung des Brennstoffvorratsbehälters um ca. 03:20 Uhr ist mit einer kurzen Änderung der Gasqualität verbunden und im Diagramm erkennbar.

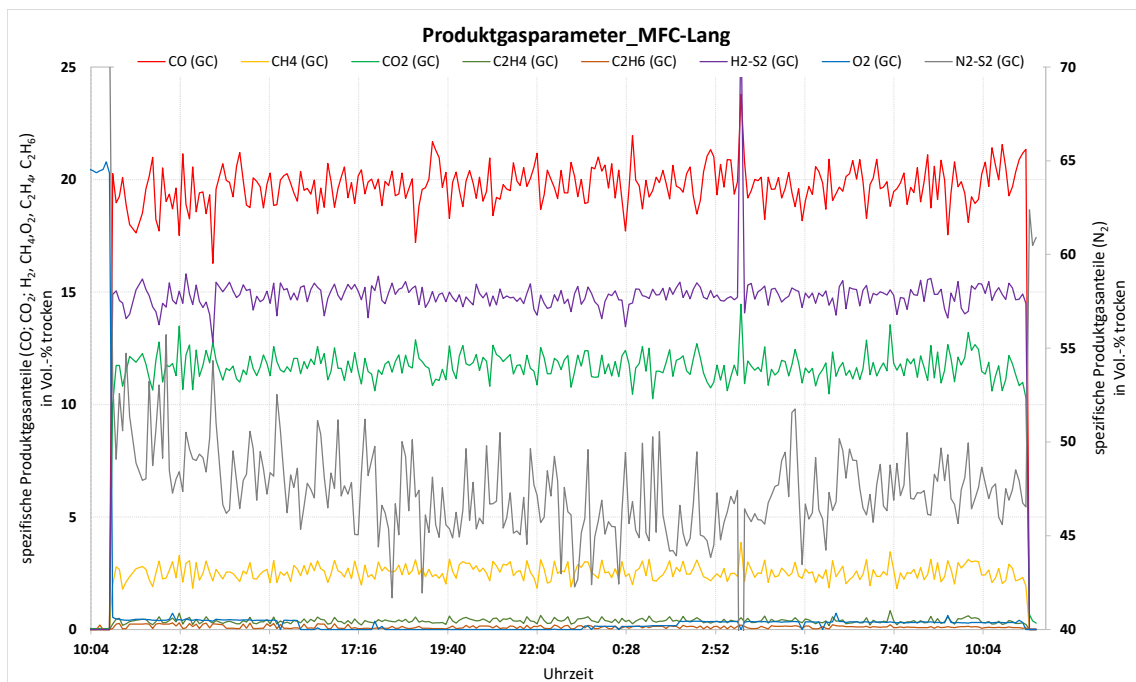


Abb. 8-4 Verlauf der Produktgaszusammensetzung, MF MFC-Lang

Ähnlich wie beim Verlauf der Produktgaszusammensetzung sind auch beim Verlauf der Temperaturen vom Vergasungsmittel Luft (T1201 (Reaktoreintritt)) und dem Produktgas (T1105 (Reaktorausritt)) bis T1108 (WÜ-Austritt)) in Abb. 8-5 keine maßgeblichen Änderungen erkennbar. Die T1107 beschreibt die Temperatur der Umgebung, da an dieser Messstelle während MFC-Lang die Entnahmesonde der Wassergehaltsanalyse installiert war. Wiederum sind die Zeitpunkte der Befüllung des Brennstoffbehälters (ca. 19:30 Uhr und 03:20 Uhr) durch einen kurzen Temperaturabfall aufgrund der manuellen Anlagenabschaltung für den Zeitraum der Befüllung gekennzeichnet.

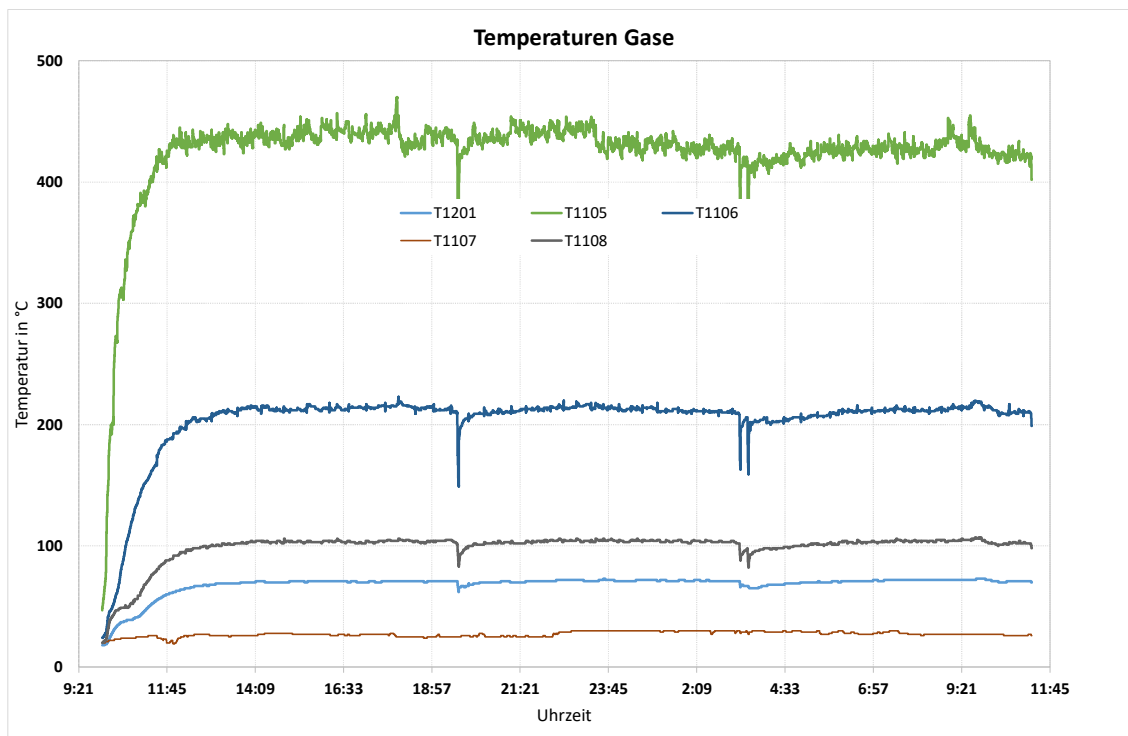


Abb. 8-5 Verlauf der Gastemperaturen (Luft, Produktgas), MF MFC-Lang

In Abb. 8-6 ist der Verlauf der gemessenen Reaktortemperaturen während der MF MFC-Lang abgebildet. Die T1101 und T1102 beschreiben dabei die Wandtemperaturen im oberen Bereich des Reaktors, wohingegen die T1103 und T1104 die Wandtemperaturen im unteren Bereich des Reaktors kennzeichnen. Der unstete Verlauf v.a. der Temperaturen im oberen Bereich wird durch die Aktivität des Pokers hervorgerufen, der das Festbett in zyklischen Abständen durchsticht und dabei kurzzeitig im Bereich der Messstellen zu einer Temperaturänderung führt.

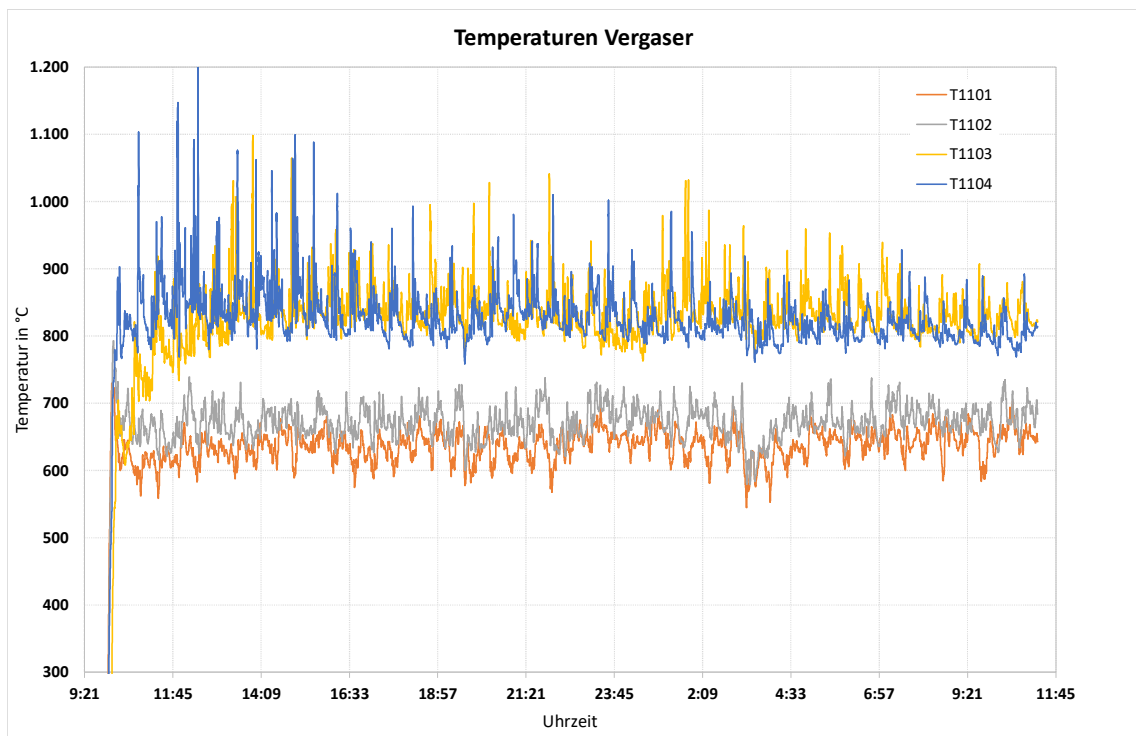


Abb. 8-6 Verlauf der Reaktortemperaturen, MF MFC-Lang

Die erfassten Absolutdrücke und daraus berechneten Differenzdrücke in der Produktgasleitung zwischen Reaktor (P1101 und P1102) und Gasfilter (P1103 und P1104) sind für MFC-Lang in Abb. 8-7 enthalten. P1105 stellt dabei den Differenzdruck über den Reaktor und P1106 den Differenzdruck über den Filter dar. Erkennbar ist dabei das zyklische Abreinen des Gasfilters durch die kurzen Pulsationsstöße.

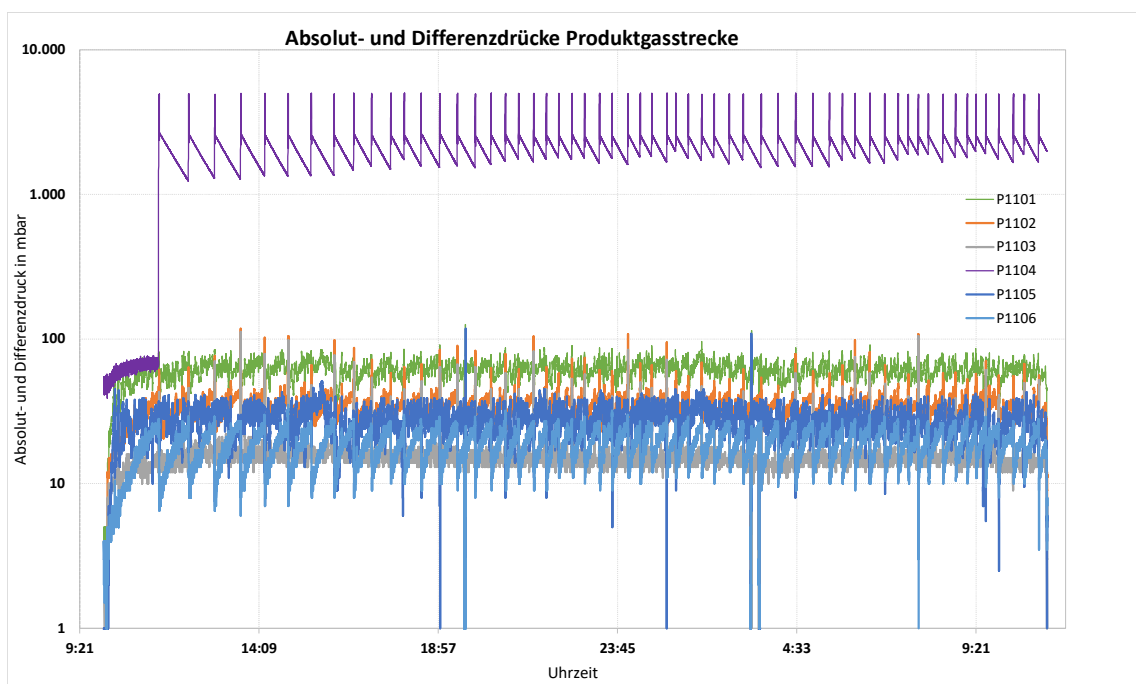


Abb. 8-7 Verlauf der Absolut- und Differenzdrücke in der Produktgasstrecke, MF MFC-Lang

9 Bilanzierung der Messfahrten

Für die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme wurden die Daten des stationären Zustandes des Langzeitversuches MFC-Lang vom 08. bis 09.10.2020 erfasst und diese über den gewählten Zeitraum von ca. 22 Stunden gemittelt. Es wurden, wie in Abb. 9-1 dargestellt, die jeweiligen Stoffmassenströme am Ein- und Austritt der Gesamtanlage (Vergaser mit Gasfilter) ermittelt. Die Berechnung des Massenstromes des Vergasungsmittels erfolgte über den gemessenen Volumenstrom und die Dichte im Normzustand. 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 bezogen, berechnet.

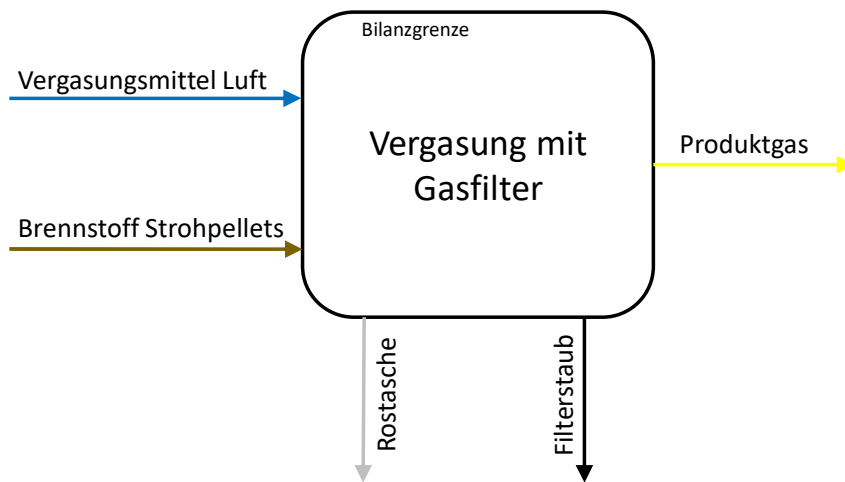


Abb. 9-1 Darstellung des Bilanzraumes zur Bilanzierung der Langzeitmessfahrt

In Tab. 9-1 sind die für eine Bilanzierung notwendigen stationären Messdaten, die daraus berechneten weiteren Versuchsparameter sowie die dem Versuch zuzuordnenden Ergebnisse der Laboranalysen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 9-1 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten der MF MFC-Lang für den stationären Auswertungszeitraum (ca. 22 h)

Parameter	Wert	Einheit	Datenherkunft
Brennstoff (Strohpellets)			
Massenstrom	5,89	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	15,86	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Wassergehalt	8,5	Ma.-%	Laboranalyse
Aschegehalt	3,2	Ma.-%	Laboranalyse
Vergasungsmittel (Luft)			
Volumenstrom	8,97	m ³ /h (i.N.)	Messung
Massenstrom	11,55	kg/h	Berechnung
Temperatur (Reaktoreintritt)	70,69	°C	Messung
Thermische Energie (Reaktoreintritt)	0,12	kW	Berechnung
Produktgas			
Massenstrom	17,16	kg/h	Berechnung
Temperatur (Reaktoraustritt)	431,98	°C	Messung
Thermische Energie (Reaktoraustritt)	2,53	kW	Berechnung
Zusammensetzung			
O ₂	0,20	Vol.-%, tr.	Messung
CO	19,82	Vol.-%, tr.	Messung
CO ₂	11,68	Vol.-%, tr.	Messung
CH ₄	2,55	Vol.-%, tr.	Messung
C ₂ H ₄	0,38	Vol.-%, tr.	Messung
C ₂ H ₆	0,10	Vol.-%, tr.	Messung
H ₂	14,90	Vol.-%, tr.	Messung
N ₂	50,38	Vol.-%, tr.	Berechnung
H ₂ O	12,66	Vol.-%	Messung
Heizwert	4,20	MJ/kg	Berechnung
Filterstaub			
Massenstrom	0,04	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	11,19	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Aschegehalt	55,25	Ma.-% TS	Laboranalyse
Rostasche			
Massenstrom	0,24	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	7,64	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Aschegehalt	73,65	Ma.-% TS	Laboranalyse

In Tab. 9-2 ist die Stoffstrombilanz um die Vergasungsanlage aufgestellt. Zu beachten ist dabei, dass der Produktgasmassenstrom bilanzschließend berechnet wurde und somit keine evtl. Abweichungen der Massenbilanz erfasst und bewertet werden können. Bezüglich der Abweichungen der Stoffstrombilanzen um die Gesamtanlage ist erkennbar, dass geringe Abweichungen der einzelnen Elementbilanzen von +4 bis -5 % aufgrund von Messungenauigkeiten auftreten. Hier sei darauf hingewiesen, dass die einzelnen Elementbilanzen sowohl von der bilanzschließenden Berechnung des Produktgasmassenstromes als auch von der Abschätzung der C/H/N/S-Anteile in Rostasche und Filterstaub maßgeblich beeinflusst werden (vgl. Kapitel 7.3).

Tab. 9-2 Daten der Stoffstrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum der MF MFC-Lang in kg/h

Gesamtprozess	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Rostasche*	Filterstaub*	Produktgas	Verluste	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Kohlenstoffbilanz	2,59	0,00	-0,05	-0,01	-2,55	0,00	-0,02	-1%
Wasserstoffbilanz	0,42	0,00	0,00	0,00	-0,43	0,00	-0,02	-4%
Sauerstoffbilanz	2,67	2,69	0,00	0,00	-5,63	0,00	-0,28	-5%
Stickstoffbilanz	0,01	8,86	0,00	0,00	-8,55	0,00	0,32	4%
Aschebilanz	0,19	0,00	-0,17	-0,02	0,00	0,00	0,00	-2%
Massenbilanz	5,89	11,55	-0,24	-0,04	-17,16	0,00	0,00	0%

*keine Elementaranalyse vorhanden, C/H/N/O-Anteile abgeschätzt

Die in Tab. 9-2 aufgeführten Daten für die Stoffstrombilanz sind im nachfolgenden Sankey-Diagramm der Abb. 9-2 noch einmal visuell veranschaulicht.

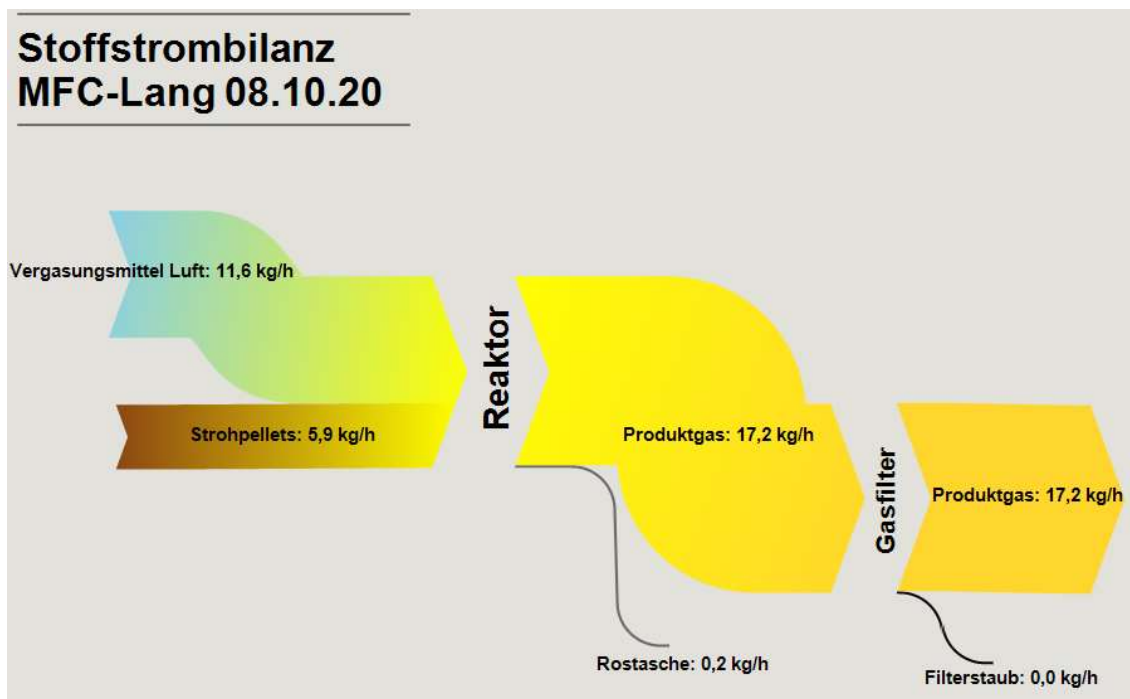


Abb. 9-2 Sankey-Diagramm der Stoffstrombilanz der MF MFC-Lang

In Tab. 9-3 ist die Energiestrombilanz um den Reaktor inkl. Gasfilter der Vergasungsanlage aufgestellt. Auch hier gilt wieder zu beachten, dass der Produktgasmassenstrom bilanzschließend berechnet wurde und dies sich somit auch auf die Produktgasleistung auswirkt. Bezüglich der Abweichung der Energiestrombilanz um die Gesamtanlage ist erkennbar, dass eine Abweichung der Energiebilanz von absolut 2,9 kW bzw. relativ 11% ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum eintretenden Energiestrom ein um 11% niedrigerer Energiestrom den Reaktor verlässt. Die Ursache hierfür kann an den nicht erfassten Oberflächenwärmeverlusten durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung liegen. Aufgrund der manuellen Abwiegung der Massen von Brennstoff, Rostasche und Filterstaub vor und nach der MF ist hierbei von einer geringeren Fehleranfälligkeit der entsprechenden Massenströme auszugehen. Hinsichtlich der Abweichung in der Energiestrombilanz müssen natürlich auch die

Ungenauigkeiten aufgrund der Probenahme und die Toleranzen der jeweiligen Laboranalysen (z.B. Brennwertbestimmung) berücksichtigt werden.

Tab. 9-3 Daten der Energiestrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum der MF MFC-Lang in kW

Gesamtprozess	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Rostasche	Filterstaub	Produktgas	Verluste	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Chemische Energie	25,95	0,00	-0,50	-0,13	-20,03	0,00		
Thermische Energie	0,00	0,12	0,00	0,00	-2,53	0,00		
Energiebilanz	25,95	0,12	-0,50	-0,13	-22,56	0,00	2,88	11%

Die in Tab. 9-3 aufgeführten Daten für die Energiebilanz sind im nachfolgenden Sankey-Diagramm der Abb. 9-3 noch einmal visuell veranschaulicht. Zu beachten ist hierbei, dass zusätzlich die Komponente Wärmeübertrager aufgenommen wurde, jedoch im Rahmen der MF zwischen den Komponenten Gasfilter und Wärmeübertrager keine Temperaturmessung im Produktgas vorgenommen werden konnte und daher die thermische Energie des Produktgases zwischen diesen Komponenten als konstant angenommen wurde. Die auftretenden Wärmeverluste an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion bilden den hauptsächlichen Anteil am Bilanzfehler von 3,0 kW über dem Reaktor und von 0,8 kW zwischen Wärmeübertragereintritt und -austritt.

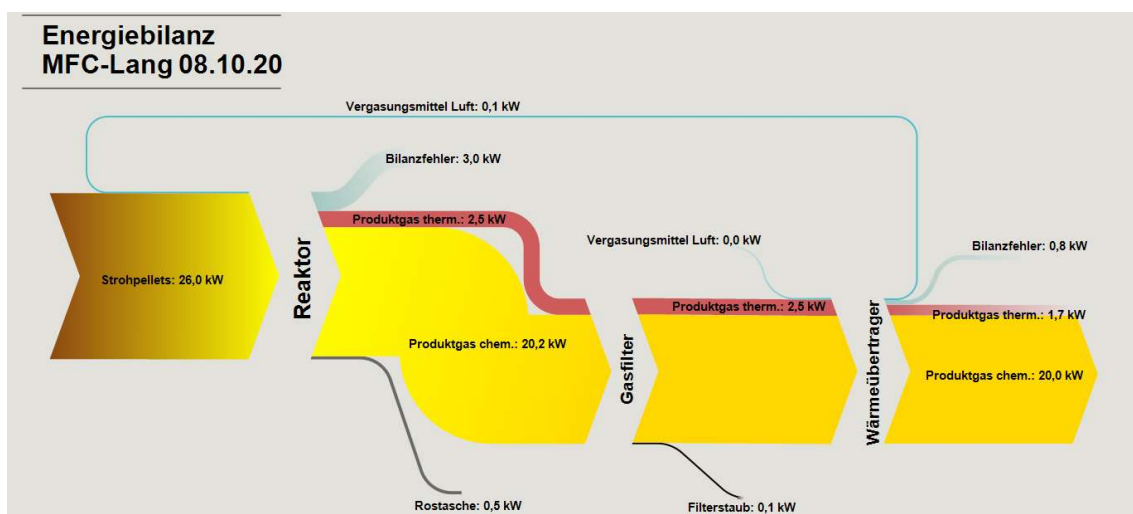


Abb. 9-3 Sankey-Diagramm der Energiebilanz der MF MFC-Lang

10 Bewertung

Als Ergebnis der durchgeführten Messfahrten konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit kleintechnischer Festbett-Gleichstromvergasung (hier mit dem Vergaserprototyp X5 der Fa. MFC GmbH) die Vergasung von Strohpellets zum Zwecke der Schwachgasbereitstellung möglich ist. Insgesamt wurden im Rahmen der Untersuchung neun Messfahrten mit über 75 Stunden Betriebszeit durchgeführt. Dabei wurde die Anlage im Rahmen der abschließenden Langzeitmessfahrt über 25 Stunden kontinuierlich betrieben.

Während des Betriebes trat kein Anlagenausfall aufgrund von Verschlackung des Reaktors auf, sodass für den Zeitraum der Messfahrten die Eignung von Rost und Poker zur mechanischen Schlackebehandlung während des Anlagenbetriebes nachgewiesen werden konnte.

Hinsichtlich der Parametervariation konnten bei Verwendung der Strohpellets ein Volumenstrom des Vergasungsmittels zwischen 8,5 und 9,5 m³/h (i.N.) und eine Füllstandshöhe im Reaktor von 32 cm als die Parameterwerte mit dem besten Anlagenverhalten und der im Vergleich besten Umsetzungseffizienz ermittelt werden (vgl. Tab. 10-1). Der hier dargestellte Kaltgaswirkungsgrad wird nach [5] 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.

Der Brennstoffausnutzungsgrad kennzeichnet nach [6], wieviel der dem Prozess mit dem Brennstoff zugeführten Energie in nutzbare Energie (z.B. chemische Energie des Gases, Strom, Wärme) umgewandelt wird. Da für diese Versuche keine energetische Nutzung des Strohgasen erfolgte, wurde für die Betrachtung des Brennstoffausnutzungsgrades die chemische und thermische Energie des Strohgasen am Anlagenausstritt berücksichtigt.

Tab. 10-1 Wirkungsgrade der einzelnen Messfahrten, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	Kaltgas- wirkungsgrad	Brennstoff- ausnutzungsgrad
<i>Einheit</i>		%	%
11.06.20	MFC-MF6	73	74
12.06.20	MFC-MF7	73	75
17.06.20	MFC-MF8	77	79
18.06.20	MFC-MF9	72	73
19.06.20	MFC-MF10	75	77
22.06.20	MFC-MF11	75	77
16.07.20	MFC-MF12	75	77
17.07.20	MFC-MF13	78	80
09.10.20	MFC-Lang	77	79

Der Heizwert des Produktgases variierte dabei zwischen 3,8 (MF12) und 4,2 MJ/kg (MF Lang) bzw. 4,5 und 4,9 MJ/m³ (i.N.). Dies entspricht nach [7] in etwa den typischen Erfahrungswerten von Produktgasen von Festbett-Gleichstrom-Vergasern bei Verwendung von Holz und stellt somit einen hervorragenden Wert für die Vergasung von Stroh dar.

Als Ergebnis der Messfahrten und der Anlagenbewertung können folgende Charakterisierungen der Anlage aufgestellt werden:

- Anlage ist derzeit auf diskontinuierlichen Betrieb ausgelegt, Brennstoffbunker ausgelegt für ca. 7 bis 10 Betriebsstunden je nach Fahrweise
- Für die Langzeitmessfahrt konnte bei kurzem Anlagenstillstand die manuelle Neubefüllung des Brennstoffbunkers vorgenommen werden
- Relativ große Bandbreite an Brennstoffen einsetzbar, begrenzende Faktoren sind Stückigkeit und Wassergehalt, ideal sind Pellets aufgrund der Schneckenförderung vom Brennstoffbehälter in den Reaktor
- Anlagensteuerung sowie Datenerfassung und -visualisierung erfolgt über einen Leitrechner
- Für die MF und Parametervariationen konnte eine gleichbleibend hohe Umsetzungseffizienz des Vergasungsprozesses (=Kaltgaswirkungsgrad) nachgewiesen werden (vgl. Tab. 10-1)
- Die Funktionsfähigkeit der mechanischen Behandlung der bei der Strohvergasung gebildeten Schlacke im Reaktor durch Poker und Rost konnte im Rahmen der MF nachgewiesen werden
- Für die MF wurden relativ große Unterschiede der Anfallmenge und des Aschegehaltes der Rostasche festgestellt (Ursache unklar)
- Aktuell ist noch ein Betreuungsaufwand des Betreibers notwendig, da noch kein automatisches Nachjustieren bestimmter Parameter der Anlagensteuerung bei Prozessveränderungen erfolgt, dies muss der Anlagenbetreiber derzeit eigenständig und basierend auf sein Erfahrungswissen durchführen
- Es sind weitere umfangreiche Tests und MF notwendig, um die Anlagensteuerung weiterzuentwickeln

Problematisch für einen stabilen Anlagenbetrieb ist das Erkalten der gebildeten Schlackeschicht nach Ausschalten der Anlage. Diese härtet aus und ist dann beim nächsten Starten der Anlage nur noch begrenzt mit Poker und Rost mechanisch zu beseitigen. Daher wurde immer nach Abschluss der jeweiligen Messfahrt bei laufendem Rost der Poker kontinuierlich auf einer ringförmigen Achse vertikal in die Schlackeschicht gefahren. Somit konnte die Schlacke im noch „weichen“ Zustand beseitigt werden, damit diese bei Erkalten der Anlage keine feste und dichte Schlackeschicht bildet und somit folglich den nächsten Anlagenstart und -betrieb nicht stören kann. Dieses Vorgehen war erfolgreich und konnte somit eine Betriebsbeeinträchtigung durch erkaltete Schlacke verhindern.

Als Ergebnis der durchgeführten Messfahrten konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit dem Vergaserprototyp die Vergasung von Strohpellets zum Zwecke der Schwachgasbereitstellung möglich ist. Die Qualität des Produktgases ist aus energetischer Sicht ähnlich der von Produktgasen bei der Vergasung von Holz. Auch anhand der ermittelten Kenngrößen (Kaltgaswirkungsgrad und Brennstoffausnutzungsgrad) bezogen auf die einzelnen MF kann von einer guten Umsetzungseffizienz des Brennstoffes in diesem Festbett-Gleichstrom-Vergaser-Prototyp ausgegangen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] SCHNEIDER, R. / GRUSLA, S.: Brennstoffvariation am Holzvergaser-BHKW des TCV, Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2019
- [2] BAUMBACH ET AL: Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe in KALTSCHMITT, M. / HARTMANN, H. / HOFBAUER, H.: Energie aus Biomasse, S. 609, 3. Auflage, Springer Vieweg, 2016
- [3] ZSCHUNKE ET AL: Abschlussbericht „Zittauer Kraftwerkslabor - Thermochemisches Versuchsfeld, Hochschule Zittau/Görlitz, 2015; http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/IPM_Abschlussbericht_TCV-GESAMT_final.pdf
- [4] HOFMEISTER, M.: R&I-Schema X5, MFC GmbH, Dresden, 2021
- [5] THRÄN, D. / PFEIFFER, D.: Methodenhandbuch, Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte, Methoden zur Bestimmung von Technologiekennwerten, Gestehungskosten und Klimagaseffekten, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 4, DBFZ Leipzig, 2013, ISSN 2192-1806
- [6] VDI 4661: 2014-08 Energiekenngrößen - Grundlagen - Methodik (Energetic characteristics - Fundamentals - Methodology). Berlin: Beuth Verlag
- [7] 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