



Hochschule  
Zittau/Görlitz  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Institut für Prozeßtechnik,  
Prozeßautomatisierung  
und Meßtechnik



Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und  
Feuerungstechnik



## FORSCHUNGSBERICHT: BRENNSTOFFVARIATION AM HOLZVERGASER-BHKW DES TCV

Autor(en)	Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider Dipl.-Ing. Steffen Grusla
Ausgabe	12.04.2019
Revision	3





Institut für Prozeßtechnik,  
Prozeßautomatisierung  
und Meßtechnik

Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik



Hochschule  
Zittau/Görlitz  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Forschungsbericht

## THERMOCHEMISCHES VERSUCHSFELD (TCV) III <BRENNSTOFFVARIATION AM HOLZVERGASER-BHKW DES TCV>

April 2019

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Autor(en)	Roman Schneider Steffen Grusla
Projektlaufzeit	01.01.2016 – 30.04.2019
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



Europa fördert Sachsen.  
**EFRE**  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung





## Abstract

Im Thermochemischen Versuchsfeld der Hochschule Zittau/Görlitz wurden Brennstoffvariationen mit Rest- bzw. Abfallstoffen durchgeführt. Dabei wurden den Holzhackschnitzeln (HHS) als Standardbrennstoff in einem Fall Sägewerksabfälle aus der Produktion von mitteldichten Faserplatten (MDF) und bei einer weiteren Variation Gärrestpellets zugemischt und diese Brennstoffgemische anschließend dem Vergasungsprozess zugeführt. Im Rahmen der Messfahrten (MF) wurden die auftretenden Prozessparameter bei Zumischung dieser biogenen Rest- und Abfallstoffe mit der vorhandenen Messtechnik erfasst und dargestellt, um anschließend diese mit den Referenzfahrten bei Verwendung des Standardbrennstoffes zu vergleichen. Dabei bezog sich die Auswertung hauptsächlich auf den Vergasungsprozess und die Motoremissionen mit den entsprechenden Stoffströmen (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Motorabgas), um anschließend die Wirkung der Zumischungen und damit die Einsetzeignung bewerten zu können.

In Bezug auf das Vergasungsverhalten konnten sowohl während als auch nach den Versuchsfahrten einige betriebsstörende Einflüsse (z.B. Verschmutzung, Brückenbildung, Verschlackung) durch die eingesetzten Materialien festgestellt werden. Dies betrifft vor allem die hohen Zumischungsraten von MDF und GR. Da darüber hinaus neben dem resultierenden Absinken des Brennstoffnutzungsgrades auch die Stickoxidemissionen im Motorabgas deutlich anstiegen, kann aus Sicht der Autoren die Zumischung der verwendeten Materialien in einem relevanten Umfang nicht empfohlen werden.

### **FREIGABE**

---

Autor(en)

Geprüft

Freigegeben

---



## Änderungen

<b>Rev</b>	<b>Datum</b>	<b>Name</b>	<b>Änderung(en)</b>
0	26.10.2018	Schneider	Erster Entwurf
0.1	30.10.2018	Schneider	Überarbeitung
0.2	11.01.2019	Schneider	Überarbeitung
0.3	21.03.2019	Schneider	Überarbeitung
1	02.04.2019	Schneider	Fertigstellung des ersten Entwurfes
2	08.04.2019	Schneider	Fertigstellung Zusammenfassung
3	12.04.2019	Schneider	Überarbeitung nach Kommentare, Anmerkungen





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Motivation und Ziel .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Vorgehen .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Kurzbeschreibung der Versuchsanlage .....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Kurzbeschreibung der Messtechnik .....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Beschreibung der Messfahrten .....</b>	<b>9</b>
6.1	Allgemeines Vorgehen .....	9
6.2	Übersicht Messfahrten .....	9
<b>7</b>	<b>Laboranalysen .....</b>	<b>11</b>
7.1	Analysenmethoden zur Bestimmung .....	11
7.1.1	Wassergehaltsbestimmung im Trockenschrank .....	11
7.1.2	Kurzanalyse .....	11
7.1.3	Brennwertbestimmung .....	11
7.1.4	Elementaranalyse .....	11
7.1.5	Asche-Schmelz-Verhalten .....	12
7.2	Probenmaterial .....	12
7.3	Ergebnisse der Brennstoffanalyse .....	13
<b>8</b>	<b>Auswertung der Messfahrten .....</b>	<b>15</b>
8.1	Stoffströme .....	15
8.1.1	Brennstoff .....	16
8.1.2	Produktgas / Vergasungsmittel .....	16
8.1.3	Motorabgas .....	20
8.2	Störungen .....	23
8.3	Betreiberaufwand hinsichtlich Mischung von HHS und Zumischungsmaterialien (MDF, GR) .....	22
8.4	Anlagenfahrweise .....	22
<b>9</b>	<b>Bewertung der Brennstoffzumischungen von MDF-Material und Gärrestpellets .....</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>33</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	zerkleinerte Rückstände aus der MDF-Produktion .....	2
Abb. 2-2	Gärrestpellets.....	2
Abb. 3-1	Temperaturverläufe der Reformierluft vor dem Reformereintritt, MF 19.12.18 .....	3
Abb. 3-2	Abwiegung der Standard-HHS vor MDF-Zumischung .....	4
Abb. 3-3	Abwiegung des MDF-Materials vor der Zumischung .....	4
Abb. 3-4	Abwiegung der Gesamtmasse aus HHS und MDF vor der Vermischung (10 kg).....	5
Abb. 3-5	Abwiegung der Gesamtmischung (100 kg) vor Zugabe in den Tagesbehälter .....	5
Abb. 3-6	Gesamtmischung aus HHS und MDF vor der Zugabe in den Tagesbehälter .....	5
Abb. 3-7	Abwiegung der Gesamtmasse aus HHS und GR vor der Vermischung (10 kg).....	5
Abb. 3-8	Messung der Produktgas-zusammensetzung mittels Mikro-Gaschromatograph .....	6
Abb. 3-9	Messung der Motorabgasemissionen mittels FTIR.....	6
Abb. 5-1	Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF.....	8
Tab. 7-5	Heizwerte der Brennstoffe im Einsatzzustand .....	14
Abb. 8-1	Produktgaszusammensetzung während MF GR3 .....	15
Abb. 8-2	Verlauf der Motorabgasemissionen während der MF Standard / MDF1 ...	20
Abb. 8-3	Verlauf der Motorabgasemissionen während der jeweiligen MF Standard / MDF .....	21
Abb. 8-4	Verlauf der Motorabgasemissionen während der jeweiligen MF Standard / GR .....	22
Abb. 8-5	Verlauf der Füllstandmessung im Reformier, MDF2.....	24
Abb. 8-6	Detailinnenansicht Reformier mit Brückenbildung durch hohen MDF-Anteil, MDF2 .....	24
Abb. 8-7	Reformierabbildung und vereinfachtes Schema mit Darstellung der Stoffströme.....	24
Abb. 8-8	Innenansicht Reformier Standard.....	24
Abb. 8-9	Innenansicht Reformier nach MDF1 .....	24
Abb. 8-10	Innenansicht Reformier nach MDF2.....	25
Abb. 8-11	Innenansicht Reformier nach GR1 .....	25
Abb. 8-12	Innenansicht Reformier nach GR2 .....	25
Abb. 8-13	Innenansicht Reformier nach GR3 .....	25
Abb. 8-14	Reformierinnenansicht nach manueller Entleerung bis zur Luftdüsenenebene .....	26
Abb. 8-15	Detailinnenansicht Reformier nach GR3 .....	26
Abb. 8-16	Verschlackung im Reformier nach GR3 .....	26
Abb. 8-17	Verschlackungsschicht in Höhe der Düsenenebene im Reformier nach GR3	22
Abb. 8-18	Verschlackungsklumpen aus dem Reformier nach manueller Entfernung.	22
Abb. 8-19	Differenzdrücke und elektrische BHKW-Leistung, MF GR2.....	28
Abb. 8-20	Differenzdrücke und elektrische BHKW-Leistung, MF GR3.....	28

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten .....	4
Tab. 5-1	Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme .....	8
Tab. 6-1	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten .....	10
Tab. 7-1	Wassergehalt der getrockneten HHS bei der jeweiligen MF .....	13
Tab. 7-2	Kurzanalysenergebnisse der Brennstoffproben .....	13
Tab. 7-3	Elementaranalysenergebnisse der Brennstoffproben .....	13
Tab. 7-4	Asche-Schmelz-Verhalten der Brennstoffproben.....	14
Tab. 8-1	Brennstoffbedarf bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen .....	16
Tab. 8-2	Produktgaszusammensetzung (in Vol.-% feucht) bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume .....	17
Tab. 8-3	Heizwert des Produktgases bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.- variationen .....	17
Tab. 8-4	Mess- und Berechnungsdaten der jeweiligen MF .....	19
Tab. 8-5	Motorabgasemissionen bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.- variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume bei 5 % Bezugssauerstoffgehalt, im Normzustand und trocken.....	23
Tab. 9-1	Brennstoffausnutzungsgrade bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume .....	31
Tab. 9-2	Bewertung der Zumischungen von MDF und GR .....	32

## Abkürzungsverzeichnis

### ABKÜRZUNGEN

BHKW	Blockheizkraftwerk
DIN	Deutsches Institut für Normung
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GC	Gaschromatograph
GR	Gärrest
HHS	Holzhackschnitzel
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
ISO	International Organization for Standardization
MDF	Mitteldichte Holzfaserplatte
MF	Messfahrt
$\mu$ GC	Mikro-Gaschromatograph
TCV	Thermochemisches Versuchsfeld

## 1 Zusammenfassung

Im Thermochemischen Versuchsfeld wurden Brennstoffvariationen mit Rest- bzw. Abfallstoffen durchgeführt. Dabei wurden den Holzhackschnitzeln (HHS) als Standardbrennstoff in einem Fall Sägewerksabfälle aus der Produktion von mitteldichten Faserplatten (MDF) und in einem anderen Fall Gärrestpellets zugemischt und diese Brennstoffgemische anschließend dem Vergasungsprozess zugeführt. Dabei wurde zusätzlich der Zumischungsanteil von MDF und Gärrestpellets (GR) variiert. Bei der Erfassung und Beurteilung des Prozessverhaltens im Rahmen dieser Versuche konnten signifikante Unterschiede hinsichtlich Quantität und Qualität der Stoffströme nachgewiesen werden. Die dabei im Vergleich zum Standardbrennstoff wesentlichsten Merkmale waren:

- Anstieg des Brennstoffbedarfes,
- Absinken des Produktgasheizwertes,
- Absinken der elektrischen Anlagenleistung,
- Stark steigende Stickstoffoxidemissionen im Motorabgas,
- Absinken des Reinigungsintervalls des Gewebefilters bei Zumischung von GR (20 bzw. 50 Ma.-%) aufgrund dessen hohen Ascheanteils.

Hinsichtlich des Prozessverhaltens gab es bei den Brennstoffvariationen weitere Auffälligkeiten, in deren Folge Betriebsbeeinträchtigungen und Störungen auftraten:

- Verschlackung im Reformier bei Zumischung von 50 Ma.-% GR,
- Schicht- und Brückenbildung bei Zumischung von 20 Ma.-% MDF.

Aufgrund dessen kann eine Zumischung von 20 Ma.-% MDF und 50 Ma.-% GR nicht empfohlen werden. Außerdem wurden bei diesen MF erhöhte Stickstoffoxidemissionen erfasst, deren Minimierung auf ein vergleichbares Emissionsniveau wie beim Einsatz des Standardbrennstoffes einen zusätzlichen nicht unerheblichen Aufwand bedeutet.

Ohne Beeinträchtigung der Anlagenfunktion konnten die Brennstoffvariationen MDF1 (5 Ma.-% Zumischung), GR1 (5 Ma.-% Zumischung) und GR2 (20 Ma.-% Zumischung) durchgeführt werden. Inwieweit die dabei auftretende niedrigere Prozesseffizienz in Kauf genommen werden kann, hängt von den ansonsten anfallenden Entsorgungskosten der Rest- bzw. Abfallstoffe ab. Um jedoch den Aufwand für die Brennstoffmischungen zu begrenzen und die anfallenden Mengen von MDF und GR relativ groß sind, sind aus Betreibersicht nur Zumischanteile größer als 20 Ma.-% sinnvoll. Darüber hinaus sollten diese Einsätze zu keinen Beeinträchtigungen des Anlagenbetriebes führen. Dies konnte mit dem MDF-Material nicht und mit dem GR nur teilweise erreicht werden.

## 2 Motivation und Ziel

Am Versuchsstand der HSZG zur Biomassevergasung (Thermochemisches Versuchsfeld (TCV)) werden üblicherweise Nadelholz-Hackschnitzel (HHS) aus Stamm- und Waldrestholz gemäß G30 oder G50 nach ÖNORM M 7133 (Norm veraltet, neu P31S/P45S nach DIN EN ISO 17225-4) als Brennstoff eingesetzt. Dieser Brennstoff sollte für einen möglichst störungsfreien Betrieb bestimmte Qualitätskriterien erfüllen. Dies betrifft sowohl den Wassergehalt (max. 13 Ma.-%), den Feinanteil (max. 30 % > 4 mm Körnung) als auch die Korngröße (siehe Ausführungen zuvor). Da die HHS mit diesen Qualitätsmerkmalen einen entsprechend hohen Marktpreis aufweisen, werden zunehmend Brennstoffe mit geringerer Brennstoffqualität eingesetzt, um damit die Brennstoffkosten zu senken. In diesem Zusammenhang treten vermehrt Anfragen auf, ob die Vergasung von biogenen Abfall- und Reststoffen (z.B. Sägewerksrückstände, Gärreste) mit der vorhandenen Versuchsanlage prinzipiell möglich ist. Im Rahmen der Brennstoffvariationen wurden über die Fa. Spanner Re<sup>2</sup> GmbH Rückstände aus der Produktion von Mitteldichten Faserplatten (MDF) und pelletierter Gärrest aus Biogasanlagen zur Verfügung gestellt.

Nachdem die durchgeführten Laboranalysen und die anschließende Brennstoffbewertung eine prinzipielle Einsatzzeichnung der Materialien nachwiesen, wurde entschieden, diese biogenen Reststoffe mit einem zu variierenden Anteil dem Standardbrennstoff zuzumischen.



Abb. 2-1 zerleinerte Rückstände aus der MDF-Produktion



Abb. 2-2 Gärrestpellets

Im Rahmen der Messfahrten (MF) wurden die auftretenden Prozessparameter bei Zumischung dieser biogenen Rest- und Abfallstoffe mit der vorhandenen Messtechnik erfasst und dargestellt, um anschließend diese mit den Referenzfahrten bei Verwendung des Standardbrennstoffes zu vergleichen. Dabei bezog sich die Auswertung hauptsächlich auf den Vergasungsprozess und die Motoremissionen mit den entsprechenden Stoffströmen (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Motorabgas), um anschließend die Wirkung der Zumischungen und damit die Einsatzzeichnung bewerten zu können.

### 3 Vorgehen

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<sub>el</sub> Nennleistung; 70 kW<sub>th</sub> Nennleistung)

Als Referenz wurden zu Beginn der jeweiligen MF Standard-HHS als Brennstoff eingesetzt. Für den Vergleich zwischen den Standard-HHS und der Brennstoffvariation wurde die jeweilige MF immer an einem Tag durchgeführt, sodass im Rahmen der MF (16.10.18; 22.11.18; 19.12.18; 16.1.19; 8.2.19) im ersten Teil die Standard-HHS und im zweiten Teil das Brennstoffgemisch eingesetzt wurden. Um eine Entmischung der HHS und des zugemischten Materials zu verhindern, wurde bei Einsatz der MDF-Rückstände die vorhandene Feinanteilsabsiebung in der Hackschnitzelzufuhr blockiert. Der zeitliche Bereich der Versuchsdatenauswertung wurde erst nach dem Erreichen des jeweiligen stationären Zustandes ausgewählt und nahm bei den MF ca. zwei Stunden ein. Die Bestimmung des zeitlichen Beginns des stationären Zustandes erfolgte durch die Temperatur des Vergasungsmittels (Messstellenbezeichnung T1206) direkt am Eintritt des Reformers. Konnte eine annähernd konstante Temperatur der Luft nach der Vorwärmung nachgewiesen werden, wurde von einem stationären Betrieb ausgegangen (siehe Abb. 3-1).

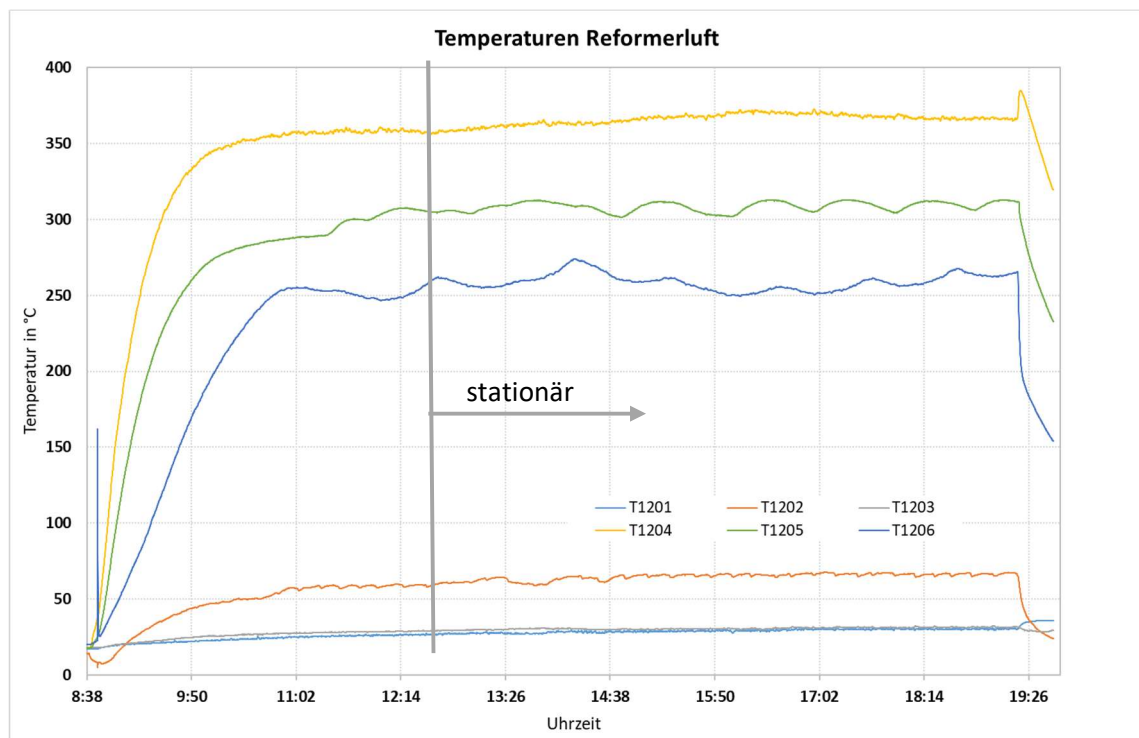


Abb. 3-1 Temperaturverläufe der Reformerluft vor dem Reformereintritt, MF 19.12.18

Nach Umstellung auf die Fahrweise mit Zugabe des MDF-Materials bzw. der Gärrestpellets wurde mind. 1 h abgewartet, erst dann die Versuchsdatenauswertung begonnen und diese über ca. zwei Stunden durchgeführt. Im Rahmen der MF kamen zwei verschiedene Materialien (MDF; Gärrestpellets) zum Einsatz. Die Zugabeintensität des MDF-Materials betrug nach Absprache mit der Fa. Spanner Re<sup>2</sup> GmbH 5 bzw. 20 Ma.-% bezogen auf das Brennstoffinput. Die Gärrestpellets wurden bei drei MF eingesetzt und jeweils zu 5, 20 bzw. 50 Ma.-% dem Standardbrennstoff zugemischt.

Tab. 3-1 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

	Einheit	Messfahrten				
Datum		16.10.18	22.11.18	19.12.18	16.1.19	8.2.19
Bezeichnung		MDF1	MDF2	GR1	GR2	GR3
Zugabeintensität	Ma.-%*	5	20	5	20	50
Auswertungszeitraum	h	2,0	1,5	1,5	2,0	2,0

\*die Angabe bezieht sich auf die Brennstoffinputmasse

Hinsichtlich der Anlageneinstellungen wurde diese bei allen MF unverändert beibehalten. Die Mischung der getrockneten HHS und der Materialien erfolgte **manuell** in Mischbehältern (vgl. Abb. 3-2 und Abb. 3-7), die dann dem Tagesbehälter zugegeben wurden. Die HHS wurden zuvor der Brennstoffzuführung entnommen, abgewogen, die entsprechende Masse MDF/Gärrestpellets wie beschrieben zugegeben und beides miteinander vermischt. Veranschaulicht wird die Vorgehensweise in den Abb. 3-2 bis Abb. 3-7. Für die nachfolgende Auswertung werden die jeweiligen Mischungen mit MDF bzw. GR bezeichnet.



Abb. 3-2 Abwiegen der Standard-HHS vor MDF-Zumischung



Abb. 3-3 Abwiegen des MDF-Materials vor der Zumischung





Abb. 3-4 Abwiegung der Gesamtmasse aus HHS und MDF vor der Vermischung (10 kg)



Abb. 3-6 Gesamtmischung aus HHS und MDF vor der Zugabe in den Tagesbehälter



Abb. 3-5 Abwiegung der Gesamtmischung (100 kg) vor Zugabe in den Tagesbehälter



Abb. 3-7 Abwiegung der Gesamtmasse aus HHS und GR vor der Vermischung (10 kg)

Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung der Produktgaszusammensetzung ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{N}_2$ ), des Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Leistung, Störungen) sowie der Motorabgaszusammensetzung v.a. hinsichtlich der relevanten Schadstoffemissionen (vgl. Abb. 3-8, Abb. 3-9, Kap. 5). Abschließend erfolgte eine Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Arbeiten inkl. Zusammenstellung und Diskussion der ermittelten Daten und Ergebnisse.

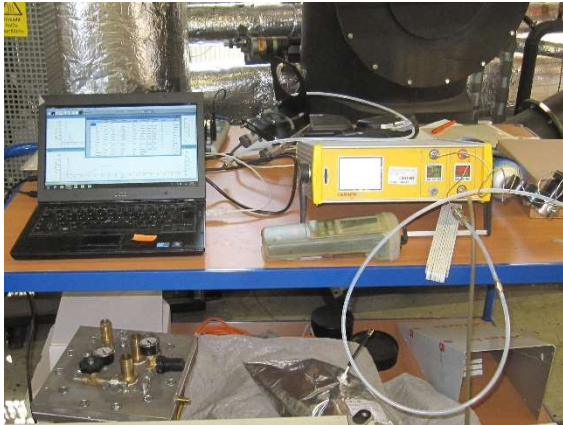


Abb. 3-8 Messung der Produktgaszusammensetzung mittels Mikro-Gaschromatograph

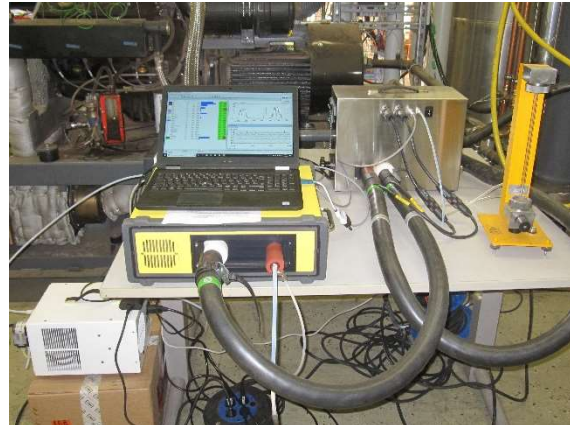


Abb. 3-9 Messung der Motorabgasemissionen mittels FTIR

## 4 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage

Bezüglich der Anlagenbeschreibung (Biomassetrocknung, Biomassevergasungs-BHKW) wird auf die vorhandene umfangreiche Dokumentation verwiesen [1].

## 5 Kurzbeschreibung der Messtechnik

Hinsichtlich der im TCV eingesetzten Messtechnik (Brennstoffbedarf, Temperaturen, Produktgasmenge und -zusammensetzung, Anlagenleistung, Datenerfassung etc.) wird ebenfalls auf die vorhandene Dokumentation verwiesen [1]. Darüber hinaus wurden für die MF zur zusätzlichen Erfassung der Produktgaszusammensetzung ein Mikro-Gaschromatograph ( $\mu$ GC) der Fa. INRAG AG (I-Graph XSII) (vgl. Abb. 3-8) und zur Erfassung der Motorabgaszusammensetzung ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) der Fa. Ansyco GmbH (DX4000) (vgl. Abb. 3-9) eingesetzt.

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

Tab. 5-1 Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme

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

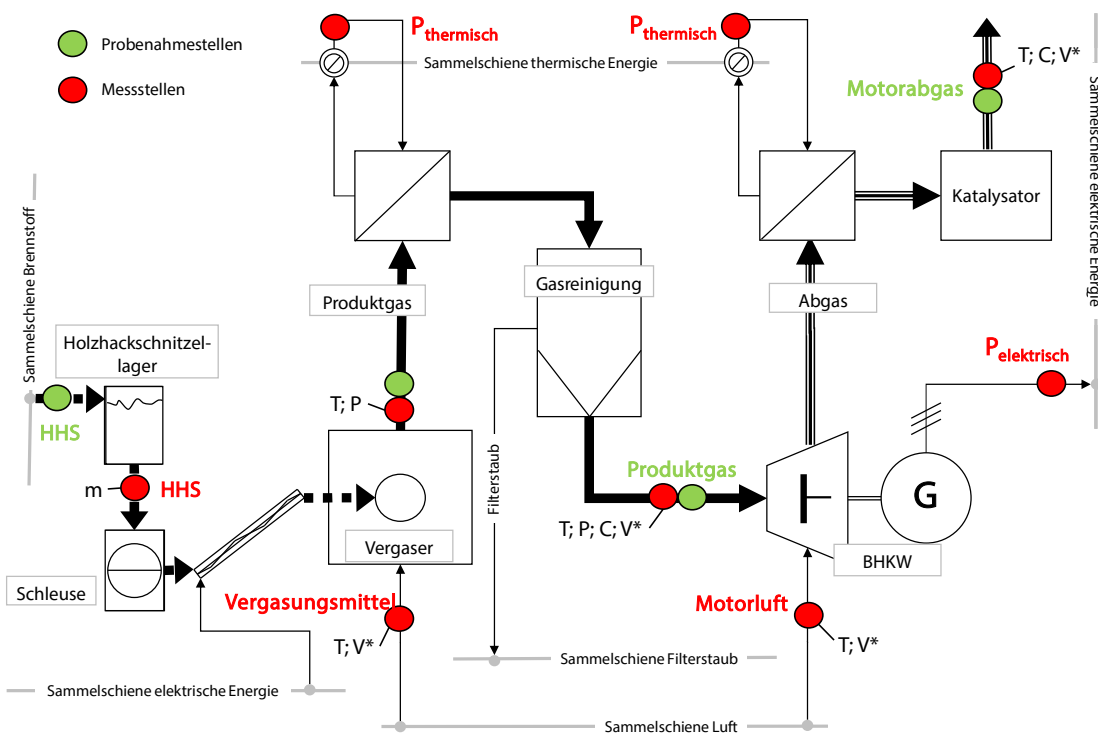


Abb. 5-1 Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF

## 6 Beschreibung der Messfahrten

### 6.1 Allgemeines Vorgehen

Zur Protokollierung des Versuches wurden alle aktuellen Messdaten (Brennstoffmasse, Temperaturen, Produktgasanalyse, Anlagenleistung etc.) im 10 s Messintervall erfasst und in einer Versuchsdatenbank gespeichert. Außerdem wurden evtl. aufgetretene Anlagenstörungen, durchgeführte Probenahmen u.ä. im Logbuch protokolliert. Während der Versuchsfahrten wurden mehrere Brennstoffproben direkt aus der Fördereinrichtung entnommen, um anschließend den Wassergehalt zu analysieren.

### 6.2 Übersicht Messfahrten

Zur Übersicht sind in folgender Tab. 6-1 die durchgeführten Messfahrten mit Versuchsdauer und Auswertungszeiträumen dargestellt.

Am 16.10.18 wurde die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Datenauswertung als Referenz vorgenommen (12:42 bis 14:42 Uhr) und ab ca. 14:00 Uhr das **MDF-Material mit 5 Ma.-%** den HHS beigemischt und dem Tagesbehälter zugegeben. Erste Änderungen v.a. bei den Motoremissionen waren ab ca. 14:45 Uhr zu detektieren. Die entsprechende Datenauswertung erfolgte von 15:10 bis 17:10 Uhr.

Am 22.11.18 wurde die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Datenauswertung als Referenz vorgenommen (12:55 bis 14:25 Uhr) und ab ca. 14:00 Uhr das **MDF-Material mit 20 Ma.-%** den HHS beigemischt und dem Tagesbehälter zugegeben. Erste Änderungen v.a. bei den Motoremissionen waren ab ca. 14:45 Uhr zu detektieren. Die entsprechende Datenauswertung erfolgte von 15:52 bis 17:22 Uhr.

Am 19.12.18 wurde die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Datenauswertung als Referenz vorgenommen (13:10 bis 15:10 Uhr) und ab ca. 15:15 Uhr das **GR-Material mit 5 Ma.-%** den HHS beigemischt und dem Tagesbehälter zugegeben. Entsprechende Prozessänderungen konnten im nachfolgenden Zeitraum nicht nachgewiesen werden. Die entsprechende Datenauswertung der Brennstoffvariation erfolgte von 17:25 bis 18:55 Uhr.

Am 16.1.19 wurde die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Datenauswertung als Referenz vorgenommen (13:35 bis 15:35 Uhr) und ab ca. 15:10 Uhr das **GR-Material mit 20 Ma.-%** den HHS beigemischt und dem Tagesbehälter zugegeben. Erste Änderungen v.a. bei den Motoremissionen waren ab ca. 15:45 Uhr zu detektieren. Die entsprechende Datenauswertung der Brennstoffvariation erfolgte von 17:00 bis 19:00 Uhr.

Am 8.2.19 wurde die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Datenauswertung als Referenz vorgenommen (13:00 bis 15:00 Uhr) und ab ca. 14:30 Uhr das **GR-Material mit 50 Ma.-%** den HHS beigemischt und dem Tagesbehälter zugegeben. Erste Änderungen v.a. bei den Motoremissionen waren ab ca. 15:15 Uhr zu detektieren. Die entsprechende Datenauswertung der Brennstoffvariation erfolgte von 15:55 bis 17:55 Uhr.

Tab. 6-1 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

	Einheit	Messfahrten				
Datum		16.10.18	22.11.18	19.12.18	16.1.19	8.2.19
Bezeichnung		MDF1	MDF2	GR1	GR2	GR3
Startzeit	h:min	8:13	8:15	8:18	8:15	8:12
Endzeit	h:min	17:45	18:00	19:19	19:35	18:10
Versuchsdauer Ges.	h	9,53	9,75	11,02	11,33	9,17
Versuchsdauer Standard-HHS	h	5,78	6,17	7,7	6,33	6,0
Auswertung Standard-HHS	h	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0
Versuchsdauer Brst.-variation	h	3,75	3,33	3,32	3,75	3,17
Auswertung Brst.-variation	h	2,0	1,5	1,5	2,0	2,0

## 7 Laboranalysen

### 7.1 Analysemethoden zur Bestimmung

Das Labor für Brennstoffanalytik an der HSZG verfügt über vielfältige Analysemöglichkeiten hinsichtlich der Brennstoffbewertung. Auf das zugemischte Material wurden folgende Analysemethoden angewendet. Zum einen wurden Kurzanalysen nach DIN 51718-51720 durchgeführt und der Brennwert der Brennstoffproben nach DIN 51900-1/-3 bestimmt. Weiterhin wurde der Wassergehalt der Brennstoffproben nach DIN EN 14774-2 für die jeweilige Messfahrt im Trockenschrank bestimmt und die Brennstoffe nach DIN 51730 hinsichtlich ihres Asche-Schmelz-Verhaltens untersucht. Darüber hinaus wurden sowohl MDF-Material als auch die Gärrestpellets hinsichtlich ihrer Elementarzusammensetzung nach DIN 51732/51733 und DIN 51724-3 analysiert.

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 Wassergehaltsbestimmung im Trockenschrank

Die Brennstoffprobe wird bei einer Temperatur von  $(105\pm 2)$  °C bis zum Erreichen der Massenkonstanz in einem Trockenschrank unter Luftatmosphäre getrocknet. Aus dem Massenverlust der Probe wird der prozentuale Anteil des Gesamtwassers berechnet.

#### 7.1.2 Kurzanalyse

Zur Analyse wird ein Thermogravimetrisches Multianalysensystem TGA701 der Fa. LECO<sup>1</sup> 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.

#### 7.1.3 Brennwertbestimmung

Mittels eines Verbrennungskalorimeters der Fa. IKA<sup>2</sup> 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.

#### 7.1.4 Elementaranalyse

Eine bekannte Masse der Probe wird in Sauerstoff oder in einem Sauerstoff-Trägergas-Gemisch so verbrannt, dass sie in Asche und gasförmige Verbrennungsprodukte umgewandelt wird. Diese bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf,

---

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

<sup>2</sup> <http://www.ika.de/>

elementarem Stickstoff und/oder Stickstoffoxiden, Schwefeloxiden und -oxosäuren sowie Halogenwasserstoffen. Die Verbrennungsprodukte werden so behandelt, dass sichergestellt ist, dass der Wasserstoff von schwefel- oder halogenidhaltigen Verbrennungsprodukten als Wasserdampf freigesetzt wird. Stickstoffoxide werden zu Stickstoff reduziert und Verbrennungsprodukte, die die nachfolgenden Gas-Analyseverfahren beeinträchtigen könnten, entfernt. Direkt danach werden die gebildeten Verbrennungsgase (Oxidationsprodukte) mit Hilfe eines Trägergases (meist reines Helium) über einen ca. 600 – 900°C heißen Kupfer- oder Wolframkontakt (als Späne oder Granulat) geführt und im Gasstrom enthaltene Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) vollständig zu molekularem Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) reduziert. Anschließend werden die definierten Verbrennungsgase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) gaschromatographisch separiert und nacheinander einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) zugeführt und quantifiziert. Da bei dieser Messmethode die Reihenfolge der Elemente (jeweils als sog. Peaks detektiert) in einer Probenmessung technisch exakt festgelegt ist, erlaubt dies sowohl die eindeutige Identifizierung (qualitative Bestimmung) sowie über die Peakflächen (Integral über die Zeit) der Messsignale auch gleichzeitig die Mengenerfassung (quantitative Bestimmung) der einzelnen Elemente als C, H, N, S. Mit Hilfe der bekannten Einwaage und des angegebenen Probenwassergehaltes lässt sich dann der jeweilige Massenanteil (in Prozent oder ppm) bestimmen.

### 7.1.5 Asche-Schmelz-Verhalten

Die Brennstoffproben werden zuvor in einem Muffelofen bei  $815 \pm 10$  °C etwa eine Stunde verascht und aus der Asche anschließend Probekörper gepresst. Dieser Probekörper wird dann in der elektrisch beheizten Brennkammer eines Erhitzungsmikroskops solange erhitzt, bis er geschmolzen ist. Dabei werden über eine CCD-Kamera fortlaufend Bilder der Probekörperkontur erfasst. Diese Bilder werden an die Videointerface-Karte übertragen und dort in ein digitalisiertes Graustufenbild umgewandelt. Zur Auswertung des Graustufenbildes wird dieses zunächst in ein echtes Schwarzweiß-Bild (Binärbild) mit schwarzer Probe vor weißem Hintergrund umgerechnet. In diesem Bild werden nun die Kontur der Probe und des Objektträgers (Grundlinie) bestimmt. Mit diesen Konturdaten werden nun die Messgrößen (u.a. Eckwinkel, Querschnittsfläche, Formfaktor) ermittelt und in Abhängigkeit von der Temperatur ausgewertet. Anschließend kann damit die Bewertung des Schmelzverhaltens der Brennstoffasche vorgenommen werden. Zum Einsatz kommen hierfür das Erhitzungsmikroskop EM201 und ein Bildanalysesystem der Firma Hesse Instruments. Das Schmelzverhalten der Brennstoffasche lässt Rückschlüsse auf das Verhalten der mineralischen Bestandteile der Brennstoffe bei der Verbrennung zu, wobei neben der Zusammensetzung auch die technischen Bedingungen, z.B. Feuerführung und Körnung des Brennstoffs Einfluss haben. Deswegen können die Versuchsergebnisse nicht direkt auf die praktischen Verhältnisse übertragen werden, sie dienen vielmehr dem Vergleich verschiedener Brennstoffaschen.

## 7.2 Probenmaterial

Als Standardbrennstoff wurden Kiefer-HHS gemäß P31S/P45S<sup>3</sup> verwendet. Diese wurden vor dem Einsatz auf den gewünschten Wassergehalt (ca. 10 Ma.-%) getrocknet. Die jeweilige Probenahme erfolgte im Brennstoffstrom bei Eintritt der HHS in den Tagesbehälter.

---

<sup>3</sup> nach DIN EN ISO 17225-4



### 7.3 Ergebnisse der Brennstoffanalyse

Die Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung der eingesetzten Brennstoffe sind nachfolgend für die jeweiligen Messfahrten in Tab. 7-1 zusammengestellt.

Tab. 7-1 Wassergehalt der getrockneten HHS bei der jeweiligen MF

Messfahrt	Wassergehalt HHS Ma.-%
16.10.18	10,7
22.11.18	11,8
19.12.18	10,5
16.01.19	9,5
08.02.19	9,0

Die Ergebnisse der Kurzanalyse der eingesetzten Brennstoffe sind nachfolgend, auf wasserfreien Zustand (TS) umgerechnet, in Tab. 7-2 zusammengestellt. Vor allem der hohe Aschegehalt der Gärrestpellets ist zu beachten, da gerade bei hohen Zugabeintensitäten das Produktgas dann mit deutlich mehr Partikeln beladen ist und der Gewebefilter diese hohe Beladung filtern und abreinigen muss.

Tab. 7-2 Kurzanalyseergebnisse der Brennstoffproben

Brennstoffart	Probennummer	Fixer Kohlenstoff Ma.% TS	Flüchtige Bestandteile Ma.-% TS	Asche Ma.-% TS
Standard-HHS	20160030/39/105_MW	16,8	82,7	0,50
MDF-Material	20170058	18,5	81,2	0,35
Gärrestpellets	20180001	8,4	60,7	30,97

Die Elementaranalyse der eingesetzten HHS ergab die in Tab. 7-3 dargestellten, auf die Trockensubstanz (TS) bezogenen Massenprozent der Elemente N/C/H/S. Der Anteil des Elementes O wurde rechnerisch aus der Summe der analysierten Elemente und der Asche ermittelt.

Tab. 7-3 Elementaranalyseergebnisse der Brennstoffproben

Brennstoffart	N Ma.-% TS	C Ma.-% TS	H Ma.-% TS	S Ma.-% TS	O_rechn Ma.-% TS	A Ma.-% TS
Standard-HHS	0,04	51,60	5,65	0,00	42,2	0,50
MDF-Material	5,81	48,46	5,83	0,00	39,5	0,35
Gärrestpellets	18,58	37,92	3,88	3,42	5,2	30,97

Die Analyse des Asche-Schmelz-Verhaltens der eingesetzten Brennstoffe ergab die in Tab. 7-4 dargestellten Temperaturbereiche für die Ascheerweichung und das Schmelzen der Aschepartikel. Zu beachten sind hierbei die analysierten Temperaturbereiche für die Ascheerweichung und-schmelzung der Gärrestpellets, da in der Oxidationszone des Reformers Temperaturen von mehr als 1200 °C auftreten können. Somit besteht beim Einsatz der Gärrestpellets die Gefahr der Verschlackung im Reformer.

Tab. 7-4 Asche-Schmelz-Verhalten der Brennstoffproben

Brennstoffart	Erweichungsbereich °C	Schmelzbereich °C
Standard-HHS	k.A.	k.A.
MDF-Material	1370 bis 1540	1540 bis 1550
Gärrestpellets	1040 bis 1160	1160 bis 1200

Die Brennwertbestimmung und der daraus berechnete Heizwert der eingesetzten Brennstoffe ergab die in Tab. 7 4 dargestellten Heizwerte.

Tab. 7-5 Heizwerte der Brennstoffe im Einsatzzustand

Brennstoffart	Heizwert in MJ/kg
Standard-HHS	16,6
MDF-Material	17,1
Gärrestpellets	13,2

## 8 Auswertung der Messfahrten

Zur Bewertung der Einsetzeignung der Brennstoffzumischungen mit den zur Verfügung stehenden Materialien für die Vergasung in einem Holzvergaser-BHKW wurden Messfahrten im Nennlastbereich der Anlage durchgeführt. Bei der Auswertung wurde primär auf die Vergasungsparameter und die mit dem Reformier (Vergasungsreaktor) in Verbindung stehenden Stoffströme sowie auf die Motorabgasemissionen geachtet und diese Messdaten mit denen bei Verwendung des Standardbrennstoffes und identischen Anlageneinstellungen verglichen.

Um den Verlauf einer MF zu charakterisieren, ist in Abb. 8-1 der zeitliche Verlauf der im Rahmen von GR3 erfassten Produktgaszusammensetzung dargestellt. Außerdem wurden im Diagramm die Zeiträume der jeweiligen Datenauswertung (Standard / MDF) und der nachweisbaren GR-Wirkung grafisch gekennzeichnet. Die Messung des Wassergehaltes war, wie im Diagramm erkennbar, für den Zeitraum von ca. 11:00 bis 12:30 Uhr gestört. Diese Störung hatte jedoch auf die nachfolgenden Auswertungszeiträume keine Auswirkung.

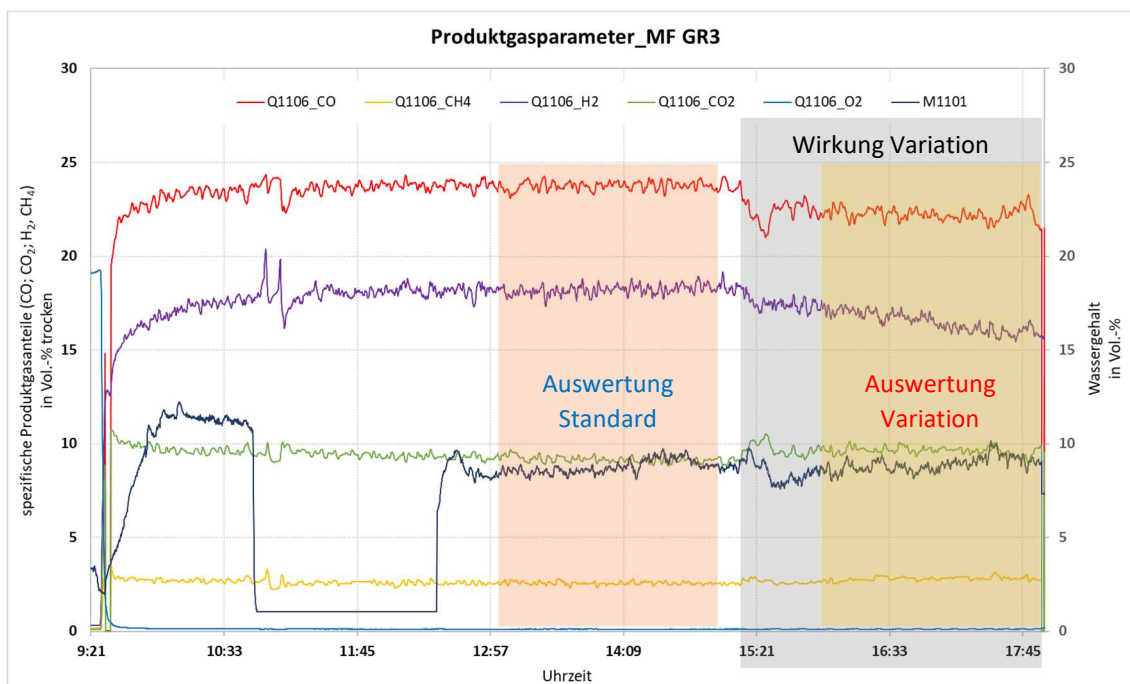


Abb. 8-1 Produktgaszusammensetzung während MF GR3

Der Vergleich der Messdaten erfolgt nur innerhalb der jeweiligen Messfahrt und ihrer Fahrweisen Standard und MDF bzw. GR. Die Daten der Messfahrten können nicht miteinander verglichen werden, da zu den unterschiedlichen Versuchszeitpunkten unterschiedliche Versuchsbedingungen (Brennstoffqualität, Anlageneinstellungen, Kalibrierungen der Messgeräte, äußere Einflüsse) vorhanden waren!

### 8.1 Stoffströme

In den folgenden Kapiteln sind die für den Auswertungszeitraum gemittelten Messwerte der erfassten Stoffströme aufgeführt. Die entsprechenden Diagramme zum Vergleich der Fahrweisen für die einzelnen MF sind in der **Diagrammsammlung** aufgeführt.

### 8.1.1 Brennstoff

Wie in Tab. 8-1 ersichtlich, wurde bei Verwendung des Standardbrennstoffes ein Brennstoffbedarf von ca. 26,3 bis 29,5 kg/h für den jeweiligen Auswertungszeitraum erfasst. Die verwendeten HHS wurden zuvor getrocknet, wobei versucht wurde, einen einheitlichen Wassergehalt zu erreichen (vgl. Kapitel 7.3).

Werden die MF Standard und MDF hinsichtlich des Brennstoffmassenstroms miteinander verglichen, ist erkennbar, dass ein um ca. 0,6 bis 1,5 kg/h gesteigener Brennstoffbedarf bei Einsatz der MDF erfasst wurde. Im Vergleich der MF Standard und GR konnte ein um ca. 0,6 bis 2,4 kg/h ebenfalls signifikant steigender Brennstoffbedarf ermittelt werden. Relativ betrachtet sind dies Steigerungen des Brennstoffbedarfs um bis zu 6 % bei MDF und bis zu 9 % bei GR. Zusammengefasst kann folglich ein höherer Brennstoffbedarf bei Zumischung von MDF und GR festgestellt werden. Die erfassten Brennstoffmassenströme der jeweiligen MF sind als Vergleich grafisch in der **Diagrammsammlung** enthalten.

Tab. 8-1 Brennstoffbedarf bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen

Datum	Fahrweise	Auswertungszeit in h	Brennstoffbedarf		Wassergehalt HHS in Ma.-%
			in kg	in kg/h	
16.10.18	Standard	2,0	55,51	27,8	10,7
16.10.18	MDF1	2,0	56,82	28,4	10,7
22.11.18	Standard	1,5	39,66	26,5	11,8
22.11.18	MDF2	1,5	41,98	28,0	11,8
19.12.18	Standard	2,0	52,66	26,3	10,5
19.12.18	GR1	1,5	43,01	28,7	10,5
16.01.19	Standard	2,0	56,35	28,2	9,5
16.01.19	GR2	2,0	57,60	28,8	9,5
08.02.19	Standard	2,0	58,96	29,5	9,0
08.02.19	GR3	2,0	61,83	30,9	9,0

### 8.1.2 Produktgas / Vergasungsmittel

In Tab. 8-2 werden die ermittelten Produktgasanteile (in Vol.-%, feucht) bei Standard und bei Einsatz der MDF- und GR-Zumischung als Mittelwerte für den jeweiligen Auswertungszeitraum dargestellt. Erkennbar ist der generell bei Einsatz der Brennstoffvariationen niedrigere Anteil an Kohlenmonoxid (CO) und entsprechend höhere Anteil an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Hinsichtlich Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) als weitere Energieträger des Produktgases konnten nur geringe Unterschiede zwischen den Fahrweisen festgestellt werden, die unter Beachtung der Messunsicherheit, für die Auswertung nicht relevant sind.

Tab. 8-2 Produktgaszusammensetzung (in Vol.-% feucht) bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Fahrweise	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
16.10.18	Standard	21,0	15,6	2,5	8,2	0,5	10,7
16.10.18	MDF1	19,7	15,2	2,3	8,5	0,6	11,9
22.11.18	Standard	21,8	16,0	2,4	5,0*	0,5	9,3
22.11.18	MDF2	21,2	15,8	2,0	5,1*	0,7	9,1
19.12.18	Standard	22,2	16,0	2,1	3,3*	0,2	12,7
19.12.18	GR1	21,8	16,4	2,2	3,9*	0,4	9,0
16.01.19	Standard	20,9	16,4	2,3	9,2	0,1	9,8
16.01.19	GR2	19,7	15,6	2,3	9,2	0,1	11,7
08.02.19	Standard	21,7	16,6	2,3	8,4	0,1	8,8
08.02.19	GR3	20,3	15,0	2,5	8,8	0,1	8,9

\*fehlerhafte Kalibrierung, nur zum Vergleich der Fahrweisen in der jeweiligen MF geeignet

Aufgrund der zuvor dargestellten Änderungen der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung der Standard-HHS und der Zumischung von MDF und GR ergaben sich beim Vergleich der Produktgasqualität signifikante Unterschiede des Heizwertes (vgl. Tab. 8-3). Der Heizwert des Produktgases sank bei Zumischung der Materialien relativ um bis zu 10 %, wobei bei allen Variationen ein Abfall des Produktgasheizwertes zu verzeichnen war.

Tab. 8-3 Heizwert des Produktgases bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen

Datum	Fahrweise	Auswertungszeit in h	Heizwert Produktgas	
			in MJ/m <sup>3</sup> (i.N.)	in MJ/kg
16.10.18	Standard	2,0	5,21	5,38
16.10.18	MDF1	2,0	4,93	5,00
22.11.18	Standard	1,5	5,33	5,60
22.11.18	MDF2	1,5	5,11	5,18
19.12.18	Standard	2,0	5,28	5,59
19.12.18	GR1	1,5	4,70	5,03
16.01.19	Standard	2,0	5,23	5,33
16.01.19	GR2	2,0	5,00	5,14
08.02.19	Standard	2,0	5,36	5,51
08.02.19	GR3	2,0	5,09	5,29

Die Volumenströme des Produktgases und des zugeführten Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Die resultierenden Normvolumenströme von Produktgas und Luft sind in Tab. 8-4 aufgeführt. Anhand der erfassten Zusammensetzung und der Massenströme des Brennstoffes und des Vergasungsmittels Luft konnte die Luftzahl der Vergasung berechnet werden. Ebenso wurden die Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motoreintritt kontinuierlich gemessen. Durch die Erfassung der Zusammensetzung und des Volumenstromes des Produktgases wurde die Produktgasleistung (entspricht dem chemischen Produktgasenergiestrom) berechnet und diese für die Versuchsphasen der jeweiligen Messfahrten miteinander verglichen.

Die zuvor beschriebenen Mess- und Berechnungsdaten der jeweiligen Auswertungszeiträume sind zusammengefasst in Tab. 8-4 aufgeführt. Die grafische

Darstellung sowie Vergleich der erfassten und berechneten Werte ist in der **Diagrammsammlung** enthalten.

Im Vergleich zwischen Standard- und MDF-Fahrweise stiegen die Volumenströme des Produktgases um absolut ca. 1 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 2 %). Ein Vergleich der Daten mit den GR-MF ergab ein Absinken des Volumenstroms des Produktgases bei 50%iger Zumischung von GR um absolut 1,6 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 2,5 %). Bei einer Zumischung von 5 bzw. 20 Ma.-% des GR-Materials war der Volumenstrom marginal um absolut 2 bzw. 1 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 3,5 bzw. 2 %) höher als bei Standardfahrweise. Die Volumenströme des Vergasungsmittels waren somit bei allen MF im Vergleich der jeweiligen Fahrweisen vergleichbar. Somit können unter Berücksichtigung der Messunsicherheit keine signifikanten Änderungen der Volumenströme von Vergasungsmittel und Produktgas auch bei unterschiedlicher Zumischungsrate von MDF bzw. GR festgestellt werden.

Da der Heizwert des Produktgases bei Zumischung der Materialien im Vergleich zur Standardfahrweise generell niedriger und der Volumenstrom des Produktgases vergleichbar war, ergab sich ein absolut um bis zu 7 kW (relativ 8 %) niedrigerer chemischer Energiestrom. Generell war bei Zumischung von GR im Vergleich zur Zumischung von MDF eine stärkere Tendenz zum Absinken des chemischen Energiestromes zu erkennen.

Ebenso konnte festgestellt werden, dass die elektrische BHKW-Leistung bei allen Zumischungsvarianten von MDF und GR im Vergleich zum Standardbrennstoff gesunken war (relativ um ca. 5 % bei MDF und ca. 2 bis 6 % bei GR).

Tab. 8-4 Mess- und Berechnungsdaten der jeweiligen MF

Datum	Fahrweise	Auswertungs-zeit in h	Volumenstrom Produktgas in m <sup>3</sup> /h (i.N.)	Volumenstrom Vergasungs- mittel in m <sup>3</sup> /h (i.N.)	Luftzahl	Produktgas- leistung in kW	Elektrische BHKW- Leistung in kW
16.10.18	Standard	2,0	61,0	33,8	0,42	88,2	29,5
16.10.18	MDF1	2,0	62,1	33,9	0,42	84,9	28,0
22.11.18	Standard	1,5	65,0	31,8	0,42	96,3	29,8
22.11.18	MDF2	1,5	65,9	32,0	0,40	93,4	28,2
19.12.18	Standard	2,0	63,1	31,4	0,42	92,5	30,1
19.12.18	GR1	1,5	65,3	31,4	0,38	85,3	29,2
16.01.19	Standard	2,0	61,1	33,6	0,35	88,7	29,2
16.01.19	GR2	2,0	62,3	33,5	0,34	86,5	28,5
08.02.19	Standard	2,0	63,1	34,1	0,34	94,0	29,8
08.02.19	GR3	2,0	61,5	34,0	0,32	87,0	28,0

Die zur weiteren Information und Auswertung erfassten Absolutdrücke in der Gasleitung zwischen Reformer und Motor sowie die eingestellte Leistung des Seitenkanalverdichters für das Vergasungsmittel können ebenfalls der **Diagrammsammlung** entnommen werden.

### 8.1.3 Motorabgas

Im Rahmen der MF wurde kontinuierlich die Zusammensetzung des Motorabgases erfasst. Dabei konnten für die Versuche mit Zumischung von MDF und GR im Vergleich zum Einsatz des Standardbrennstoffes ein unterschiedliches Emissionsverhalten erfasst werden. Die Emissionen sind dabei von der Art des Brennstoffgemisches und von der Zugabeintensität der MDF bzw. GR abhängig. Beispielhaft hierfür ist in Abb. 8-2 der zeitliche Verlauf relevanter Abgasemissionen bei Einsatz des Standardbrennstoffes und ab ca. 15:00 Uhr bei Zumischung (5 Ma.-%) des MDF-Materials dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass mit Zumischung des MDF-Materials die Stickstoffoxidemissionen (NOx) im Vergleich zur Fahrweise Standard fast um den Faktor 2 steigen, wohingegen die weiteren Emissionen wie CO, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Benzol, Formaldehyd oder Ammoniak ein vergleichbares Niveau beibehalten.

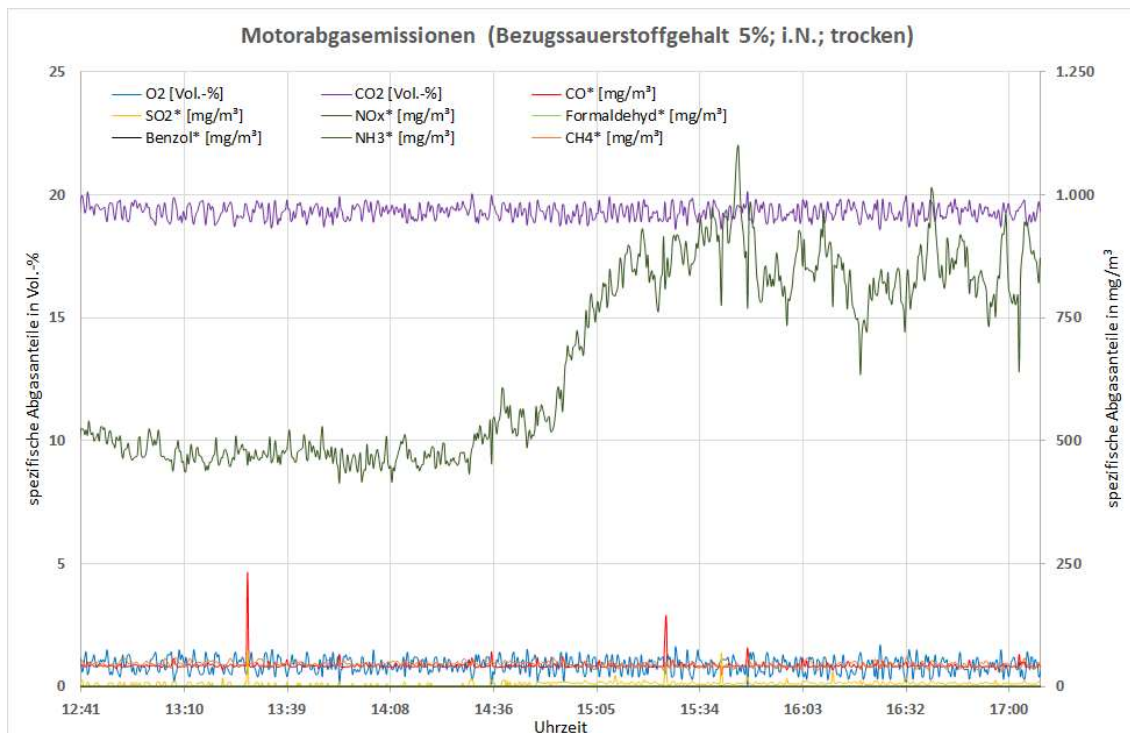


Abb. 8-2 Verlauf der Motorabgasemissionen während der MF Standard / MDF1

In Abb. 8-3 sind die Auswertungszeiträume Standard und MDF (bei Zumischung von 5 bzw. 20 Ma.-%) und in Abb. 8-4 die Auswertungszeiträume Standard und GR (bei Zumischung von 5, 20 bzw. 50 Ma.-%) gemeinsam dargestellt und die relevanten Emissionen auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 5 Vol.-% bei Normbedingungen umgerechnet. Ein direkter Vergleich der relevanten Emissionen für die jeweiligen Auswertungszeiträume der MDF- und GR-Messfahrten kann der **Diagrammsammlung** entnommen werden.

Ersichtlich ist in den Abbildungen, dass mit steigender Zumischungsrate sowohl des MDF- als auch des GR-Materials die Stickstoffoxidemissionen (NOx) sehr stark (um den Faktor 3) ggü. der Standardanwendung anstiegen. Darüber hinaus traten höhere Emissionen von SO<sub>2</sub> und CO bei der Zumischung von GR-Pellets und einer Zugabeintensität von 20 und 50 Ma.-% auf. Die starken Schwankungen der CO-Emissionen sind auf Druckstöße in Folge der mechanischen Gewebefilterabreinigung zurückzuführen. Je beladener der Gewebefilter war, umso größer sind die durch die Abreinigung entstehenden Differenzdrücke in der nachfolgenden Produktgasleitung, die sich somit auch bis hin zum Motorprozess auswirken. Gerade bei den MF GR2 und GR3



und der entsprechend intensiven Zumischung eines aschereichen Brennstoffes (Aschegehalt der Gärrestpellets bei ca. 31 Ma.-% TS) ist das ungereinigte Produktgas sehr stark mit Partikeln beladen, die dann über den Gewebefilter abgeschieden werden müssen. Folglich traten gerade bei diesen Messfahrten zum Zeitpunkt der Filterabreinigung sehr starke Schwankungen der CO-Konzentrationen im Motorabgas auf.

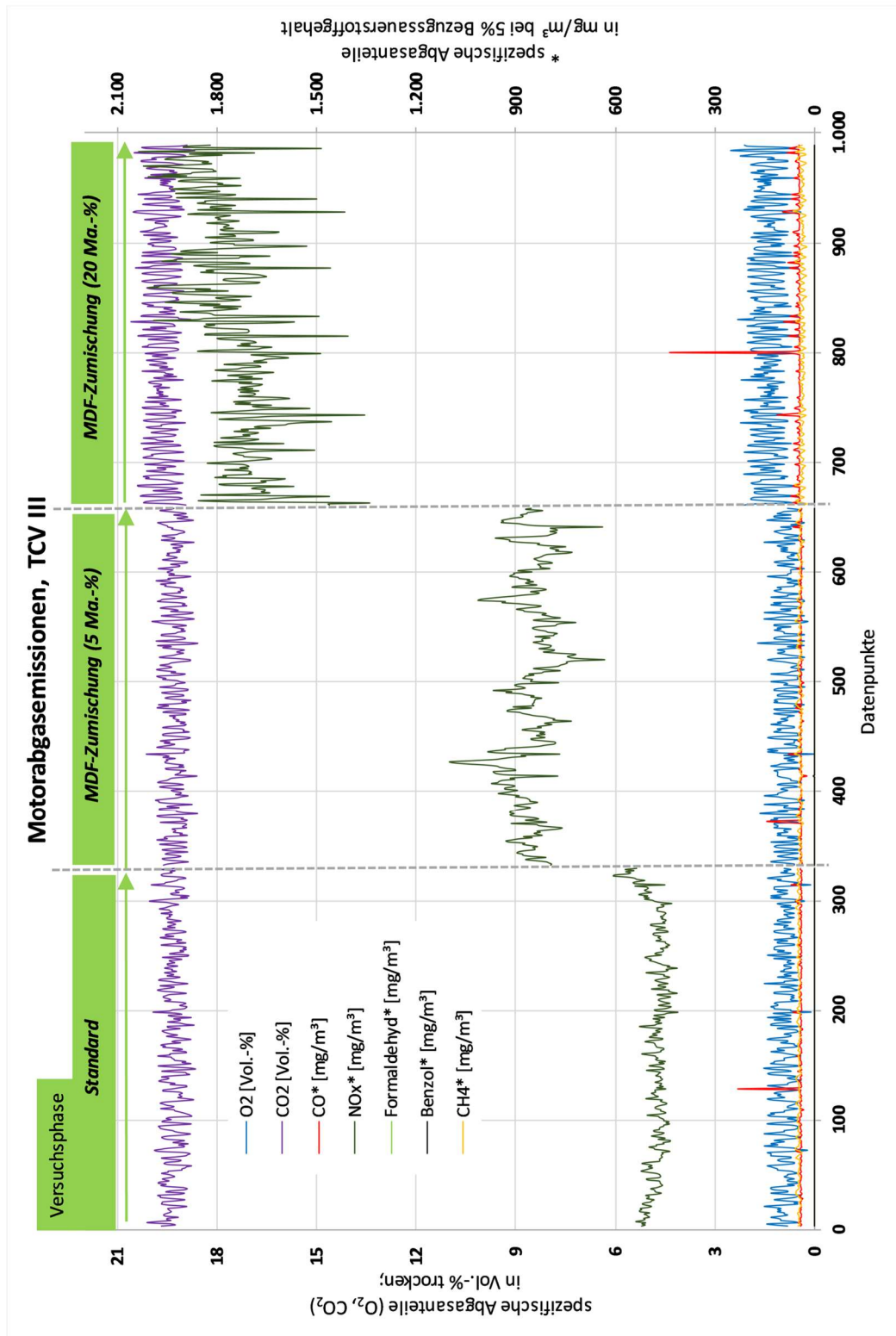


Abb. 8-3 Verlauf der Motorabgasemissionen während der jeweiligen MF Standard / MDF

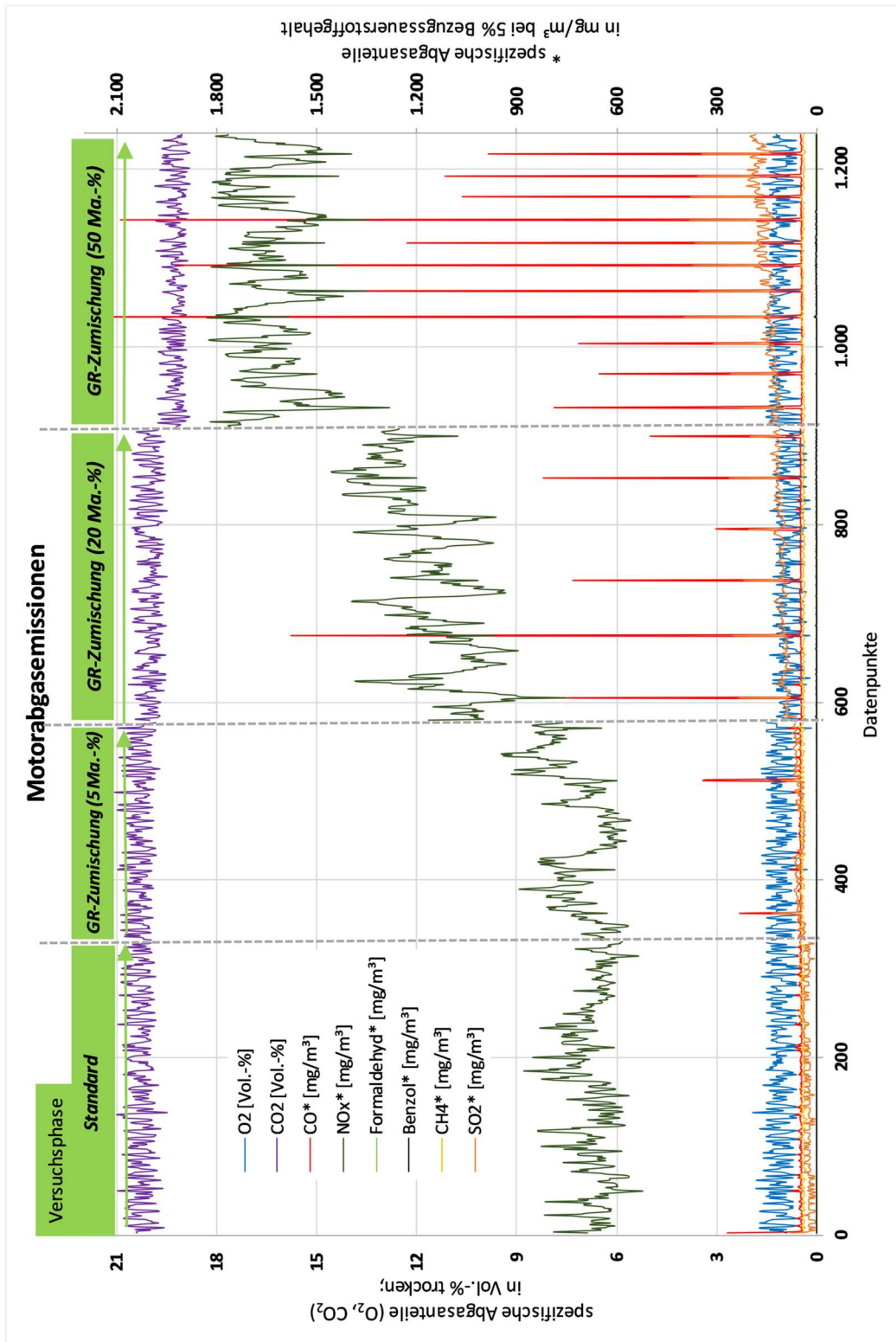


Abb. 8-4 Verlauf der Motorabgasemissionen während der jeweiligen MF Standard / GR

Zusammengefasst sind in Tab. 8-5 die relevanten Emissionen als Vergleich der Fahrweisen innerhalb der MF aufgeführt. Die Emissionen von Formaldehyd, Benzol und Ammoniak wurden ebenfalls erfasst. Es konnten jedoch keine Änderungen dieser

Emissionen zwischen den Fahrweisen festgestellt werden, sodass diese nicht in der Tabelle mit aufgeführt sind. Zu beachten ist weiterhin, dass die aufgeführten NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Einsatz der Brennstoffvariationen über den nach [2] bei diesen Anlagentypen erreichbaren Emissionswerten von 750 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> lagen. Demnach sollten bei einem weiteren Einsatz von MDF bzw. GR zusätzliche Emissionsminderungsmaßnahmen eingesetzt werden. Im Rahmen der hier betrachteten MF wurde eine unregelmäßige Abgasrückführung als primäre und ein Oxidationskatalysator als sekundäre Minderungsmaßnahme eingesetzt.

*Tab. 8-5 Motorabgasemissionen bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume bei 5 % Bezugssauerstoffgehalt, im Normzustand und trocken*

Datum	Fahrweise	NO <sub>x</sub> in mg/m <sup>3</sup>	CO in mg/m <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> in mg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> in mg/m <sup>3</sup>
16.10.18	Standard	479	43	48	3
16.10.18	MDF1	855	43	44	7
22.11.18	Standard	513	48	49	3
22.11.18	MDF2	1.747	51	38	4
19.12.18	Standard	670	48	41	28
19.12.18	GR1	721	52	44	55
16.01.19	Standard	512	48	44	11
16.01.19	GR2	1.164	62	40	108
08.02.19	Standard	524	44	43	1
08.02.19	GR3	1.640	92	42	157

\*fehlerhafte Kalibrierung, nur zum Vergleich der Fahrweisen in der jeweiligen MF geeignet

## 8.2 Störungen

Die während des Anlagenbetriebes ohne Datenauswertung (Anfahrbetrieb und Betrieb direkt nach Umstellung auf MDF oder GR) zu verzeichnenden Störungen hatten keine Auswirkung auf die jeweiligen Auswertungszeiträume der MF. Während MDF2 traten zum Ende der Versuchsphase MDF vermehrt Störungen auf, aufgrund dessen der Versuch abgebrochen werden musste. Die Störungen betrafen vor allem die mechanische Füllstandüberwachung im Reformer. Entsprechend kam es zu Anlagenstillständen aufgrund der Fehlermeldungen „Reformer überfüllt“ und „Reformer leer“. Ersichtlich ist dies am Beispiel des Füllstanddiagramms (blau=Überfüllung, grün=Entleerung) in Abb. 8-5. Der Grund hierfür war eine Brückenbildung des Brennstoffgemisches im oberen Teil des Reformers, die die Bewegung des Füllstandtasters stark beeinträchtigte. Die Brückenbildung wurde wahrscheinlich durch den hohen Anteil des feinen und faserigen MDF-Materials ausgelöst, dass in Verbindung mit den HHS eine Schicht ausbildete. Dadurch kam es zum Blockieren der Füllstandmessung im oberen Teil des Reformers (Meldung „Reformerüberfüllung“) und im unteren Teil des Reformers zu einem Hohlbrand, wodurch die Schicht in unregelmäßigen Abständen zusammenbrach und die nun wieder vertikal frei bewegliche Füllstandmessung einen nahezu freien Reaktionsraum registrierte (Meldung „Reformerentleerung“). Konnte nun für einen definierten Zeitraum nicht mehr genügend Brennstoff in den Reaktionsraum nachgefüllt werden, trat die Anlage in Störung. Da die beschriebenen Störungen vermehrt auftraten, wurde MDF2 vorzeitig abgebrochen.

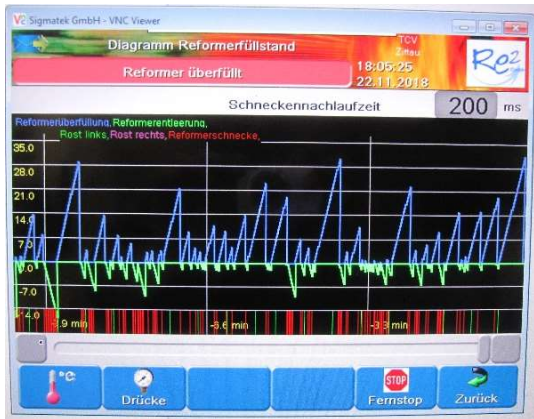


Abb. 8-5 Verlauf der Füllstandmessung im Reformer, MDF2



Abb. 8-6 Detailinnenansicht Reformer mit Brückenbildung durch hohen MDF-Anteil, MDF2

In den folgenden Abbildungen (Abb. 8-8 bis Abb. 8-13) sind Innenansichten des Reformers dargestellt, da nach jeder MF der Reformerdeckel geöffnet und eine visuelle Kontrolle des Reaktionsraumes vorgenommen wurde. In Abb. 8-7 wird die dabei eingenommene Blickrichtung für die Reformerinnenansichten grafisch verdeutlicht.

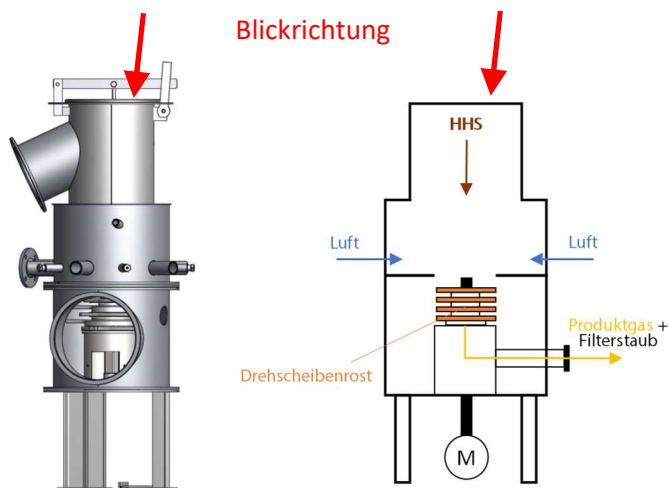


Abb. 8-7 Reformerabbildung und vereinfachtes Schema mit Darstellung der Stoffströme

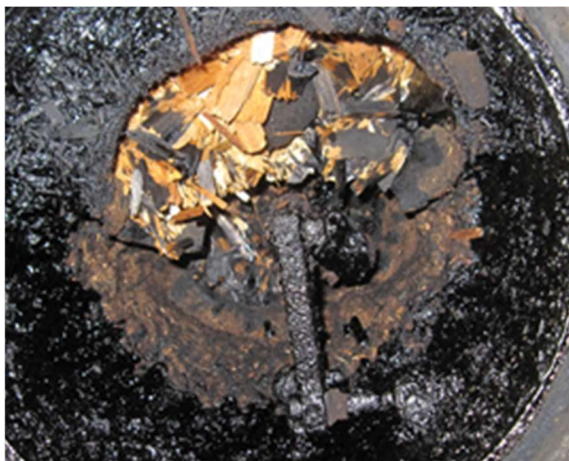


Abb. 8-8 Innenansicht Reformer Standard

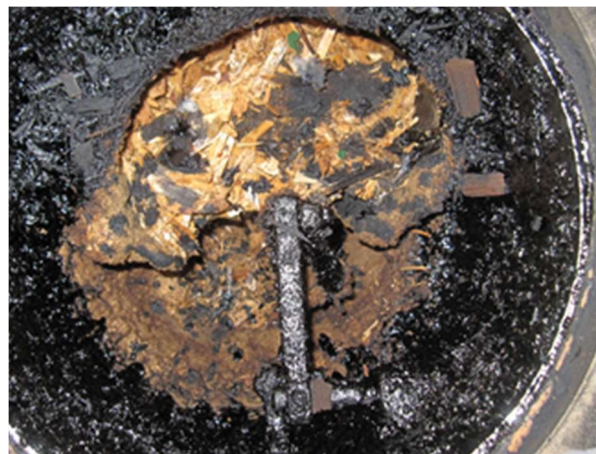


Abb. 8-9 Innenansicht Reformer nach MDF1



Abb. 8-10 Innenansicht Reformer nach MDF2



Abb. 8-12 Innenansicht Reformer nach GR2



Abb. 8-11 Innenansicht Reformer nach GR1



Abb. 8-13 Innenansicht Reformer nach GR3

Dabei konnte nach keiner MF eine äußerlich ersichtliche Verschlackung festgestellt werden. Zu erkennen ist jedoch, dass es im Vergleich der MF deutlich voneinander verschiedene Innenansichten des Reformers nach dem Anlagenbetrieb gab. Während die Innenansichten des Reformers nach MDF1 (Abb. 8-9), GR1 (Abb. 8-11) und GR2 (Abb. 8-12) dem Standardzustand entsprachen, war der Reformerinnenraum nach MDF2 (Abb. 8-10) und nach GR3 (Abb. 8-13) optisch davon abweichend. So bildete sich bei der Zumischung von 20 Ma.-% MDF (MDF2) und den damit verbundenen hohen Feinanteil eine Schicht im oberen Teil des Reformers mit darunterliegenden Hohlbrand aus, die zu den zuvor beschriebenen Betriebsstörungen der Anlage führten. Nach der Zumischung von 50 Ma.-% GR (GR3) war im Reformerinnenraum kein sichtbarer Brennstoff-Feinanteil vorhanden (Abb. 8-13). Die erst später bemerkte Verschlackung nach GR3 ist auch bei der Detailinnenansicht in Abb. 8-15 nicht zu erkennen, da sie sich unterhalb der Luftdüsen ebene befand.

Um evtl. Auswirkungen der MF mit dem MDF-Material auf die nachfolgenden Versuche auszuschließen, wurde nach MDF2 der Reformerinnenraum händisch bis unterhalb der Luftdüsen ebene entleert und anschließend mit Standard-HHS neu befüllt. In Abb. 8-14 sind der entleerte Reformerinnenraum und die freigelegten Luftdüsen im unteren Bereich zu erkennen. Somit können schon evtl. bei den MDF-Versuchen ausgebildete Verschlackungskerne ausgeschlossen werden.



Abb. 8-14 Reformerinnenansicht nach manueller Entleerung bis zur Luftdüsenebene

Bei einem der MF GR3 nachfolgenden Versuch, wurde festgestellt, dass sich wahrscheinlich im Verlauf von GR3 eine signifikante Verschlackungsschicht unterhalb der Luftdüsen ausgebildet hatte und dies einen Normalbetrieb nicht mehr zuließ. Die Schlackeschicht musste daraufhin händisch aufgebrochen und entfernt werden (vgl. Abb. 8-16 und Abb. 8-17 und Abb. 8-18).



Abb. 8-15 Detailinnenansicht Reformer nach GR3



Abb. 8-16 Verschlackung im Reformer nach GR3



Abb. 8-17 Verschlackungsschicht in Höhe der Düsenhöhe im Reformer nach GR3



Abb. 8-18 Verschlackungsklumpen aus dem Reformer nach manueller Entfernung

### 8.3 Betreiberaufwand hinsichtlich Mischung von HHS und Zumischungsmaterialien (MDF, GR)

Die Zugabe der Materialien erfolgte im Rahmen der hier beschriebenen MF manuell. Wie die Zugabe zu den HHS unter der Maßgabe einer möglichst homogenen Mischung vorgenommen wurde, ist in Kapitel 3 beschrieben. Jedoch kann es aufgrund der vorhandenen Brennstofflogistik (Schnecken, Schleusen etc.) nicht ausgeschlossen werden, dass sich unterschiedliche Brennstoffformen wie z.B. HHS und Pellets während der Schneckenbewegung oder beim Schleusenaustrag voneinander entmischen und schlussendlich nicht als homogene Mischung dem Reformer erreichen.

Inwieweit es technisch machbar ist, das Material automatisch dem diskontinuierlichen Brennstoffstrom zuzugeben und dabei die vorgegebene Dosierung und eine hinreichend gute Durchmischung einzuhalten, ist schwer abschätzbar. Der Aufwand für ein solches Verfahren ist jedoch als sehr hoch einzuschätzen, da die Dosierung nur bei aktiver Brennstoffzuführung erfolgen darf und gleichzeitig die homogene Durchmischung gewährleistet werden muss.

### 8.4 Anlagenfahrweise

Das Holzvergaser-BHKW wurde während der jeweiligen Versuche mit identischen Anlageneinstellungen betrieben, um die Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten. Hinsichtlich der Konditionierung der HHS wurden diese in der Trocknungsanlage bis auf einen Wassergehalt von ca. 10 Ma.-% getrocknet (annähernd vergleichbar für alle Messfahrten) und im Rahmen der MDF-Messfahrten außerdem die Feinanteilabtrennung nach dem Tagesbehälter blockiert, sodass die entsprechenden Brennstoffvarianten (Standard, MDF) ungesiebt dem Vergasungsprozess zugeführt wurden. Grobanteile wurden nicht entfernt. Für die GR-Messfahrten war die Feinanteilabtrennung aktiv, da aufgrund des Sieblochdurchmessers keine Gärrestpellets ausgetragen werden konnten. Die Einstellung des mechanischen Füllstandsgebers im Reformer wurde für alle MF mit Hilfe der vorhandenen Lehre justiert und ist somit vergleichbar. Die Leistung des Seitenkanalverdichters für die Ansaugung des Vergasungsmittels Luft wurde während der jeweiligen MF konstant gehalten.

In den folgenden Abb. 8-19 und Abb. 8-20 wird deutlich erkennbar, dass mit hoher Zumischungsrate (bei GR2: 20 Ma.-%, bei GR3: 50 Ma.-%) der GR die Druckdifferenz über den Gewebefilter (blauer Graph) sprunghaft anstieg und dementsprechend das Reinigungsintervall des Gewebefilters deutlich sank. Dies resultiert aus dem hohen Aschegehalt der Gärrestpellets (vgl. Tab. 7-2) und der entsprechend anfallenden großen

Partikelmenge bei den erwähnten MF. Inwieweit diesbezüglich ein kontinuierlicher Einsatz der GR ohne Beeinträchtigung der dauerhaften Gewebefilterwirkung überhaupt möglich ist, müsste in Dauereinsätzen überprüft werden. Durch die mechanische Gewebefilterabreinigung entstehen Druckstöße in der nachfolgenden Produktgasleitung, die somit auch Rückwirkungen auf die BHKW-Leistung und die Motorabgasemissionen haben.

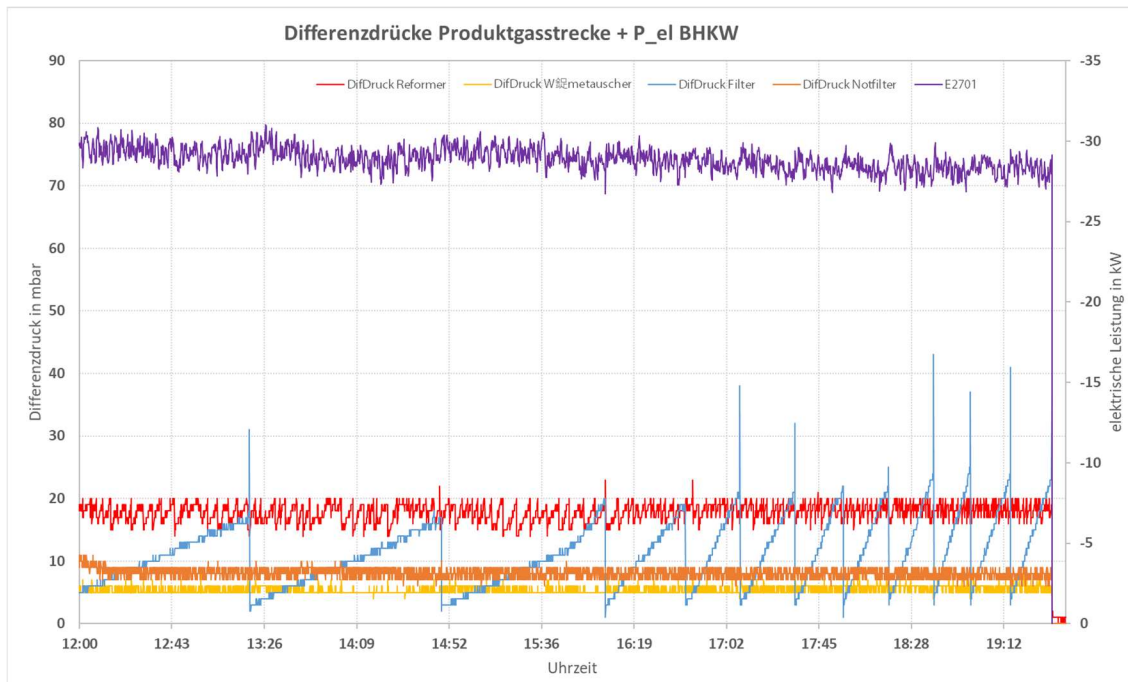


Abb. 8-19 Differenzdrücke und elektrische BHKW-Leistung, MF GR2

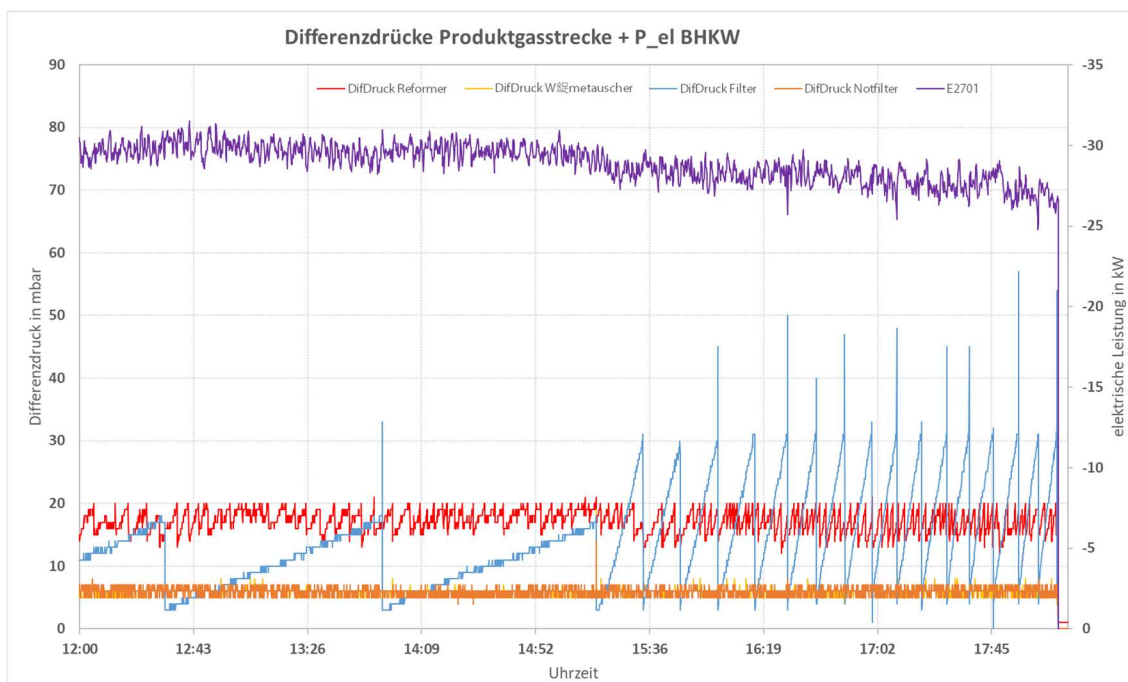


Abb. 8-20 Differenzdrücke und elektrische BHKW-Leistung, MF GR3



Dass im Verlauf der Brennstoffvariationen die elektrische BHKW-Leistung (lila Graph) sank und dieser Trend zum Ende der MF noch nicht abgeschlossen war, lässt sich ebenfalls aus Abb. 8-19 und vor allem anhand Abb. 8-20 erkennen.

## 9 Bewertung der Brennstoffzumischungen von MDF-Material und Gärrestpellets

Für die Bewertung der Brennstoffvariationen werden im Folgenden die erfassten Prozessparameter (Stoffströme, Leistungen, Emissionen etc.) miteinander verglichen. Weiterhin werden neben den Messdaten die Störanfälligkeit und das Leistungsverhalten der Anlage als Bewertungskriterien berücksichtigt.

Hinsichtlich der Austrittstemperaturen des Produktgases aus dem Reformier konnte bei den MF kein Unterschied nachgewiesen werden. Somit wird im Rahmen der Variationen von annähernd identischen Prozesstemperaturen im Reformier ausgegangen. Zusätzlich wurden die BHKW-Leistungen während der jeweiligen MF erfasst, miteinander verglichen und in Tab. 8-4 zusammenfassend aufgeführt. Dabei wird ersichtlich, dass das bei Zumischung der Materialien entstehende energetisch minderwertigere Produktgas zu einer äquivalent geringeren elektrischen Leistung des BHKW führte. Besonders bei Zumischungen von MDF und 50 Ma.-% GR sank die elektrische Leistung um mehr als 5 %. Weiterhin ist es nicht auszuschließen, dass bei längerem Einsatz von MDF bzw. GR ein weiterer Abfall der elektrischen BHKW-Leistung die Folge ist. Wird die Tendenz des Verlaufes der elektrischen BHKW-Leistung in Abb. 8-19 (GR2) und Abb. 8-20 (GR3) betrachtet, muss davon ausgegangen werden, dass bei längerfristigem Einsatz der Zumischmaterialien die Leistung weiter sinkt.

Zu beachten ist außerdem der signifikant gestiegene Brennstoffbedarf bei Einsatz der alternativen Mischungen. Mit Hilfe der Heizwerte von HHS, MDF und GR, der jeweiligen Anteile am Gemisch sowie dem erfassten Brennstoffmassenstrom wurde nun die Feuerungswärmeleistung (FWL) des Holzvergasers berechnet (vgl. Tab. 9-1). Werden neben der FWL und der elektrischen BHKW-Leistung auch die abgegebene Nutzwärme der Gesamtanlage (aus Produktgaskühlung, Motor- und Abgaskühlung) betrachtet, können die Brennstoffausnutzungsgrade berechnet werden. Diese Kennzahl gibt an, welcher Anteil der zugeführten Brennstoffenergie über den Gesamtprozess in Nutzenergien (Strom, Nutzwärme) umgewandelt wurde. Diese wurden für alle Messfahrten und Fahrweisen berechnet und sind in Tab. 9-1 aufgeführt. Einzig für die MF am 19.12.18 konnte keine entsprechende Kennzahl berechnet werden, da die Wärmeleistung der Gesamtanlage nicht erfasst werden konnte.

Erkennbar ist, dass bei Zumischung des MDF-Materials ein deutlich niedrigerer Brennstoffausnutzungsgrad im Vergleich zur Standardfahrweise berechnet wurde. Dieser sank um absolut 4 bzw. 7 % (relativ 6 bzw. 9 %). Die Gründe hierfür liegen im deutlich gestiegenen Brennstoffbedarf und der damit – bei annähernd gleichem Heizwert des Brennstoffgemisches (MDF1, MDF2) – adäquat gestiegenen FWL sowie der gesunkenen elektrischen BHKW-Leistung und der ebenfalls gesunkenen Nutzwärmeleistung.

Da mit dem GR ein Material zugemischt wurde, das einen deutlich niedrigeren Heizwert (13,2 MJ/kg) ggü. den verwendeten HHS (16,6 MJ/kg) und MDF (17,1 MJ/kg) hat, sank der Heizwert des Brennstoffgemisches bei allen GR-Fahrweisen. Somit war die FWL trotz gestiegenem Brennstoffbedarf im Vergleich zur Standardfahrweise bei den GR-Fahrweise niedriger. Da im Vergleich dazu nur ein verhältnismäßig geringer Verlust bei elektrischer BHKW-Leistung und Nutzwärmeleistung zu verzeichnen war, ist der Brennstoffausnutzungsgrad für die MF GR2 und GR3 sogar minimal (um absolut 1 bzw. 2 %) gestiegen (vgl. Tab. 9-1).

Tab. 9-1 Brennstoffausnutzungsgrade bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Fahrweise	Zugabeintensität in Ma.-%	Feuerungswärmeleistung in kW	Nutzwärmeleistung in kW	Brennstoffausnutzungsgrad in %
16.10.18	Standard	-	128,2	69,8	77
16.10.18	MDF1	5	131,2	67,8	73
22.11.18	Standard	-	122,2	68,1	80
22.11.18	MDF2	20	129,9	66,2	73
19.12.18	Standard	-	121,3	k. A.	k. A.
19.12.18	GR1	5	131,0	k. A.	k. A.
16.01.19	Standard	-	130,0	66,1	73
16.01.19	GR2	20	127,4	66,2	74
08.02.19	Standard	-	136,0	67,3	71
08.02.19	GR3	50	127,9	65,1	73

Für Anlagenbetreiber bei denen die untersuchten Rest- und Abfallstoffe anfallen und die diese ggf. entsorgen müssen, wäre es lukrativ, einen möglichst großen Anteil an MDF bzw. GR dem Standardbrennstoff zuzumischen. Damit würden die unter Umständen anfallenden Entsorgungskosten wegfallen und sie könnten vor Ort diese Stoffe sinnvoll verwerten. Hierfür könnte ein geringer Leistungs- und Effizienzverlust der Gesamtanlage gegengerechnet werden. Wie hoch dieser sein kann, ist abhängig von den bisher anfallenden Beseitigungskosten für MDF bzw. GR. Nicht akzeptabel für den Anlagenbetreiber sind dagegen vermehrt auftretende Betriebsstörungen, die aufgrund der Zumischungen hervorgerufen werden. Beispielhaft hierfür sind die Störungen während der MF MDF2 (Schichtenbildung im Reformier) und GR3 (Verschlackung im Reformier), deren Beseitigung einen Stillstand der Anlage über 24 Stunden (Abkühlung + manuelle Entfernung) bedeuten kann. Da jedoch Zumischungen mit einer Intensität von nur 5 oder 10 Ma.-% aufgrund des zusätzlichen Aufwandes und der üblicherweise anfallenden größeren Mengen an MDF und GR nicht favorisiert werden können, liegt das Augenmerk auf Zumischungen >20 Ma.-% bei funktionierender Anlagentechnik. Diese Randbedingung hat im Rahmen der bisherigen Brennstoffvariationen nur die MF GR2 erfüllt. Hierbei konnte bei 20 %-iger Zumischung von GR ein stabiler Anlagenbetrieb nachgewiesen werden. Wobei einschränkend gilt, dass dies nur ein Kurzzeitbetrieb darstellte und längerfristig nicht sichergestellt ist, dass der Gewebefilter die größere Filterstaubmenge ohne Störung abscheiden kann und evtl. Verschlackungen im Reformier aufgrund der relativ niedrigen Ascheerweichungstemperatur der GR nicht auftreten.

In Bezug auf das Vergasungsverhalten konnten sowohl während als auch nach den Versuchsfahrten einige betriebsstörende Einflüsse (z.B. Verschmutzung, Brückenbildung, Verschlackung) durch die eingesetzten Materialien festgestellt werden. Dies betrifft vor allem die hohen Zumischungsraten von 20 Ma.-% bei MDF und 50 Ma.-% bei GR. Dabei gilt zu beachten, dass alle hier betrachteten MF immer nur Kurzeinsätze mit den verschiedenen Brennstoffmischungen darstellen. Inwieweit überhaupt ein dauerhafter Einsatz dieser möglich ist, können nur Langzeitmessfahrten (Laufzeit > 48 Bh) untersuchen. Idealerweise sollte dabei nicht nur vor, sondern auch nach dem Einsatz der Mischungen wieder der Standardbrennstoff eingesetzt werden, um die Auswirkungen der Variationen noch besser detektieren zu können.

In der folgenden Tab. 9-2 wird mit Hilfe der Ergebnisse und Erfahrungen aus den Brennstoffvariationen eine Bewertung über die prinzipielle Einsatzzeignung der getesteten Rest- und Abfallstoffe abgeleitet. Eine Machbarkeit kann als Ergebnis der hier vorgestellten MF nur den jeweils 5 %-igen Zumischungen von MDF und GR zum Standardbrennstoff bescheinigt werden. Wurden die Zugabeintensitäten erhöht, traten vermehrt die zuvor beschriebenen Betriebsprobleme im Reformier auf. Darüber hinaus wurden für diese Fahrweisen im Motorabgas hohe Stickstoffoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) gemessen. Ebenso sank das zeitliche Intervall der Produktgasreinigung über den Gewebefilter aufgrund des in Verbindung mit den GR stehenden hohen Ascheeintrages in den Prozess. Inwieweit dies einen Dauerbetrieb zulässt, sollte in Langzeituntersuchungen analysiert werden.

Tab. 9-2 Bewertung der Zumischungen von MDF und GR

Fahrweise	Zugabeintensität	Machbarkeit	Begründung
MDF1	5 Ma.-%	ja	Keine Störungen
MDF2	20 Ma.-%	nein	Schichtenbildung im Reformier, zu viel Feinanteil, Motorabgasemissionen
GR1	5 Ma.-%	ja	Keine Störungen
GR2	20 Ma.-%	eingeschränkt	Keine Störungen, jedoch hohe Beanspruchung Gewebefilter, Motorabgasemissionen
GR3	50 Ma.-%	nein	Verschlackung im Reformier, Motorabgasemissionen

Zusammenfassend kann als Ergebnis der MF eine Einsatzzeignung der verwendeten Materialien als Zumischung zum Standardbrennstoff nicht nachgewiesen werden. Diese Bewertung erfolgt unter Beachtung der aus Sicht eines Anlagenbetreibers beiden wichtigsten Kriterien:

- Zumischung relevanter Mengen (>20 Ma.-%, entspricht ca. >6 kg/h)
- Keine Beeinträchtigungen des Anlagenbetriebes, die den Betreuungsaufwand des Betreibers maßgeblich erhöhen

Um die Prozessauswirkungen einer veränderten Brennstoffform zu analysieren, ist es geplant, im Nachgang der Brennstoffvariationen weitergehende MF mit Zumischung von DIN-Holzpellets durchzuführen. Ziel ist dabei, evtl. Änderungen allein aufgrund der veränderten Brennstoffgeometrie des Vergasungsverhaltens zu erfassen. Im Rahmen der bisherigen Brennstoffvariationen beinhalteten die Variationen neben der Form (Fasern, Pellets) auch weitere Eigenschaften wie Elementarzusammensetzung, Aschegehalt, Asche-Schmelz-Verhalten etc..

Da die Zumischungen von MDF und GR nur in Form von Kurzzeittests über ca. 3 bis 4 Stunden durchgeführt werden konnten, sollten diese als nächster Schritt über einen längeren Zeitraum eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen ging es primär nur um die Feststellung der prinzipiellen Einsatzzeignung von MDF und GR bei zu variierenden Zugabeintensitäten.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Abschlussbericht „Zittauer Kraftwerkslabor - Thermochemisches Versuchsfeld, 2015; [http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/IPM\\_Abschlussbericht\\_TCV-GESAMT\\_final.pdf](http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/IPM_Abschlussbericht_TCV-GESAMT_final.pdf)
- [2] 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