



## Zwischenbericht

### Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen

Autoren           Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider  
                      Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze  
                      Dipl.-Ing. (FH) Bert Salomo  
                      Dipl.-Ing. (FH) Ralf Pohl  
                      Dipl.-Ing. Steffen Grusla  
                      Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert  
                      Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke

Ausgabe           28.02.2021

Revision           3





Institut für Prozeßtechnik,  
Prozeßautomatisierung  
und Meßtechnik

Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik



Hochschule  
Zittau/Görlitz  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Zwischenbericht

### HORA

# <Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen>

Februar 2021

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Autoren	Roman Schneider, Enrico Titze, Ralf Pohl, Bert Salomo, Steffen Grusla, Prof. Jens Meinert, Prof. 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



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





## Abstract

Der vorliegende Zwischenbericht zum Vorhaben HORA beinhaltet die Darstellung der zwischen dem 01.05.2019 und dem 31.12.2020 durchgeführten Projektarbeiten.

### **FREIGABE**

---

<b>Autoren</b>	R. Schneider; E. Titze; B. Salomo; R. Pohl; S. Grusla; Prof. T. Zschunke; Prof. J. Meinert	<b>Geprüft</b>	Prof. T. Zschunke; Prof. J. Meinert
----------------	--	----------------	-------------------------------------

Freigegeben

---



## Änderungen

Rev	Datum	Name	Änderung(en)
0	05.01.2021	Schneider	Erster Entwurf
1	12.02.2021	Schneider	Bearbeitung
2	22.02.2021	Schneider	Einarbeitung der Zuarbeiten
3	24.02.2021	Schneider	Fertigstellung und Formatierung



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Darstellung der wissenschaftlichen bzw. technischen Ergebnisse ....</b>	<b>13</b>
1.1	Zusammenfassung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse..	13
1.2	Darstellung nach Arbeitseinheiten .....	16
<b>2</b>	<b>Darstellung anderer wesentlicher Ereignisse .....</b>	<b>110</b>
2.1	Veröffentlichungen .....	111
2.1.1	Angabe der bereits erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	111
<b>3</b>	<b>Vergleich des Standes des Vorhabens mit dem ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Finanzierungsplan.....</b>	<b>113</b>
3.1	Einschätzung des Finanzierungs- und Zeitplanes .....	113
<b>4</b>	<b>Darstellung evtl. notwendiger Änderungen in der Zielsetzung.....</b>	<b>115</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse von dritter Seite oder Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind .....</b>	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>Angabe von gemachten Erfindungen, vorgenommenen Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechten .....</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Anwendungsmöglichkeiten und Darstellung der geplanten Verwertung der Projektergebnisse.....</b>	<b>116</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>118</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Karman-Vortex-System, installiert in Ansaugleitung Verbrennungsluft des BHKW .....	17
Abb. 1-2	Prinzipskizze Karman-Vortex-Messsystem [1].....	17
Abb. 1-3	Messblende FMU .....	18
Abb. 1-4	Schema der Radialgebläsestrecke .....	18
Abb. 1-5	Versuchsaufbau Radialgebläsestrecke mit KVS.....	19
Abb. 1-6	Radialgebläsestrecke mit MB.....	19
Abb. 1-7	Funktionsprinzip eines PRANDTL-Rohres [2] .....	19
Abb. 1-8	Differenzdrucksensor LDES250U und Arduino UNO .....	19
Abb. 1-9	Exemplarische Geschwindigkeitsprofile .....	20
Abb. 1-10	Kennlinie Karman-Vortex-System.....	21
Abb. 1-11	Vergleich der Kennlinien der MFU 100-80.....	21
Abb. 1-12	Schematische Darstellung des Motorprozesses .....	22
Abb. 1-13	Massenbilanz MF 24.11.20, Variante 1 .....	22
Abb. 1-14	Massenbilanz MF 24.11.20, Variante 2 .....	23
Abb. 1-15	Massenbilanz MF 24.11.20, Variante 3 .....	23
Abb. 1-16	Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 .....	25
Abb. 1-17	Mikrobrennkammer MB 1500 .....	26
Abb. 1-18	CFK-Ausgangsmaterial - 75fach vergrößert .....	27
Abb. 1-19	aufbereitete CFK-Abfälle (gemahlen + siebklassiert) – 75fach vergrößert	27
Abb. 1-20	Trendverläufe der Reaktortemperaturen bei der Monoverbrennung von gemahlene	29
Abb. 1-21	Trendverläufe der Rauchgasemissionen bei der Monoverbrennung von gemahlene	29
Abb. 1-22	Trendverläufe der Reaktortemperaturen bei der Mitverbrennung von gemahlene	30
Abb. 1-23	Trendverläufe der Rauchgasemissionen bei der Mitverbrennung von gemahlene	30
Abb. 1-24	Grafische Darstellung des stationären Zustandes in Abhängigkeit von T1106 (Gastemperatur	34
Abb. 1-25	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 1 (Vorderansicht) ....	35
Abb. 1-26	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 2 (Vorderansicht oben) .....	36
Abb. 1-27	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 3 (Seitenansicht rechts).....	36
Abb. 1-28	Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 4 (Seitenansicht links) .....	37
Abb. 1-29	Auszug aus dem R&I der Versuchsanlage X5 der Fa. MFC GmbH [7].....	38
Abb. 1-30	Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF.....	39
Abb. 1-31	Darstellung der Messstelle (nach Notfilter) zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung .....	40
Abb. 1-32	Darstellung der Messstelle zur Erfassung des Produktgas-Wassergehaltes .....	40
Abb. 1-33	Nach der MF deinstallierter Filterstaubbehälter zur Abwägung und Probenahme des Filterstaubes.....	40
Abb. 1-34	Nach der MF deinstallierter Rostaschesammelbehälter zur Abwägung der Rostasche .....	41
Abb. 1-35	Nach der MF Probenahme der Rostasche bei laufendem Rost.....	41

Abb. 1-36	Produktgaszusammensetzung während MF MFC-Lang .....	46
Abb. 1-37	Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume .....	48
Abb. 1-38	Verlauf des Wassergehaltes im Produktgas, MF MFC-Lang .....	51
Abb. 1-39	Verlauf der Produktgaszusammensetzung, MF MFC-Lang .....	51
Abb. 1-40	Verlauf der Gastemperaturen (Luft, Produktgas),MF MFC-Lang .....	52
Abb. 1-41	Verlauf der Reaktortemperaturen, MF MFC-Lang .....	53
Abb. 1-42	Verlauf der Absolut- und Differenzdrücke in der Produktgasstrecke, MF MFC-Lang .....	53
Abb. 1-43	Darstellung des Bilanzraumes zur Bilanzierung der Langzeitmessfahrt.....	54
Abb. 1-44	Sankey-Diagramm der Stoffstrombilanz der MF MFC-Lang .....	56
Abb. 1-45	Sankey-Diagramm der Energiebilanz der MF MFC-Lang .....	57
Abb. 1-46	links: Speicherbehälter auf Ständerwerk ;rechts: Kollegin und Kollegen mit viel Interesse und Unterstützung beim Speicheraufbau.....	60
Abb. 1-47	Ansprechen der Temperaturmessstellen im WÜ zeigt eine gleichmäßige Durchströmung – T 8201 und T 8201 messen Vor- und Rücklauf .....	61
Abb. 1-48	Positionierung der Temperaturmessstellen am WÜ des Speichers .....	61
Abb. 1-49	links: SD 1 mit Paraffingranulat (RT70HC) gefüllt; recht: Einfüllen des verflüssigten Salzhydrates (SP70) in den SD 2 .....	62
Abb. 1-50	Isolierte Speicherdemonstratoren in Kaskadenschaltung .....	62
Abb. 1-51	Positionierung der Temperaturmessstellen im PCM.....	64
Abb. 1-52	Temperaturverläufe, Leistung und kumulierte Wärmemenge während der Beladung des SD 2 .....	65
Abb. 1-53	Beladung kaskadierte Speicher im KWL vom 14.01.2020 .....	66
Abb. 1-54	Abkühlkurven/Wärmeverluste von 13.01.2020 bis 17.01.2020 .....	67
Abb. 1-55	Entladung kaskadierte Speicher im KWL vom 17.01.2020 .....	67
Abb. 1-56	links: vormontierter Luvo-Speicher, rechts: mit Thermoelementen versehene Fliesen.....	70
Abb. 1-57	Links: teilbestückter LuVo-Speicher, mitte: an den Heißluftkanal-Versuchsstand gekoppelter und voll bestückter Speicher, rechts: Bezeichnung der Fliesenstapel im Speicher und Darstellung des Strömungsweges .....	71
Abb. 1-58	Isolierter und an den Heißluftkanal angeschlossener LuVo-Speicher ohne Zuleitungsisolierung .....	71
Abb. 1-59	Positionierung der mit Thermoelementen versehenen Fliesen in den Stapeln.....	71
Abb. 1-60	Positionierung der Fluidthermoelemente .....	72
Abb. 1-61	Links: Simulation LuVo-Speicher mit 100 % Luftmassestrom ( $t_{B,100} = 23$ h), rechts: Simulation LuVo-Speicher mit 33 % Luftmassestrom ( $t_{B,33} = 9$ h) .....	72
Abb. 1-62	Messwerte einer Validierungsmessung des LuVo-Speichers mit Luftklappennachführung.....	74
Abb. 1-63	Leistungsverlauf und kumulierte eingespeicherte Wärmemenge des LuVo-Speichers.....	74
Abb. 1-64	Links: Konstruktionsdarstellung des LuVo-Speicher 2 im Halbschnitt; rechts: LuVo-Speicher mit Fliesen bestückt.....	76
Abb. 1-65	Positionierung der mit Thermoelementen bestückten Fliesen im LuVo-Speicher 2.....	76
Abb. 1-66	LuVo-Speicher 2 mit halber Isolierung und Bypass-Verrohrung am Heißluftkanal .....	76

Abb. 1-67	Messwerte einer Validierungsmessung des LuVo-Speicher 2 mit Luftklappennachführung.....	77
Abb. 1-68	Leistungsverlauf und kumulierte eingespeicherte Wärmemenge des LuVo-Speichers .....	77
Abb. 1-69	Mittlere Speichertemperatur während Beladung und anschließender Speicherung von LuVo-Speicher 1 und LuVo-Speicher 2.....	78
Abb. 1-70	Aufstellort der Speicher unter dem Tagesbehälter der Anlage.....	79
Abb. 1-71	R&I-Fließschema der Biomasse-Vergasungs-Anlage, markiert die Anschlussstelle des Speicherkreislaufes .....	80
Abb. 1-72	links Anschlussstelle des Speicherkreislaufes mit Pumpe, MAG und WÜ; recht: gesamter Kreislauf mit Rohrstrecke zu den Speichern unter dem Tagesbehälter .....	80
Abb. 1-73	Schema des Speicherkreislauf, Revision nach erfolgtem Aufbau .....	81
Abb. 1-74	Messdaten einer Speichervermessung am Biomasse-Vergasungs-BHKW .....	82
Abb. 1-75	Startzeiten und Zeiten bis Biomasse-Vergasungs-Anlage stationär.....	84
Abb. 1-76	Kondensat am Schauglas in Produktgasleitung links: ohne Speichereinsatz; rechts: 2 mal zu unterschiedlichen Messfahrten mit Speichereinsatz .....	84
Abb. 1-77	Verlauf des Kondensatvolumens über der Schauglas-/Rohrhöhe.....	85
Abb. 1-78	BHKW mit Oxidationskatalysator und un geregelter AGR .....	88
Abb. 1-79	Ansaugung BHKW mit AGR, Ansicht 1 .....	90
Abb. 1-80	Ansaugung BHKW mit AGR, Ansicht 2 .....	90
Abb. 1-81	Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung, Ansicht 1 .....	91
Abb. 1-82	Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung, Ansicht 2 .....	91
Abb. 1-83	Anordnung und Geometrie der Luftzufuhr .....	92
Abb. 1-84	Anordnung von Umlenklechen und Turbulator innerhalb der Katalysatorstrecke.....	92
Abb. 1-85	Doppel-Kat-System, montiert unter dem BHKW (ohne Isolierung).....	93
Abb. 1-86	Doppel-Kat-System, montiert unter dem BHKW (mit Isolierung).....	93
Abb. 1-87	p,V-Diagramm des Otto-(Gleichraum)-Prozess .....	96
Abb. 1-88	Emissionen BHKW ohne Oxidationskatalysator ohne (A1) / mit (A2) AGR	97
Abb. 1-89	Emissionen BHKW mit Oxidationskatalysator ohne (B1) / mit (B2) AGR ..	98
Abb. 1-90	Emissionen BHKW mit 3-Wege-Kat + Oxi-Kat ohne (C1) / mit (C2) AGR	100
Abb. 1-91	Emissionen BHKW mit Kat-Strecke und Zwischenlufteindüsung ohne (E1) / mit (E2) AGR.....	101
Abb. 1-92	Emissionen BHKW mit Kat-Strecke, Zwischenlufteindüsung und zusätzlichem Oxi-Kat mit AGR (D) .....	103
Abb. 1-93	Auswertung CO-Emissionen .....	104
Abb. 1-94	Auswertung CO-Emissionen (in %) .....	104
Abb. 1-95	Auswertung NOx-Emissionen.....	105
Abb. 1-96	Auswertung NOx-Emissionen (in %) .....	105
Abb. 1-97	Auswertung elektrische Leistung BHKW .....	106
Abb. 1-98	Auswertung elektrische Leistung BHKW (in %) .....	106
Abb. 1-99	Kursdiagramm CO-Emissionen BHKW .....	107
Abb. 1-100	Kursdiagramm NOx-Emissionen BHKW .....	108
Abb. 1-101	Kursdiagramm CO- und NOx-Emissionen BHKW .....	108
Abb. 1-102	Kursdiagramm elektrische Leistung BHKW .....	109
Abb. 3-1	aktualisierter Balkenplan zum Projekt HORA gemäß Änderungsantrag vom 14.10.2020 .....	113

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Übersicht der im Berichtszeitraum durchgeführten Messfahrten im Projekt HORA .....	14
Tab. 1-2	Ergebnisse der Massenbilanzierung.....	24
Tab. 1-3	Mittelwerte der Hauptparameter der Verbrennungsversuche .....	28
Tab. 1-4	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten .....	33
Tab. 1-5	Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme .....	39
Tab. 1-6	Messstellenübersicht mit Bezeichnung und Beispielmesswert .....	42
Tab. 1-7	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten .....	42
Tab. 1-8	Bewertung der Parametervariationen und Parameterauswahl für MF MFC-Lang.....	43
Tab. 1-11	Brennstoffcharakteristika bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang..	46
Tab. 1-12	Vergasungsmittelcharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume.....	47
Tab. 1-13	Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume .....	47
Tab. 1-14	Produktgascharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume	48
Tab. 1-15	Massenströme von Rostasche und Filterstaub bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang .....	49
Tab. 1-16	Übersicht der Mess- und Berechnungsdaten, Teil 1 .....	49
Tab. 1-17	Übersicht der Mess- und Berechnungsdaten, Teil 2 .....	50
Tab. 1-18	Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten der MF MFC-Lang für den stationären Auswertungszeitraum (ca. 22 h) .....	55
Tab. 1-19	Daten der Stoffstrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum der MF MFC-Lang in kg/h .....	56
Tab. 1-20	Daten der Energiestrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum der MF MFC-Lang in kW .....	57
Tab. 1-21	Wirkungsgrade der einzelnen Messfahrten, Mittelwerte für Auswertungszeiträume.....	58
Tab. 1-22	Fluidparameter und zu validierende Speicherparameter .....	63
Tab. 1-23	Parameter für die Definition des Abschluss einer Speicherbeladung.....	63
Tab. 1-24	Ergebnisse der Beladung des SD 2 .....	65
Tab. 1-25	Vorgegebene und geforderte Parameter einer Entladung .....	68
Tab. 1-26	Gemessene Werte der Speichervalidierung von der Messung 14.01. – 17.01.2020.....	68
Tab. 1-27	Gemessene Werte der Speichervalidierung von der Messung 03.12. – 06.12.2019.....	68
Tab. 1-28	Geforderte Parameter eines LuVo-Speichers an den betreffenden Versuchsständen .....	75
Tab. 1-29	Ergebnisse der Simulation und Validierungsmessung (Parameter, welche die Anforderungen nicht erfüllt haben sind rot markiert) .....	75
Tab. 1-30	Ergebnisse der Simulation und Validierungsmessung für den LuVo-Speicher 2 (Parameter, welche die Anforderungen nicht erfüllen sind rot markiert).....	78
Tab. 1-31	Vergleich Messfahrten mit und ohne Speichereinsatz, bei etwa gleichen Rahmenbedingungen.....	83
Tab. 1-32	Emissionsgrenzwerte nach TA Luft 2002 [13] und VDI 3461 [10].....	87
Tab. 1-33	Versuchsmatrix Emissionsminderungen am BHKW .....	95
Tab. 1-34	Auswerteziträume ohne Oxidationskatalysator ohne (A1) / mit (A2) AGR97	

Tab. 1-35	Auswertung Emissionen BHKW ohne Oxidationskatalysator ohne (A1) / mit (A2) AGR .....	97
Tab. 1-36	Auswertezeiträume mit Oxidationskatalysator ohne (B1) / mit (B2) AGR..	98
Tab. 1-37	Auswertung Emissionen BHKW mit Oxidationskatalysator ohne (B1) / mit (B2) AGR .....	99
Tab. 1-38	Auswertezeiträume mit 3-Wege-Kat + Oxi-Kat ohne (C1) / mit (C2) AGR	100
Tab. 1-39	Auswertung Emissionen BHKW mit 3-Wege-Kat + Oxi-Kat ohne (C1) / mit (C2) AGR .....	100
Tab. 1-40	Auswertezeiträume mit Kat-Strecke und Zwischenlufterindüsung ohne (E1 ) / mit (E2) AGR.....	101
Tab. 1-41	Auswertung Emissionen BHKW mit Kat-Strecke und Zwischenlufterindüsung ohne (E1) / mit (E2) AGR .....	102
Tab. 1-42	Auswertezeiträume mit Kat-Strecke, Zwischenlufterindüsung und zusätzlichem Oxi-Kat mit AGR (D) .....	103
Tab. 1-43	Auswertung Emissionen BHKW mit Kat-Strecke, Zwischenlufterindüsung und zusätzlichem Oxi-Kat mit Abgasrezirkulation (D) .....	103
Tab. 1-44	Formaldehyd und Benzol-Emissionen der Vorzugsvariante E .....	105
Tab. 3-1	Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung nach Änderungsbescheid .....	114

## Abkürzungsverzeichnis

### ABKÜRZUNGEN

A	Aschegehalt
AGR	Abgasrezirkulation
AE	Arbeitsetappe
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlefaserverbundwerkstoffe
CH <sub>2</sub> O	Formaldehyd
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen (Ethylen)
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethan
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzol
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CH <sub>4</sub>	Methan
DIN	Deutsches Institut für Normung
dP	Differenzdruck
E	Elektrische Leistung (KKS)
EC	Elektrochemisch
EGS	Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH
F	Volumenstrom (KKS)
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GC	Gaschromatograph
GR	Gärrest
H	Höhe
H	Elementarer Wasserstoff
h	Stunde
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HC oder C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Langkettige Kohlenwasserstoffe
HHS	Holzhackschnitzel
HK	Versuchsstand Heißluftkanal
HP	Holzpellets
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
HORA	Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (Forschungsprojekt)
HVG	Holzvergaser (Vergaser)
IPM	Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
Kat	Katalysator (Abgasnachbehandlung)
Kfz	Kraftfahrzeug
KK	Kühlkreislauf
KKS	Kraftwerk-Kennzeichensystem

KVS	Karman-Vortex-System
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Q	Zusammensetzung (KKS)
LDA	Laser-Doppler-Anemometer
LuVo	Luftvorwärmung
LV	Laborversuche
LWS	Latentwärmespeicher
M	Feuchte/Wassergehalt (KKS)
Ma.	Masse
MB	Messblende
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MF	Messfahrt
MFC	Multifuel Conversion GmbH
$\mu$ GC	Mikro-Gaschromatograph
MGA	Messgasanalysator
Min	Minute
MS	Messstelle
n	Probenanzahl
N	Elementarer Stickstoff
N <sub>2</sub>	Stickstoff
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
O	Elementarer Sauerstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
P	Druck (KKS)
PCM	Phase-Change-Material
PG	Produktgas
PM	Paramagnetismus
PTFE	Polytetrafluorethylen
RB	Rohrbündel
RKW	Rückkühlwerk
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S	Schwefel
SD	Speicherdemonstrator
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SP	Strohpellets
T	Temperatur (KKS)
TBK	Trockenbraunkohle
TCV	Thermochemisches Versuchsfeld
TGA	Thermogravimetrische Analyse
TRL	Rücklauftemperatur
TS	Trockensubstanz
U	Thermische Leistung (KKS)
V*	Volumenstrom
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WEV	Westfälische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH
WRG	Wärmerückgewinnung
WÜ	Wärmeübertrager

# 1 Darstellung der wissenschaftlichen bzw. technischen Ergebnisse

## 1.1 Zusammenfassung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Im Rahmen des Berichtszeitraumes wurden im Projekt HORA

- zur weiteren detaillierten Analyse des Betriebsverhaltens und der Stoff- und Energieströme der Biomassevergasungsanlage,
- für den Einsatz und Auswertung neuer Messeinrichtungen zur Quantifizierung von Stoffströmen,
- zur Integration, Anpassung und Bewertung neuer Komponenten des Versuchsstandes (z.B. KAT-Strecke Motorabgasemissionen, Latentwärmespeicher, Luftvorwärmung, Zyklon zur Staubabscheidung) und
- für den Einsatztest alternativer Brennstoffe

30 Versuchsfahrten am bestehenden Thermochemischen Versuchsfeld (TCV) durchgeführt. 9 dieser Versuchsfahrten beinhalteten u.a. Langzeitmessfahrten zur Brennstoffvariation sowie zur Be- und Entladung der Latentwärmespeicher. Weitere 7 Versuchsfahrten beinhalteten die Integration und Betriebsparameteranpassung einer zusätzlichen Katalysatoreinheit (KAT-Strecke) für die Minimierung der Motorabgasemissionen, die u.a. als Bestandteil einer Masterarbeit durchgeführt wurden. Die Variation möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen in Bezug auf das Motorabgas wurde mit Hilfe der KAT-Strecke im Rahmen von 5 Messfahrten untersucht und wird im Projektverlauf des Vorhabens HORA weiterverfolgt.

Darüber hinaus fanden umfangreiche Tests mit einem neu im TCV integrierten Prototyp zur Festbett-Gleichstrom-Vergasung mit Stroh statt. In 9 dieser Versuchsfahrten wurden im Rahmen der AE1.2 Brennstoffvariationen durchgeführt und einer detaillierten Auswertung unterzogen. Die Ergebnisse dieser sind in dem Forschungsbericht „Strohvergasung“ dargestellt und werden in AE1.2 näher beschrieben.

Für den Überblick sind in Tab. 1-1 alle im hier relevanten Berichtszeitraum durchgeführten Messfahrten mit ihrem jeweiligen Untersuchungsziel dargestellt.

Tab. 1-1 Übersicht der im Berichtszeitraum durchgeführten Messfahrten im Projekt HORA

Datum	Betreffende Anlage	Beschreibung
26.07.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
30.07.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
05.08.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
30.08.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
10.09.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
13.09.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
02.10.2019	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
12.11.2019	Vergaser	Einsatz Laser-Doppler-Anemometer
27.11.2019	Vergaser	Einsatz Laser-Doppler-Anemometer + Partikelmessung im Produktgas
18.12.2019	Vergaser, Trockner	Einsatz Laser-Doppler-Anemometer + Bilanzierung Staubabscheidung Trockner
24.01.2020	Trockner	Bilanzierung Staubabscheidung Trockner
19.02.2020	Vergaser	Einsatztest Landschaftspflegematerial
02.03.2020	Vergaser	Einsatztest Landschaftspflegematerial
05.03.2020	Vergaserprototyp	Betriebstest Anlage und Variation Brennstoff
06.03.2020	Vergaser	Einsatztest Landschaftspflegematerial
09.03.2020	Vergaserprototyp	Betriebstest Anlage und Variation Brennstoff
11.03.2020	Vergaserprototyp	Betriebstest Anlage und Variation Brennstoff
26.05.2020	BHKW	Einsatztest Messstrecke Emissionsminderungen
29.05.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
02.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
04.06.2020	Vergaser	Vergleich Roh- und Reingaszusammensetzung
11.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
12.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
17.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
18.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
19.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
22.06.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
01.07.2020	Vergaser	Einsatz Laser-Doppler-Anemometer
07.07.2020	Vergaser	Einsatztest Landschaftspflegematerial
15.07.2020	Vergaser	Test stationäre Produktgasanalyse
16.07.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
17.07.2020	Vergaserprototyp	Einsatztest Strohpellets mit Parametervariation
27.07.2020	Vergaser, BHKW	Einsatztest holziger Siebrückstand Deponie
25.08.2020	Vergaser, BHKW	Test Beladung Latentwärmespeicher
27.08.2020	Vergaser, BHKW	Entladung Latentwärmespeicher
15.-16.09.2020	Vergaserprototyp	Langzeitmessfahrt Strohpellets
08.-09.10.2020	Vergaserprototyp	Langzeitmessfahrt Strohpellets
27.10.2020	Vergaser, BHKW	Beladung Latentwärmespeicher + Variation Emissionsminderungsmaßnahmen
30.10.2020	Vergaser, BHKW	Ent- und Beladung Latentwärmespeicher + Variation Emissionsminderungsmaßnahmen
05.11.2020	Vergaser, BHKW	Entladung Latentwärmespeicher + Variation Emissionsminderungsmaßnahmen + Brennstoffvariation Macdamianusschalen
12.11.2020	Vergaser, BHKW	Startverhalten Brennstoffvariation Macdamianusschalen
24.11.2020	Vergaser, BHKW	Langzeiteinsatz Brennstoffvariation Macdamianusschalen
27.11.2020	Vergaser, BHKW	Beladung Latentwärmespeicher + Brennstoffvariation Macdamianusschalen
30.11.2020	Vergaser, BHKW	Entladung Latentwärmespeicher + Brennstoffvariation Macdamianusschalen
11.12.2020	Vergaser, BHKW	Brennstoffumstellung von Macdamianusschalen auf Standardbrennstoff HHS

Einen weiteren Schwerpunkt der Tätigkeiten in der AE1.1 bildete die Nutzung und Weiterqualifizierung des vorhandenen Laser-Doppler-Anemometers (LDA) als berührungslose Geschwindigkeitsmessung im Produktgas, die messfahrtbegleitend

eingesetzt wurde und deren Ergebnisse stetig mit denen der bestehenden Messtechnik (Differenzdruckmessung) verglichen wurden.

Die geplanten Arbeiten im Zusammenhang mit dem Karman-Vortex-System wurden durchgeführt und sollen in Form einer Kalibrierung dieses Luftmengenmesssystems an einem neu aufzubauenden Kalibrierversuchsstand, in dem auch das LDA als Referenzmesseinrichtung genutzt werden soll, weitergeführt werden. Dieses System verspricht die berührungslose, verschleißfreie und schnelle Erfassung des Verbrennungsluftvolumenstroms. Ziel für den Versuchsstand zur Biomassevergasung ist es, diese Technologie auf die Anforderungen im TCV weiter zu optimieren, letztendlich einzusetzen und die Datengenauigkeit der bestehenden diesbezüglichen Messeinrichtungen zu überprüfen und diese ggf. zu ersetzen. Die Erkenntnisse beim Einsatz robuster und genauer Volumenstrommesstechnik an Verbrennungsmotoren ist durch ecu.de (eine Marke der Glaubitz GmbH & Co. KG, Zittau) auf Basis eines Letter of Intent (LOI) von wirtschaftlicher Bedeutung.

Die Brennstoffvariationen wurden umfangreicher als geplant durchgeführt. Dies beinhaltet Einsatztests u.a. von Landschaftspflegematerial, holzigen Rückständen aus biologischen Abfällen urbaner Gebiete, Macadamianusschalen sowie Untersuchungen zur Einsatzfähigkeit von Abfällen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK). In diesem Zusammenhang wurden weitere LOI durch die Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH (EGS) und durch die Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (WEV) bekundet, welche auch entsprechende Materialproben für die Einsatztests zur Verfügung stellten. Die Prüfung der Machbarkeit der energetischen Verwertung von Macadamianusschalen als Reststoff der Macadamianussproduktion erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit und in Zusammenarbeit mit der Naturamus GmbH (Tochtergesellschaft der WALA Heilmittel GmbH) und der Klimaschutzorganisation Atmosfair gGmbH. Als Ergebnis dieser Brennstoffvariationen war sowohl der Einsatz von unaufbereitetem Landschaftspflegematerial als auch des holzigen Rückstandes aus der Bioabfallaufbereitung einer Deponie nicht erfolgreich und bedarf weiterer Untersuchungen. Demgegenüber war der Testeinsatz der Macadamianusschalen im Rahmen mehrere Vergasungsversuche (Kurzzeit-, Kaltstart- sowie Langzeitmessfahrten) nach Anpassung einiger Anlagenparameter im Rahmen einer ersten Bewertung erfolgreich und wird weiterverfolgt. Durch den umfangreichen Testeinsatz von Strohpellets im zusätzlich im TCV installierten Prototyp zur Festbett-Gleichstrom-Vergasung der Fa. MFC GmbH konnte die erfolgreiche Vergasung von Stroh nachgewiesen werden, die in bisherigen vergleichbaren technischen Konzepten nicht möglich war.

Im AP2 sind die Arbeitsetappen AE2.1 und AE2.2 gemäß der Planung nahezu vollständig abgeschlossen. Dabei konnten zwei thermische Speicher auf Basis von PCM-Technologie eingerichtet, im Labor validiert, an der Anlage im TCV integriert und im Rahmen von Messfahrten erfolgreich betrieben werden. Ebenso wurde der Speicher zur Vorwärmung des Vergasungsmittels Luft (LuVo-Speicher) im Labor validiert. Als Ergebnis dieser Validierung wurde die Konstruktion und Fertigung eines bautechnisch angepassten neuen LuVo-Speichers vorgenommen und dieser ebenfalls validiert. Die Anlagenintegration dieses optimierten LuVo-Speichers wird aufgrund des Downscaling-Prozesses etwas später als geplant realisiert.

Die technische Umsetzung der Abgasrezirkulation ist erfolgt und wird im Regelbetrieb verwendet. Zur qualitativ und quantitativ besseren Bestimmung der Motorabgaszusammensetzung, insbesondere im Hinblick auf Kohlenwasserstoffe wie Benzol und Formaldehyd, wurde der Einsatz des im Projekt TCV III [11] installierten Fourier-Transfer-Infrarotspektrometer (FTIR) weiter intensiviert und damit die Qualität der Messergebnisse verbessert. Um die Genauigkeit der erfassten

Abgaszusammensetzungen zu bewerten, wurden redundante Untersuchungen mit unterschiedlichen Messgeräten durchgeführt. Bezüglich der Abgasemissionen wurde die neu integrierte Katalysatorstrecke (s.g. KAT-Strecke) getestet und anschließend im Rahmen von Variationen (technischer Aufbau und Betriebsbedingungen) der Emissionsminderungsmaßnahmen eingesetzt. Hierbei konnten mit der emissionsoptimierten Anlagenfahrweise die Emissionen ggü. dem werksseitigen Zustand in Bezug auf Kohlenstoffmonoxid nochmals um bis zu 25 % und bei Stickoxiden sogar um bis zu 80 % reduziert werden. Im Zusammenhang mit den in AE1.2 durchgeführten Brennstoffvariationen wurden ebenfalls die Motorabgasemissionen erfasst und die Einsatzfähigkeit dieser Brennstoffe auch in Bezug auf die aufgetretenen Emissionen bewertet.

## 1.2 Darstellung nach Arbeitseinheiten

### AP1 Systemanalyse und Betriebsvariation

#### AE1.1 Systemanalyse

##### Messungen mit LDA-System

Im Rahmen von HORA fanden seit 05/2019 mehrere Messfahrten statt, die mittels Laser-Doppler-Anemometer (LDA)-Messungen begleitet wurden (vgl. Tab. 1-1). Dabei erfolgten Vergleiche mit der Referenzmessung via Prandtl-Rohr, Vergleiche zwischen einzelnen Messreihen desselben Messtermins sowie Gegenüberstellungen zweier Methoden innerhalb der Auswertesoftware. Der ermittelte Durchfluss stellte sich über alle Messreihen hinweg als relativ konstant bei  $\approx (72...74) \text{ m}^3/\text{h}$  (i.N.) ein. Die relativen Abweichungen zwischen den einzelnen Messreihen einer Messfahrt als auch die relativen Abweichungen zwischen den beiden Auswerteverfahren innerhalb derselben Messreihe lagen bei  $\pm 0,2...0,3 \%$ . Die Messungen konnten somit als sehr reproduzierbar eingeschätzt werden. Bei der Bestimmung der relativen Abweichung der LDA-Messung zur Referenzmessung ergaben sich Werte von  $\pm 2...4 \%$ . In Anbetracht der Tatsache, dass es sich bei der Referenzmessung um eine Einpunktmessung im Zentrum des Rohrquerschnittes handelt und der Durchfluss unter Annahme eines Geschwindigkeitsprofils nach Potenzgesetz berechnet wird, kann von einer akzeptablen Genauigkeit der aktuellen Durchflussbestimmung ausgegangen werden. Eine detaillierte Darstellung von Vorgehensweise, Auswertung und Ergebnissen folgt im Endbericht des Projektes. Zur Problematik der LDA-Messungen in Holzvergasersystemen ist darüber hinaus eine Veröffentlichung geplant.

##### Kalibrierung eines Karman-Vortex-Systems zur Volumenstrommessung

###### Motivation und Ziel

Zur Bestimmung des vom BHKW angesaugten Verbrennungsluftvolumenstromes werden bisher Messblenden (MB) der Fa. Lindab eingesetzt. Diese Messgeräte sind kostengünstig, besitzen jedoch einen relativ großen systematischen Messfehler. Diese hohen Unsicherheiten bei der Messung erschweren eine zuverlässige Bilanzierung des Holzgas- Verstromungsprozesses.

Ziel dieses Versuches ist daher die Kalibrierung eines Karman-Vortex- Messsystems (KVS) unbekannter Charakteristik für den Einsatz als Messgerät für die vom BHKW angesaugte Verbrennungsluft. Weiter soll eine Kennlinie der eingesetzten MB ermittelt und die Auswirkung bei Verwendung der Kennlinien auf die Massenbilanzierung untersucht werden.

### Beschreibung der Messsysteme

Von der Fa. Glaubitz GmbH & Co. KG wurde ein KVS von Mitsubishi Electric mit der Typenbezeichnung E5t05371 / 449 / 5629 zur Verfügung gestellt. Diese KVS werden, vor allem in japanischen Kraftfahrzeugen (Kfz), als Luftmassenmesser eingesetzt. Abb. 1-1 zeigt das Messsystem installiert im Ansaugkanal des BHKW.

Beim KVS handelt es sich um einen Wirbeldurchflussmesser, bei dem durch einen in die Fluidströmung eingebrachten Störkörper stromabwärts Wirbel gebildet werden (sog. Kármánsche Wirbelstraße, Abb. 1-2). Die Wirbelfrequenz ist dabei direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Die Erfassung der Wirbelfrequenz kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen (z.B. mittels Hitzdraht, Piezo-Drucksensoren, Ultraschallmessung). Weiter sind Sensoren für die Ansauglufttemperatur sowie den Luftdruck vorhanden, woraus sich in Kombination mit dem Volumenstrom der Massestrom berechnen lässt. In Kfz wird diese Berechnung vom Steuergerät ausgeführt.



Abb. 1-1 Karman-Vortex-System, installiert in Ansaugleitung Verbrennungsluft des BHKW

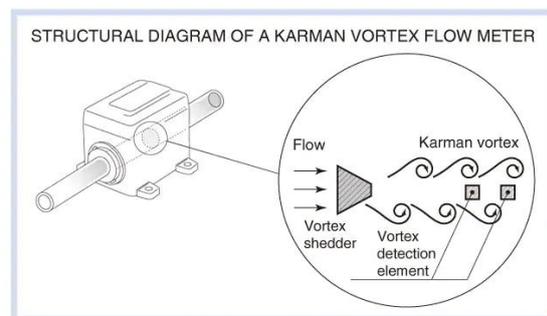


Abb. 1-2 Prinzipskizze Karman-Vortex-Messsystem [1]

Zur Bestimmung des Luftmassenstromes werden am BHKW bisher MB FMU 100-80 der Fa. Lindab eingesetzt (Abb. 1-3). Die Messung erfolgt mittels Differenzdruckverfahren: eine Querschnittsverengung in der MB führt zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, wodurch stromabwärts ein geringerer statischer Druck herrscht. Die Differenz der jeweils vor und nach der Querschnittsverjüngung gemessenen Drücke, der sog. Wirkdruck, wird mittels eines Drucksensors SDP1000-L05 der Fa. Sensirion aufgenommen. Dieser Sensortyp arbeitet thermisch: vor und nach einer Wärmequelle werden die Fluidtemperaturen gemessen; aus der Differenz kann der den Sensor durchströmende Fluidstrom bestimmt werden. Mit dem daraus resultierenden Spannungssignal  $U_{Sensor}$  und der Kennlinie des Sensors in Verbindung mit der Kennlinie der MB kann der Volumenstrom folgendermaßen berechnet werden:

$$\dot{V} = 7,32 * \left( \left( \frac{125Pa * (U_{Sensor} - 0,25)}{3,75} \right)^{\frac{1}{2}} \right) * 3,6 \quad \text{Formel 1-1}$$



Abb. 1-3 Messblende FMU

### Durchführung

Das zu untersuchende Messsystem ist saugseitig an einem Radialgebläse LRA 200 der Firma ULT installiert (Abb. 1-4). Die Drehzahlvariation erfolgt über ein Potentiometer; die Frequenz des Motors kann über eine SUB-D9-Buchse mittels Digitalmultimeter abgegriffen und in eine Drehzahl umgerechnet werden. Druckseitig ist eine 1,5 m lange Rohrstrecke (DN 75) angeschlossen, in deren Rohrende ein PRANDTL-Rohr (Durchmesser Sondenkopf 2 mm) ragt. Mithilfe eines Höhenreißers kann dieses vertikal verschoben und somit eine sog. Netzmessung vorgenommen werden (Abb. 1-5, Abb. 1-6).

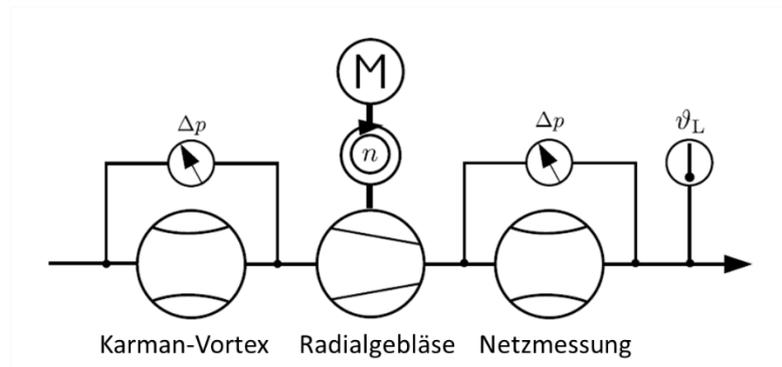


Abb. 1-4 Schema der Radialgebläsestrecke



Abb. 1-5 Versuchsaufbau Radialgebläsestrecke mit KVS



Abb. 1-6 Radialgebläsestrecke mit MB

Die Referenzmessung des Volumenstromes erfolgt mit einem PRANDTL-Rohr. Mit diesem lässt sich über eine Öffnung entgegen der Strömungsrichtung der Gesamtdruck sowie über seitliche Bohrungen der statische Druck der Fluidströmung bestimmen (Abb. 1-7). Die Differenz der Drücke ergibt den dynamischen Druck (Staudruck), aus welchem sich dann die Strömungsgeschwindigkeit errechnen lässt. Gesamt- sowie statischer Druck werden über einen Differenzdrucksensor LDES250U der Fa. First Sensors aufgenommen (Abb. 1-8). Dieser ist verbunden mit einem Kleinstrechner (Arduino UNO), welcher über die Software MATLAB angesteuert wird und eine Anzahl von  $n = 1000$  Messpunkten aufnimmt (Dauer ca. 1 min). Zur Auswertung wird der Mittelwert über die 1000 Messpunkte gebildet.

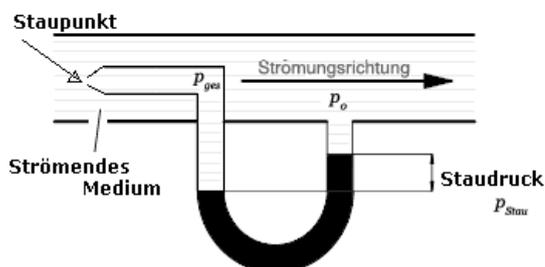


Abb. 1-7 Funktionsprinzip eines PRANDTL-Rohres [2]

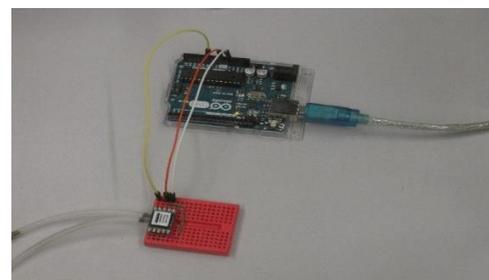


Abb. 1-8 Differenzdrucksensor LDES250U und Arduino UNO

Die Messung der Frequenz des KVS erfolgt mit einem Digitalmultimeter 3415 der Fa. PeakTech. Dieses ist via USB mit dem Messrechner verbunden; über die Software DMMTool lässt sich das Signal mit einer Frequenz von 3/s erfassen. Hier wird zur Auswertung der Mittelwert über 1 min herangezogen.

Die Messung des Differenzdruckes der MB erfolgt mit einem Druckstecker FDA 612 SR für ein Handgerät Almemo 2590 der Fa. Ahlborn. Die Messwertaufnahme erfolgt mit einer Frequenz von 1/s. Zur Auswertung wird ein Mittelwert über min. 20 s herangezogen.

Die Frequenz des Radialgebläses wird im Bereich 100 – 340 Hz mit einer Schrittweite von 20 Hz variiert. Das entspricht einer Drehzahl von 3000 – 10200 Umdrehungen pro Minute. Mit der Netzmessung mittels PRANDTL-Rohr wird nun das Geschwindigkeitsprofil für jeden Betriebspunkt des Radialgebläses bestimmt (Abb. 1-9). Dazu wird der Rohrquerschnitt in konzentrische, gleich große Flächen geteilt; die Schnittpunkte der Messgeraden mit den Schwerlinien der einzelnen Teilflächen ergeben die Messpunkte. Für diese Untersuchungen wurde eine vertikale Messgerade gewählt sowie der Messquerschnitt in neun Kreisringflächen unterteilt. Über den Rohrquerschnitt ergeben sich so 18 Messpunkte, an denen das PRANDTL-Rohr mit Hilfe des Höhenreißers positioniert wird. Aus den gemessenen dynamischen Drücken an den jeweiligen Messpunkten lassen sich mit Hilfe der BERNOULLI- Gleichung die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten berechnen. Nach einer Korrektur der Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrwandnähe lässt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung der Volumenstrom bestimmen [3], [4].

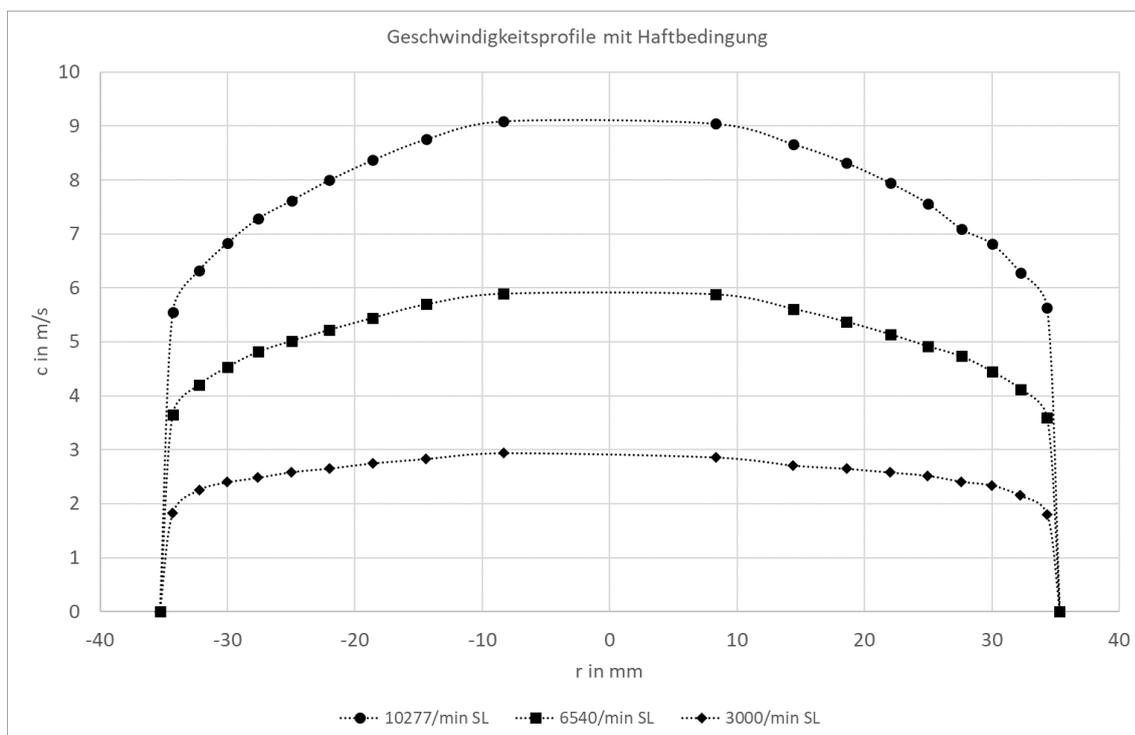


Abb. 1-9 Exemplarische Geschwindigkeitsprofile

### Ergebnisse und Auswertung

Abb. 1-10 zeigt die mittels Netzmessung ermittelte Kennlinie des KVS. Abb. 1-11 zeigt den Vergleich der Kennlinien der MB MFU 100-80. Die orange gefärbte Ausgleichsfunktion entspricht der Angabe des Herstellers, die blau gefärbte Funktion ist die mittels Netzmessung ermittelte Kennlinie. Deutlich zu erkennen ist hierbei, dass mit steigenden Differenzdrücken die Abweichung zwischen den laut Herstellerkennlinie ermittelten zu den tatsächlich vorhandenen Volumenströmen zunehmen.

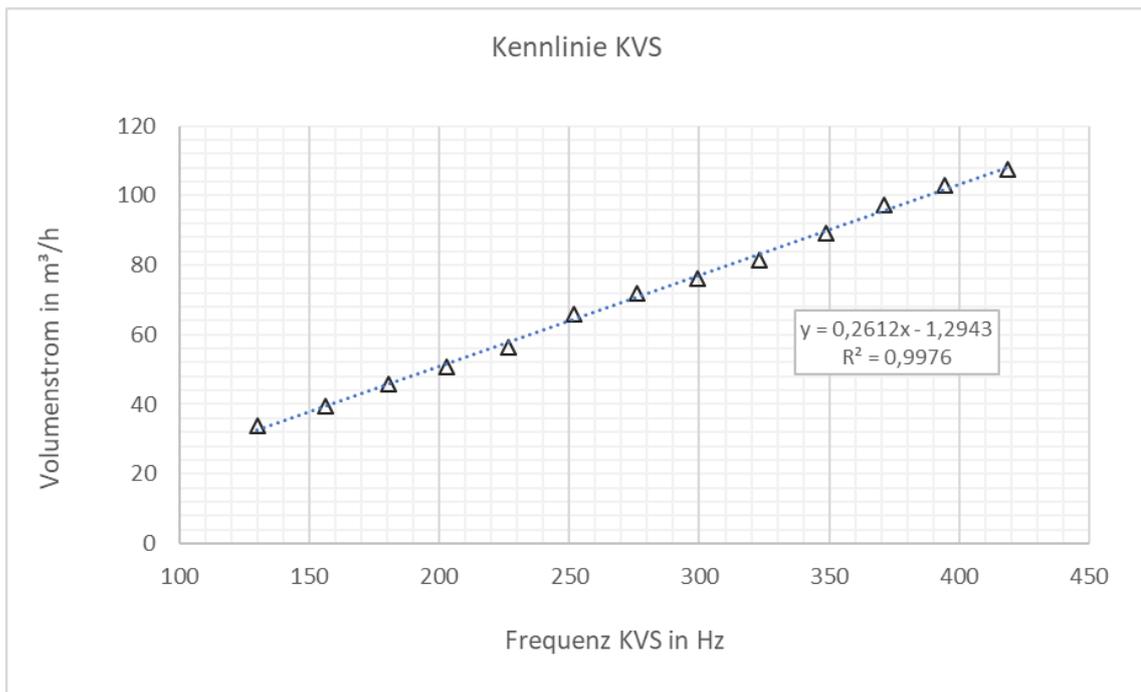


Abb. 1-10 Kennlinie Karman-Vortex-System

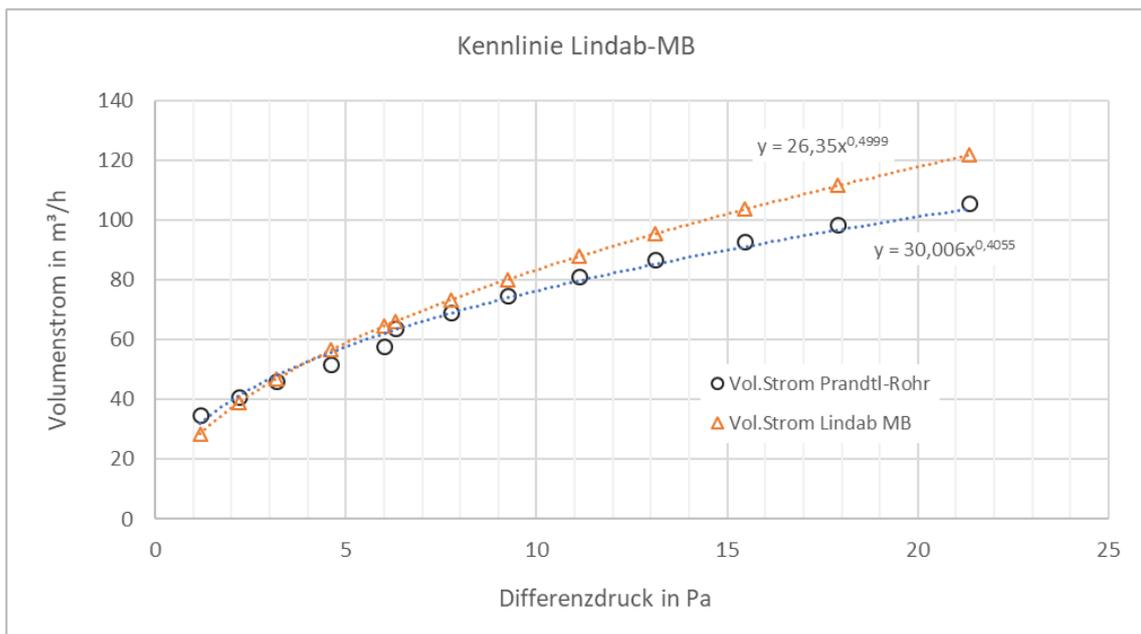


Abb. 1-11 Vergleich der Kennlinien der MFU 100-80

Um den Einfluss der verschiedenen Volumenstrommessgeräte bzw. deren Kennlinien zu veranschaulichen, wurden für eine exemplarische Messfahrt (MF) vom 24.11.2020 drei Varianten von Massenbilanzierungen um den Motorprozess erstellt. In Abb. 1-12 wird das Schema des Motorprozesses gezeigt. Verbrennungsluft wird über das KVS (F2203) sowie über MB 1 (F2201) angesaugt. Als nächstes folgt die Zumischung der Abgasrezirkulation (AGR) und eine erneute Messung des Volumenstromes mittels MB 2 (F2202). Der Massenstrom der AGR ergibt sich aus der Differenz der Massenströme zwischen MB 2 und MB 1. Mit einem Staurohr erfolgt die Bestimmung des Abgasvolumenstromes (F2301), erst danach erfolgt die Entnahme des AGR-

Volumenstromes. Der angesaugte Produktgasmassenstrom sowie der Abgasmassenstrom sind für alle drei Varianten identisch.

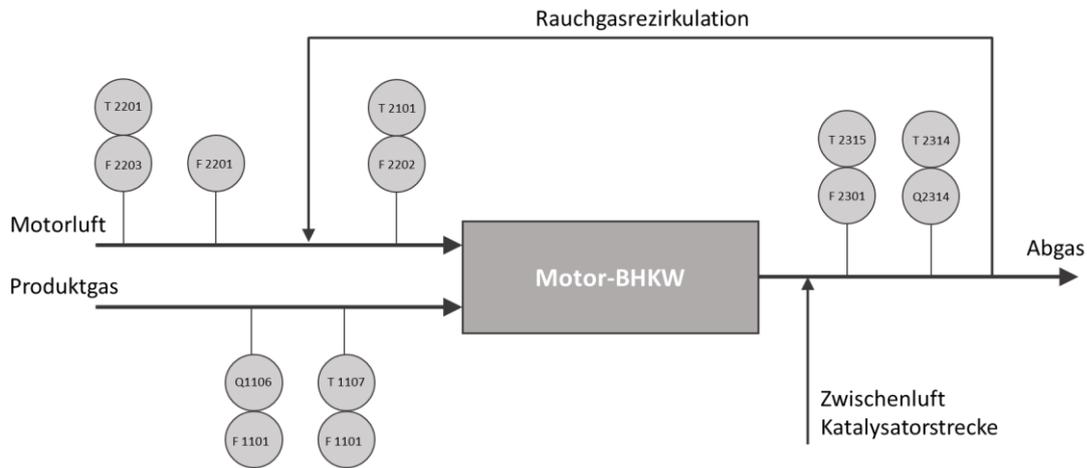


Abb. 1-12 Schematische Darstellung des Motorprozesses

Variante 1 der Massenbilanzierung entspricht dem derzeitigen IST- Zustand (Abb. 1-13). Die Bestimmung des Verbrennungsluftmassenstromes erfolgt über die beiden MB anhand der Kennlinie des Herstellers. Es ergibt sich ein relativ großer Bilanzfehler von 26,8 % (Tab. 1-2).

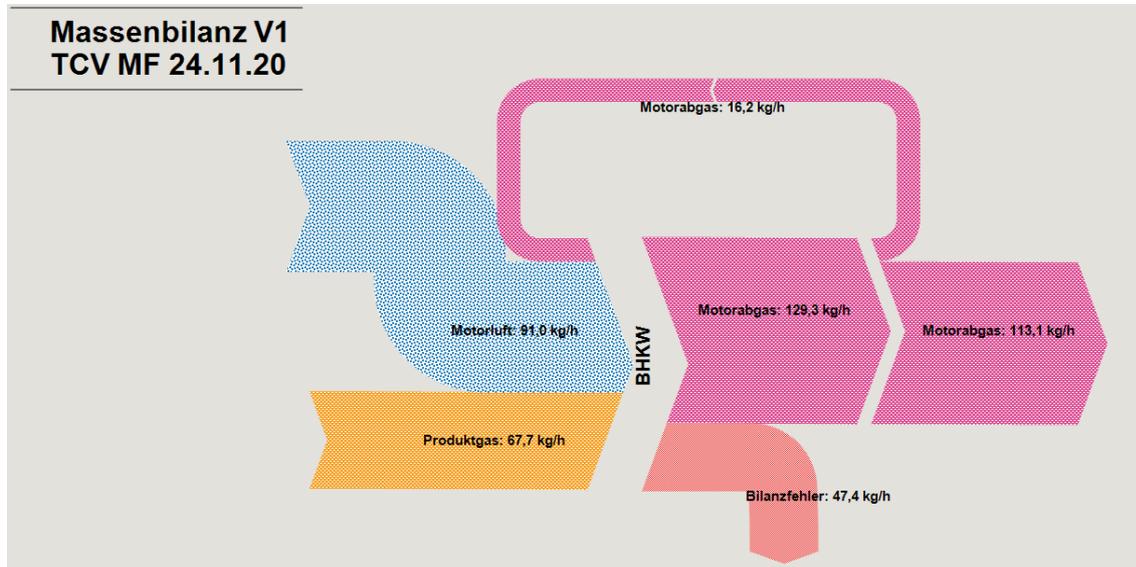


Abb. 1-13 Massenbilanz MF 24.11.20, Variante 1

In Variante zwei wurde die innerhalb dieser Untersuchung ermittelte Kennlinie für die beiden MB zur Bilanzierung herangezogen. Deutlich zu erkennen ist eine Verringerung der Massenströme der angesaugten Motorluft sowie der AGR. Daraus resultiert ein, gegenüber Variante 1, leicht gesunkener relativer Bilanzfehler von 21,7 % (Tab. 1-2).

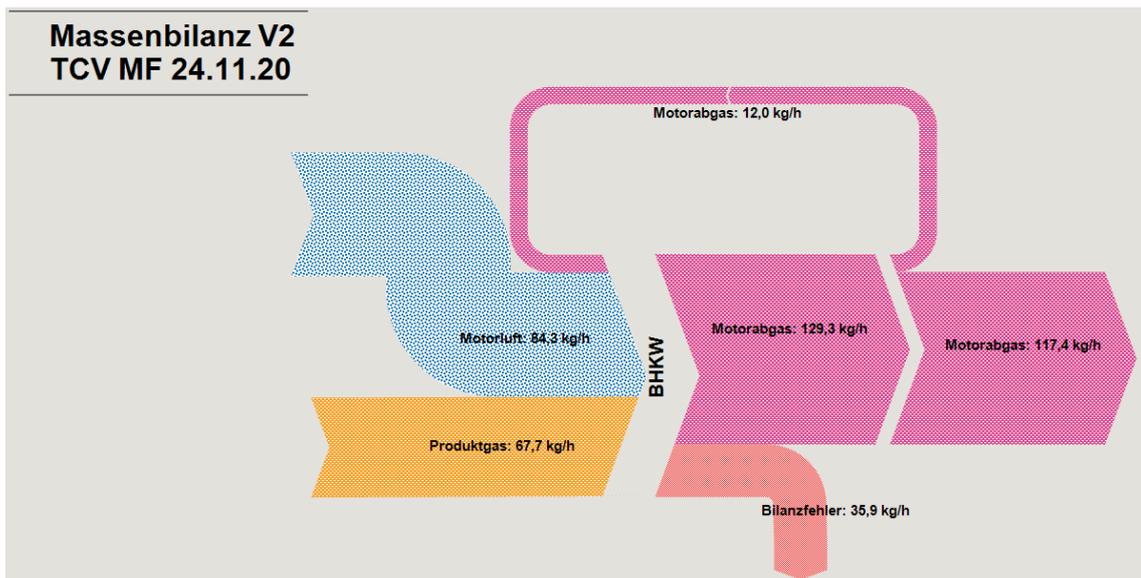


Abb. 1-14 Massenbilanz MF 24.11.20, Variante 2

Eine weitere Verringerung des Bilanzfehlers wird bei Verwendung des KVS erreicht (Abb. 1-15). Der angesaugte Massenstrom beträgt ca. 83 % des mit der MB laut Herstellerkennlinie ermittelten Massenstromes. Der AGR- Massestrom ist identisch mit dem der Variante 2 (modifizierte Kennlinie), da außer den zwei MB keine weitere Möglichkeit besteht, diesen messtechnisch zu erfassen.

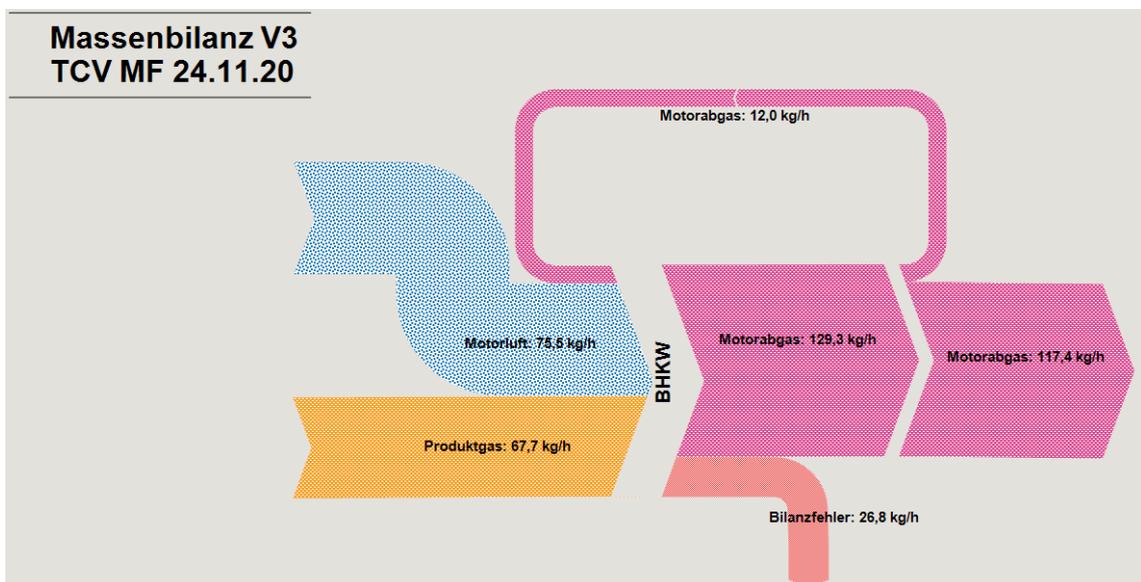


Abb. 1-15 Massenbilanz MF 24.11.20, Variante 3

Es konnte gezeigt werden, dass die standardmäßig eingesetzten MB eine so große Messunsicherheit besitzen, dass eine zufriedenstellende Bilanzierung nicht möglich ist. Obwohl sich unter Nutzung des kalibrierten KVS der rel. Bilanzfehler um ca. 10 % verringern ließ, ist dieser mit 17,2 % immer noch sehr hoch. Eine geringe Verbesserung dürfte über eine exaktere Ermittlung des AGR- Massenstromes zu erreichen sein, da mit den MB trotz modifizierter Kennlinie weiterhin deutlich höhere Volumenströme gemessen werden als mit dem KVS. Weiterhin liegt bei MB 2 eine veränderte

Gaszusammensetzung vor, deren Einfluss auf das Messergebnis schwer abzuschätzen ist. Einen weitaus größeren Einfluss auf die Qualität der Bilanzierung könnten die Volumenstrommessungen des Produkt- und Abgases darstellen. Beide Volumenströme werden mit PRANDTL-Sonden bestimmt, und aufgrund der Einbausituation pauschal mit einem Wert von 0,85 korrigiert (da nur punktuelle Messung in Rohrmitte, Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils über dem Rohrquerschnitt). Bereits geringe Abweichungen von diesem Faktor können einen großen Einfluss auf die jeweiligen Massenströme haben. Weiter sind Verschmutzungen der PRANDTL- Sonde im Abgaskanal möglich, die das Messergebnis verfälschen.

Tab. 1-2 Ergebnisse der Massenbilanzierung

Variante	Produktgas	Motorluft	AGR	Motorabgas	Bilanzfehler	Bilanzfehler
Einheit	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	%
1	67,7	91,0	16,2	129,3	47,4	26,8
2	67,7	84,3	12,0	129,3	35,9	21,7
3	67,7	75,5	12,0	129,3	26,8	17,2

## AE1.2 Variation Brennstoff und Vergasungsmittel

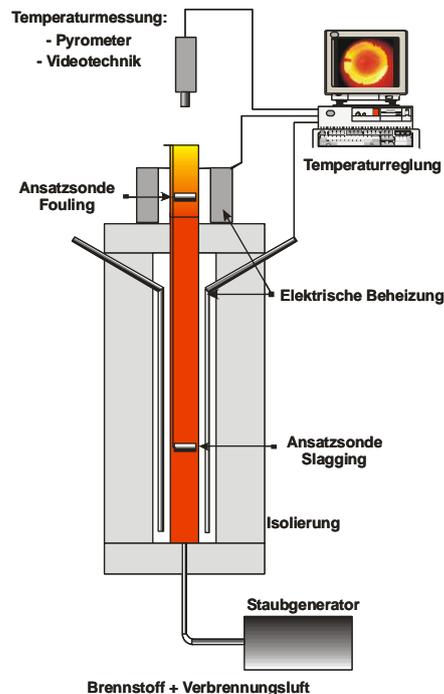
### CfK-Verbrennung

Unter Nutzung des vorhandenen Biomasse-Vergasungs-BHKW im TCV des Zittauer Kraftwerkslabors an der Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG) soll die Erweiterung des nutzbaren Brennstoffspektrums von Biomassevergasungsanlagen u.a. mit Abfällen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK) untersucht werden. Zwecks Minimierung des Versuchsaufwandes und des -risiko sowie der Versuchsplanung beim Einsatz dieser CFK-Abfälle in der Vergasungsanlage wurden verbrennungstechnologisch orientierte Untersuchungen mit CFK-Abfällen an zwei spezialisierten Testapparaturen (Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 und Mikrobrennkammer MB 1500) durchgeführt. Dabei wurde versucht, durch eine realistischere Abbildung feuerungstechnischer Bedingungen im Vergleich zu den Grundlagenuntersuchungen (z.B. Laboranalysen, Verbrennung im Fallrohr, thermochemische Berechnungen) Schlussfolgerungen aus dem Experiment auf das Verhalten der industriellen Anlagen zu ermöglichen.

Keine verkleinerte Modellfeuerung spiegelt die realen Phänomene in ihrer Gesamtheit korrekt wider. Durch die bewussten und erzwungenen Abweichungen und Vereinfachungen des Modells gegenüber dem Original werden aber die erheblichen Schwierigkeiten einer verallgemeinerungsfähigen Bewertung großtechnischer Versuchsreihen etwas überschaubarer gestaltet. Dem Ziel, Einzeleffekte besser verstehen und bewerten zu können, dient ein gestuftes Versuchsprogramm.

Beide eingesetzten Apparaturen unterscheiden sich durch die Modellierungstiefe der realen Prozessabläufe in einer großtechnischen Feuerung, die bewusst beim Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 geringer gewählt wurde mit dem Vorteil, sehr gut vergleichbare, standardisierte Parameterstudien absolvieren zu können. Der Reaktor verbraucht geringe Brennstoffmengen (max. 100 g Trockensubstanz pro Einzelversuch). Bei diesem Untersuchungsverfahren wird auf feuerungstechnische Funktionselemente, wie getrennter Brennstoff- und Lufteintrag, spezielle Brennergeometrien und Luftstufung verzichtet. Die aufbereitete Brennstoffprobe wird gleichmäßig verteilt in einem elektrisch beheizten isothermen Rohrreaktor bei einem festgesetzten Sauerstoffüberschuss in der Flugstaubwolke verbrannt.

Bei den durchzuführenden Versuchen mit CFK-Abfällen wird die Apparatur dazu benutzt, den Einfluss der thermischen Belastung der Brennkammer (Feuerraumtemperatur) auf das Abbrandverhalten im Feuerraum und deren eventuelle Auswirkungen auf die Gas- und Staubemissionen zu untersuchen. Mit drei Messpunkten bei 1000 °C, 1100 °C und 1200 °C Brennkammertemperatur soll die Temperatursensibilität des Abbrandverhaltens untersucht werden.



#### Technische Daten:

##### Abmessungen (Höhen ab Brenneraustritt):

- Innendurchmesser: 30 mm
- Höhe Brennkammer: 750 mm
- Höhe Nachbrennkammer: 550 mm
- Gesamthöhe: 1300 mm

- Höhe Probekörper Slagging: 350 mm
- Höhe Probekörper Fouling: 1050 mm

Thermische Leistung: 0,5 - 1 kW  
Leerrohrgeschwindigkeit: 1,0 - 1,5 m/s

Aufenthaltszeit bis Probe Slagging: ~ 0,30 s  
Aufenthaltszeit bis Probe Fouling: ~ 0,90 s  
Aufenthaltszeit bis Austritt Reaktor: ~ 1,20 s

Verbrennungstemperatur regelbar: 800 – 1500 °C  
Temperatur Nachbrennkammer (Probekörper) regelbar: 800 – 1100 °C

Abb. 1-16 Mikroverbrennungsreaktor MR 1500

Die Abgas-Sauerstoffkonzentration im MR 1500 wird höher eingestellt als in einer realen Feuerung. Hintergrund ist, dass trotz der idealisierten Verbrennung Bedingungen geschaffen werden müssen, die mit der Großtechnik vergleichbar sind. Für das Abbrandverhalten ist generell die Partikeltemperatur und nicht die umgebende Rauchgastemperatur ausschlaggebend. Die zum Teil erhebliche Differenz wird vom örtlichen Sauerstoffpartialdruck und weiteren Einflussgrößen gesteuert. Mit der gewählten Luftbeaufschlagung wird versucht, Zonen mit hohem Sauerstoff-Brennstoff-Verhältnis zu simulieren, wie sie in der realen (immer schlecht gemischten) Feuerung auftreten. Eine Konsequenz dieser Simulation ist jedoch, dass Auswirkungen von zonal reduzierender Rauchgasatmosphäre auf die Kohlenstaubverbrennung am MR 1500 nicht abgebildet werden (bei der hier verwendeten Versuchsgestaltung). Dafür stehen die Untersuchungen an der Mikrobrennkammer MB 1500 zur Verfügung. Die anvisierten Brennkammertemperaturen sind wegen der unterschiedlichen Sauerstofffahrweise nicht direkt auf die Großfeuerung übertragbar. Der Bereich überstreicht aber ein reales Feuerraumverhalten zwischen stark gekühlter und thermisch hoch belasteter Brennkammer.

Der zweite zum Einsatz gekommene Versuchsreaktor, die Mikrobrennkammer MB 1500, wurde mit dem Ziel einer wesentlich detailgetreueren, experimentellen Abbildung des realen großtechnischen Feuerungsverhaltens konzipiert. Dabei werden Informationen zum rauchgasseitigen Emissionsverhalten der Feuerung und zu Auffälligkeiten des Brennstaubes hinsichtlich Zünd- und Abbrandverhalten geliefert. Im Gegensatz zum MR 1500 werden Brennstoff und Verbrennungsluft über einen Rundstrahlbrenner

(Drallbrenner mit innerer Versperrung), wie er auch großtechnisch im Einsatz ist, der Brennkammer zugeführt. Damit ist eine realitätsnahe Staubverbrennung mit entsprechendem Temperatur-Verweilzeit-Verlauf (respektive Temperatur-Aufenthaltsort-Verlauf) gewährleistet. Folglich erfährt auch das Brennstoffpartikel eine Historie entlang des Feuerungsweges, die der großen Feuerung nahekommt. Wesentliche prozessbestimmende Parameter werden, angelehnt an eine großtechnische Referenzanlage, abgebildet: Luftstufung (auf eine Ebene Ausbrandluft konzentriert), Brennerluftverhältnis, Gesamt-Luftverhältnis bzw. Sauerstoffkonzentration im Abgas. Brennereinstellung und Position der Ansatzsonde sind so abgestimmt, dass vollständiger Brennstoffausbrand bis zum Brennkammerende für die meisten Brennstoffe gewährleistet ist. Das Temperaturniveau im simulierten Feuerraumbereich wird durch die Relation zwischen Brennstoffleistungseintrag und geregelter Wärmeabfuhr auf ein mittleres Feuerungsniveau eingestellt. Die Verweilzeitproblematik sehr kleiner Staubfeuerungen ist grundsätzlich ein Diskussionsthema. Bei der Auslegung wurde darauf Wert gelegt, durch Abstimmung von Strömungsgeschwindigkeit, Reaktionsweg und Kornspektrum der Versuchskohlen die notwendigen Kriterien einzuhalten. Bei den Brennkammerversuchen sollte im Gegensatz zum Reaktor MR 1500 die thermische Belastung des simulierten Feuerraumes konstant gehalten, dafür aber die sogenannte Brennerluft-Fahrweise (Luftverhältnis am Brenner  $\lambda_{Br}$ ) zwischen zwei praxisrelevanten Zuständen variiert werden. Hintergrund ist, dass in der jüngeren Vergangenheit bei verschiedenen Betreibern mit sehr unterschiedlichen Feuerungsproblemen versucht wird, unter Beibehaltung des Gesamt-Luftverhältnisses mehr Luft auf die Hauptbrennerebene zu Lasten der anteiligen Ausbrandluftmenge zu geben.

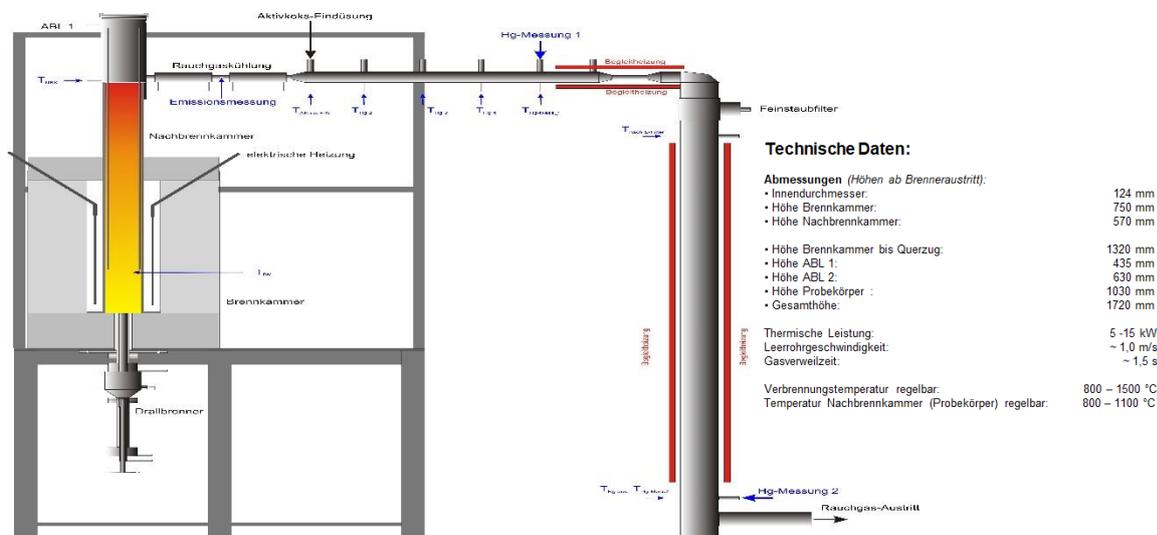


Abb. 1-17 Mikrobrennkammer MB 1500

Die CFK-Abfälle auf Epoxidharzbasis mit einer Stückgröße von maximale 80 mm wurden durch die UVR-FIA GmbH Freiberg mit einer Zielkorngröße < 200  $\mu\text{m}$  gemahlen und siebklassiert. Technisch bedingt weisen die enthaltenen Faserbündel eine Länge bis zu mehreren Millimetern auf. Die nachfolgenden Abb. 1-18 und Abb. 1-19 zeigen Mikroskop-Aufnahmen des Ausgangsmaterials vor und nach der Aufbereitung (Mahlung + Siebklassierung).

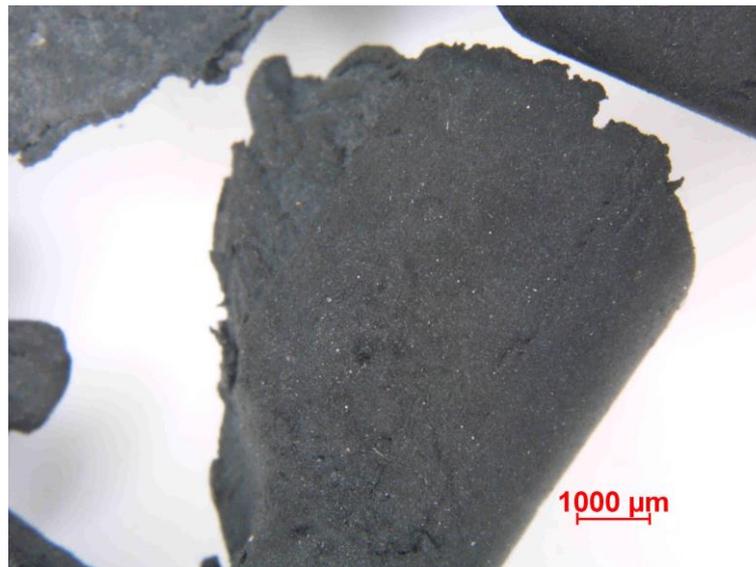


Abb. 1-18 CFK-Ausgangsmaterial - 75fach vergrößert

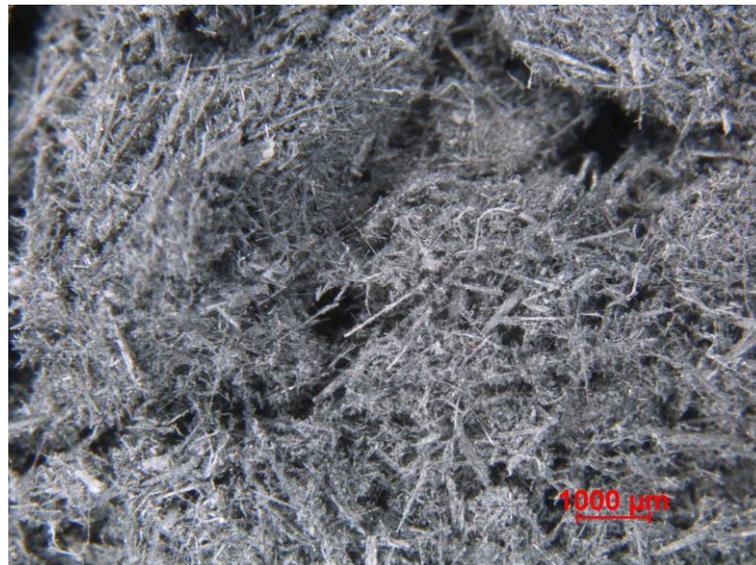


Abb. 1-19 aufbereitete CFK-Abfälle (gemahlen + siebklassiert) – 75fach vergrößert

Insbesondere Abb. 1-19 zeigt die strukturellen Abweichungen (Fasern) der gemahlten und siebklassifizierten CFK-Abfälle von der „klassischen“ Schüttung fester Brennstoffe (z.B. Trockenbraunkohle TBK).

Eine durchgeführte Analytik (TGA 701) der untersuchten CFK-Abfälle ergab nachfolgende Zusammensetzung:

Wasser:	1,53 Ma.-%
Flüchtige:	45,32 Ma.-%
Cfix:	54,31 Ma.-%
Asche:	1,84 Ma.-%

### Versuchsdurchführung

Vor dem Beginn der geplanten Versuche am Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 erfolgten Untersuchungen zum Eintrag der für die Versuche aufbereiteten CFK-Abfälle in den Verbrennungsreaktor. Die schlechten Fließeigenschaften der Abfälle bedingt durch ihre faserige Struktur gestatteten keine kontinuierliche Staubdispergierung und damit Dosierung des Brennstoffes in den Verbrennungsreaktor, so dass die Versuche am Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 nicht realisiert werden konnten.

Am 10.01.2020 erfolgten Verbrennungsversuche an der Mikrobrennkammer MB 1500 bei Einhaltung nachfolgender technologischer Hauptparameter:

- Verbrennungstemperatur (Temperatur Brennkammer) ~ 1.100 °C
- Gesamtluftverhältnis  $\lambda \sim 1,15$  (entspricht einem Sauerstoffgehalt im Rauchgas von 2,73 Vol.-% trocken)

Im Vorfeld der Untersuchungen durchgeführte Dosierversuche der CFK-Abfälle unter Nutzung des für größere Massenströme geeigneten Staubdispergiereinsatzes SAG 410/H zeigten vorerst zufriedenstellende Ergebnisse. In weiteren Vorversuchen wurde der maximal dosierbare Brennstoffmassenstrom für die CFK-Abfälle bestimmt. Dieser Brennstoffmassenstrom reicht jedoch nicht aus, das Gesamtluftverhältnis des Verbrennungsprozesses auf technisch sinnvolle Werte von ca.  $\lambda \sim 1,15$  bei den Standardluftmengen der Brennkammer zu erreichen. Auch starke Reduzierungen der Verbrennungsluftmengen bis zur technisch möglichen Untergrenze (geltend für die Versuchsbrennkammer) ermöglichten keine Annäherung an das Zielluftverhältnis.

Trotz dieser Einschränkungen erfolgte am 10.01.2020 ab 10:28 Uhr ein Verbrennungsversuch (CFK 001) der CFK-Abfälle. Der Versuchszeitraum wurde auf Grund der begrenzt zur Verfügung stehenden Brennstoffmasse auf 45 Minuten festgesetzt. Zwecks weiterer Reduzierung des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas und damit des Verbrennungsluftverhältnisses erfolgte in einem zweiten Versuch (CFK 002) die Mischung der CFK-Abfälle mit Trockenbraunkohlenstaub (TBK) in einem Massenverhältnis von 50%/50%. Die großvolumigen, faserigen und mit geringer Schüttdichte behafteten CFK-Abfälle begrenzten auch bei diesem Versuch den maximal dosierbaren Brennstoffmassenstrom, so dass nach 10 Minuten Versuchszeitraum der Versuch abgebrochen wurde. An der Stelle des in Abb. 1-17 dargestellten Feinstaubfilters erfolgte der Einsatz einer Messung der Staubkonzentration im Rauchgas mittels des gravimetrischen Staubmessgerätes Gravimat SHC-5 der Firma SICK AG.

### Versuchsergebnisse

Die nachfolgende Tab. 1-3 sowie die Abb. 1-20 bis Abb. 1-23 zeigen die Mittelwerte bzw. Trendverläufe der gemessenen Hauptparameter (Temperaturen, Zusammensetzung des trockenen Rauchgases) für die durchgeführten Verbrennungsversuche. Die in den Trendverläufen des Versuches CFK 001 fehlenden Daten für den Zeitraum 10:44 Uhr bis 10:48 Uhr resultieren aus einer Störung der Brennstoffdosierung. Dieses Datenmaterial wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt und somit nicht dargestellt.

Tab. 1-3 Mittelwerte der Hauptparameter der Verbrennungsversuche

Versuch	T_Brennkammer in °C	T_Nachbrennkammer in °C	T_Rauchgas Austritt in °C	O <sub>2</sub> in Vol.-% tr	CO <sub>2</sub> in Vol.-% tr	CO in ppm tr
CFK 001	1.099	507	81	17,64	2,64	0
CFK 002	1.125	503	67	15,83	4,03	0

Die Trendverläufe der Messwerte, insbesondere der Rauchgasanalytik ( $O_2$  und  $CO_2$ ), zeigen einen instabilen zeitlichen Verbrennungsablauf resultierend aus Schwankungen im Brennstoffdosiersystem hervorgerufen durch das nahezu nicht vorhandene Fließvermögen der aufbereiteten CFK-Abfälle.

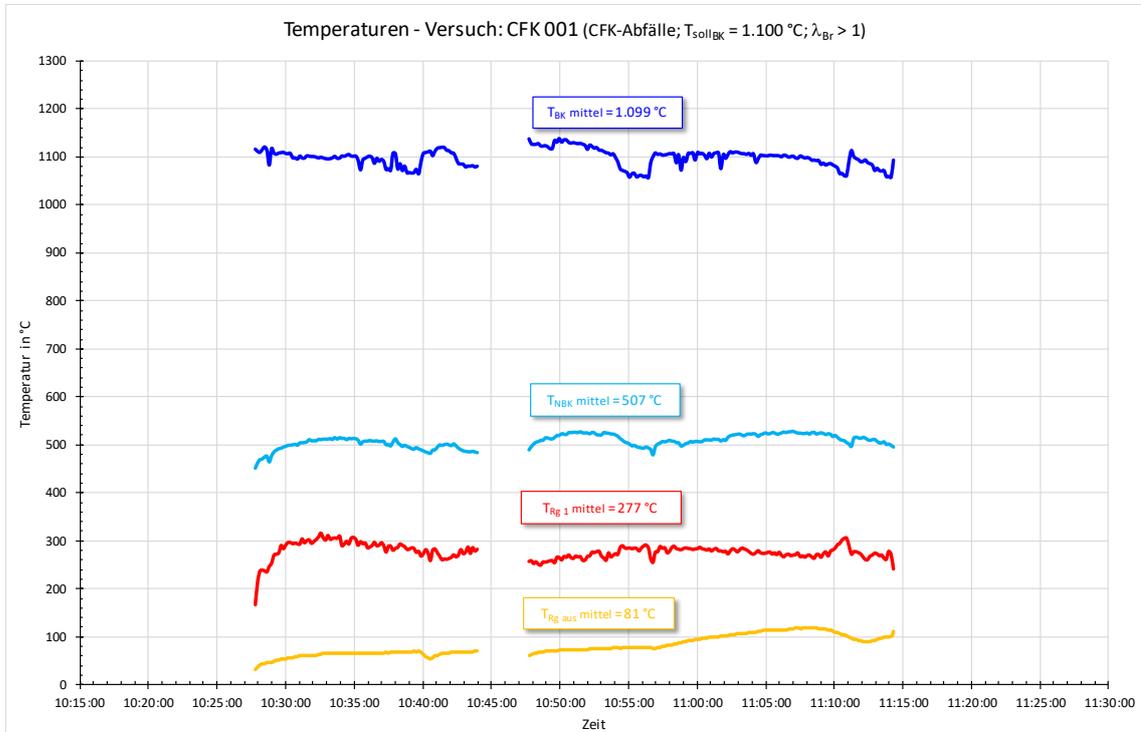


Abb. 1-20 Trendverläufe der Reaktortemperaturen bei der Monoverbrennung von gemahlene CFK-Abfällen

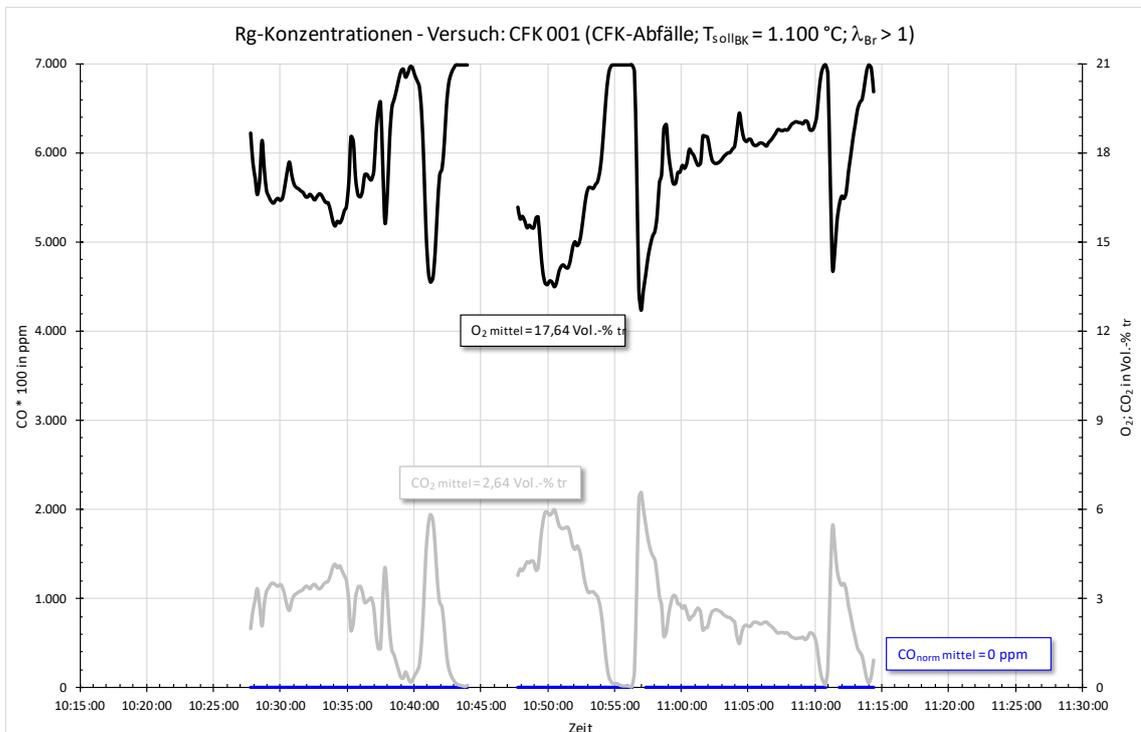


Abb. 1-21 Trendverläufe der Rauchgasemissionen bei der Monoverbrennung von gemahlene CFK-Abfällen

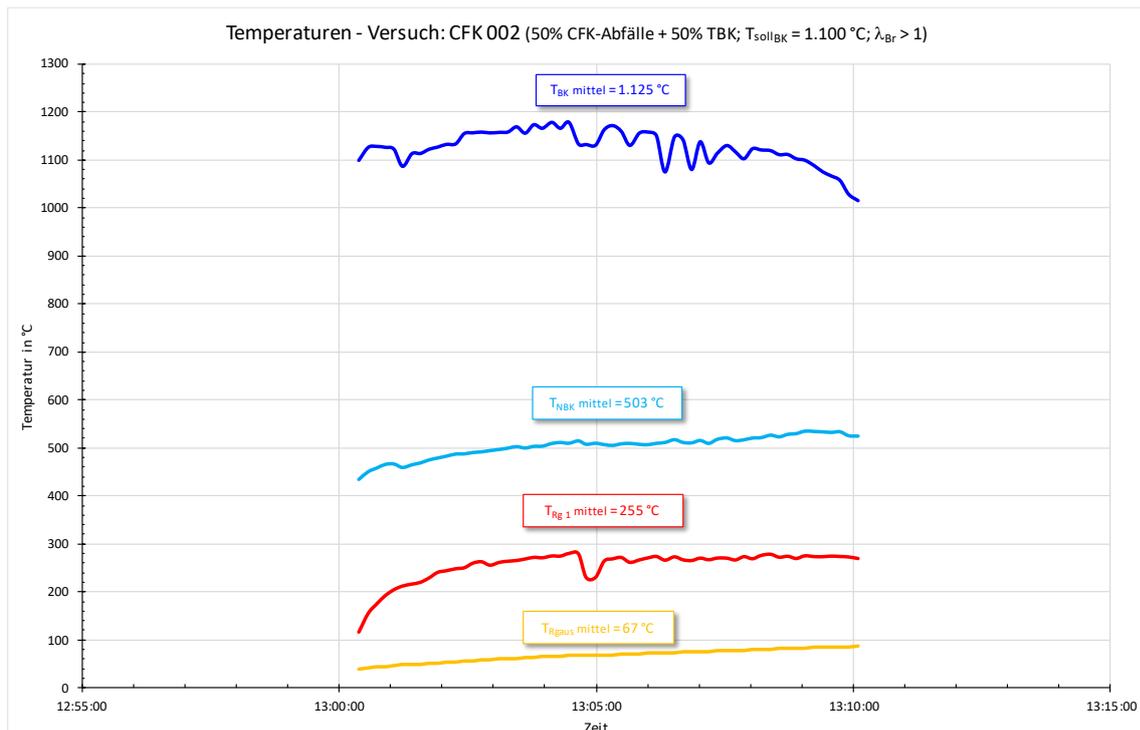


Abb. 1-22 Trendverläufe der Reaktortemperaturen bei der Mitverbrennung von gemahlene CFK-Abfällen

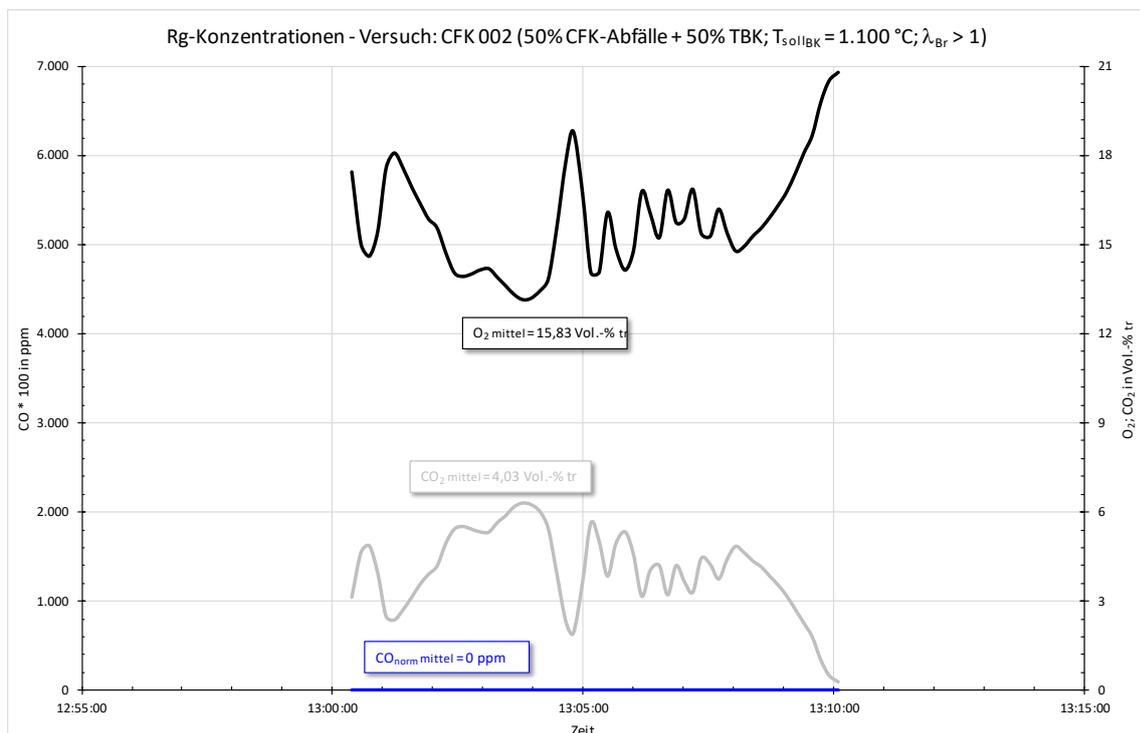


Abb. 1-23 Trendverläufe der Rauchgasemissionen bei der Mitverbrennung von gemahlene CFK-Abfällen

Die gravimetrische Messung der Staubkonzentration im Rauchgas ist bedingt durch den schwankenden Versuchsablauf stärker fehlerbehaftet als beim kontinuierlichen Versuchsbetrieb. Die Messung ergab eine Staubkonzentration von  $691 \text{ mg/m}^3$  (i.N.) Rauchgas, was bei einem Betrieb der Versuchsanlage ohne Staubfilter als realistisch anzusehen ist. Eine durchgeführte Analytik (TGA 701) der abgezogenen Stäube ergab nachfolgende Zusammensetzung:

Wasser:	1,13 Ma.-%
Flüchtige:	9,23 Ma.-%
Cfix:	84,88 Ma.-%
Asche:	4,76 Ma.-%

Nachstehend sind ausgewählte gemessene und berechnete Parameter des Versuches CFK001 zusammengefasst (dargestellt als Mittelwerte über dem Versuchszeitraum):

■ Brennkammertemperatur	1.099 °C
■ Rauchgasaustrittstemperatur nach E-Filter	81 °C
■ Brennstoffmassenstrom	0,31 kg/h
■ Thermische Leistung	2,64 kW
■ Gasverweilzeit in der Brennkammer (T <sub>mittel</sub> ~ 1.000 °C)	2,05 s
■ Sauerstoffgehalt im Rauchgas (trocken)	17,64 Vol.-%
■ Kohlendioxidgehalt im Rauchgas (trocken)	2,64 Vol.-%
■ Kohlenmonoxidgehalt im Rauchgas (trocken)	0,00 ppm
■ Luftverhältnis	> 2,50
■ Staubkonzentration im Rauchgas (feucht)	691 mg/Nm <sup>3</sup> (i.N.)
■ Wassergehalt Flugasche	1,13 %
■ Flüchtige Flugasche	9,24 %
■ Cfix Flugasche	84,88 %
■ Aschegehalt Flugasche	4,76 %

### Zusammenfassung

Eine verbrennungstechnologisch orientierte Bewertung der thermischen Behandlung von CFK-Abfällen an zwei spezialisierten Testapparaturen (Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 und Mikrobrennkammer MB 1500) kann auf der Basis der an diesen Versuchsapparaturen durchgeführten Versuche nur unzureichend gegeben werden. Die Versuche an dem Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 schlugen fehl.

Ein Verbrennungsversuch an der Mikrobrennkammer MB 1500 mit reinen CFK-Abfällen (CFK 001) sowie ein zweiter Versuch (CFK 002) mit einem Mischprodukt (50% / 50% Massenverhältnis) von CFK-Abfällen und Trockenbraunkohle (TBK) konnten für einen begrenzten Versuchszeitraum aufrechterhalten werden, jedoch waren starke Schwankungen beim Betrieb des Feuerungssystems zu verzeichnen. Diese Schwankungen wurden durch einen von dem Brennstoffdosiersystem nicht zu realisierenden kontinuierlichen Brennstoffmassenstrom aufgrund des nahezu nicht vorhandenen Fließvermögens der aufbereiteten CFK-Abfälle verursacht. Auf eine Bewertung der gasförmigen Emissionen wird bedingt durch die Unzuverlässigkeit des Datenmaterials verzichtet.

Eine Analyse der bei der, ebenfalls unsicheren, Ermittlung der Staubkonzentration des Rauchgases gewonnenen Stäube zeigt an hohen Anteil an Unverbrannten (Cfix ~ 85 %), was darauf hindeutet, dass die Aufenthaltszeiten der Partikel in der Brennkammer und

den Nachbrenneinheiten mit entsprechendem Temperaturniveau für einen weiteren Kohlenstoffumsatz nicht ausreichend sind. Diese Problematik ist für die meisten Verbrennungssysteme gleich, da die feinen Staubfraktionen trotz verschiedener Maßnahmen zur Erhöhung der Partikelverweilzeit bei den verschiedenen Feuerungssystemen (z.B. Wirbelschicht, Zyklonfeuerung etc.) sofort mit dem Rauchgasstrom ausgetragen werden und die Verweilzeit der Partikel dann der Gasverweilzeit ähnelt, die dann für einen vollständigen Umsatz der CFK-Partikel nicht ausreicht.

Die angedachte Nutzung der Versuchsapparaturen zur Bestimmung der, zumindest qualitativen, Unterschiede der Verbrennungsabläufe von verschiedenen hergestellten CFK-Abfällen (unterschiedlichen Faserlängen, Bindematrix, Carbonisierung etc.) ist, vor allem bedingt durch die schlechte Dosierbarkeit der Stäube, nicht möglich.

### **Brennstoffvariation Strohvergasung**

---

Im Rahmen von AE1.2 konnte 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 [5] für z.B. Weizenstroh eine Ascheerweichungstemperatur von ca. 1.000 °C aufweist. In [6] 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 systematische 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.

#### Vorgehen

Im Rahmen der MF 6 bis 13 wurden die Parameter i) Volumenstrom Vergasungsmittel und ii) Füllstand Reaktor entsprechend Tab. 1-4 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.

Tab. 1-4 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, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) 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. 1-24) definiert wird. Für den dann gewählten Auswertungszeitraum, dessen Länge ebenfalls in Tab. 1-4 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.

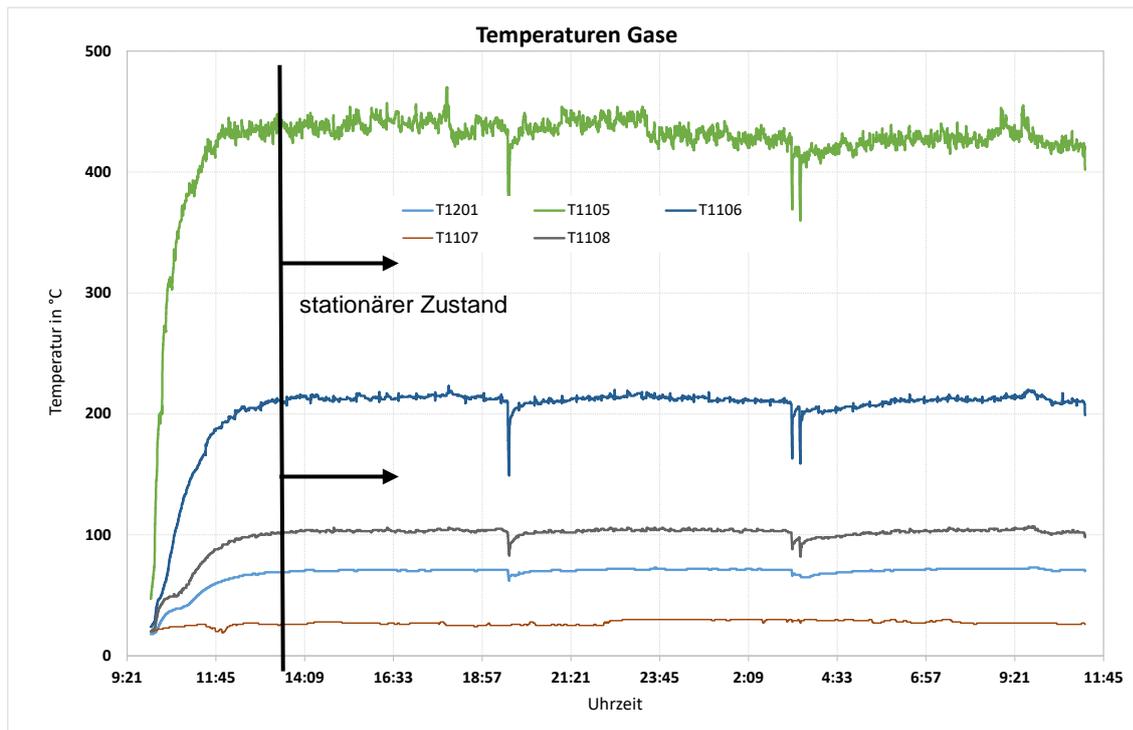


Abb. 1-24 Grafische Darstellung des stationären Zustandes in Abhängigkeit von T1106 (Gastemperatur Filteraustritt), MF MFC-Lang

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

#### Kurzbeschreibung der Versuchsanlage und der eingesetzten Messtechnik

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 ausgelesen. 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. 1-25, Abb. 1-26, Abb. 1-27 und Abb. 1-28 ist die Anlage dargestellt und die aufgeführten Hauptkomponenten sind noch einmal zur Anschaulichkeit markiert.

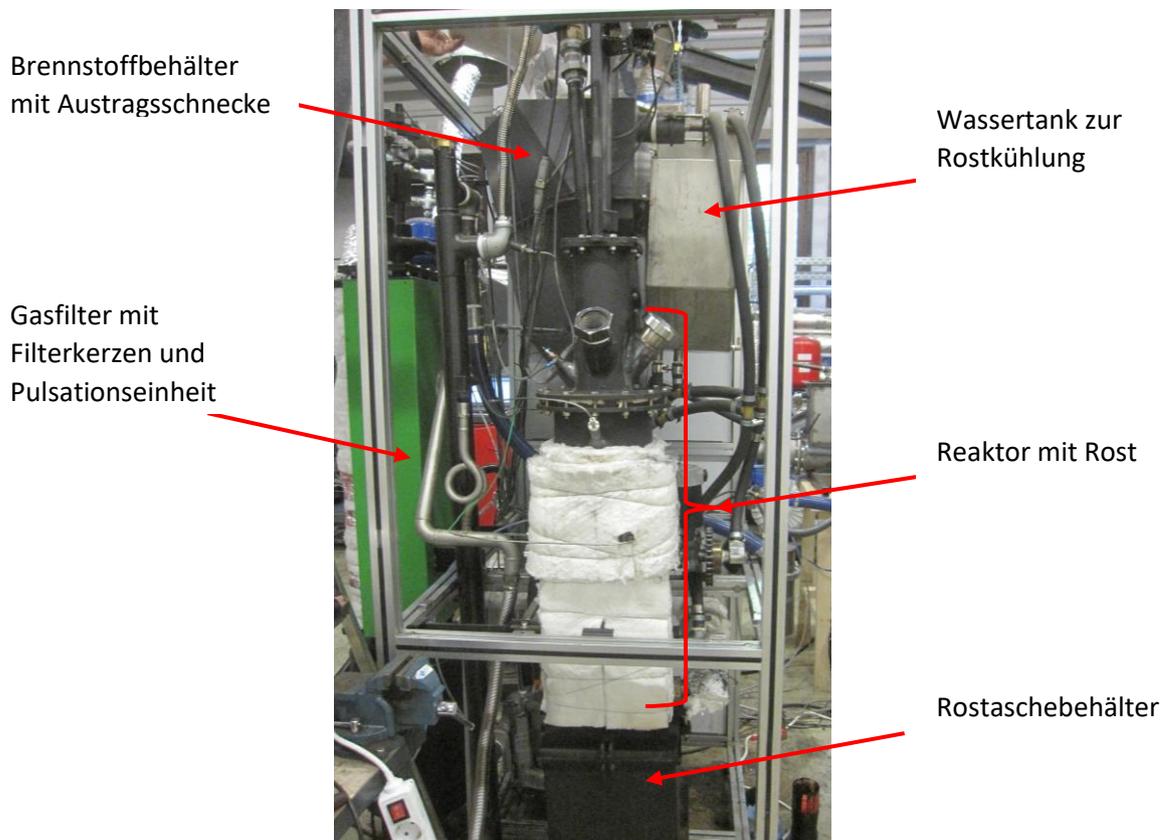


Abb. 1-25 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 1 (Vorderansicht)

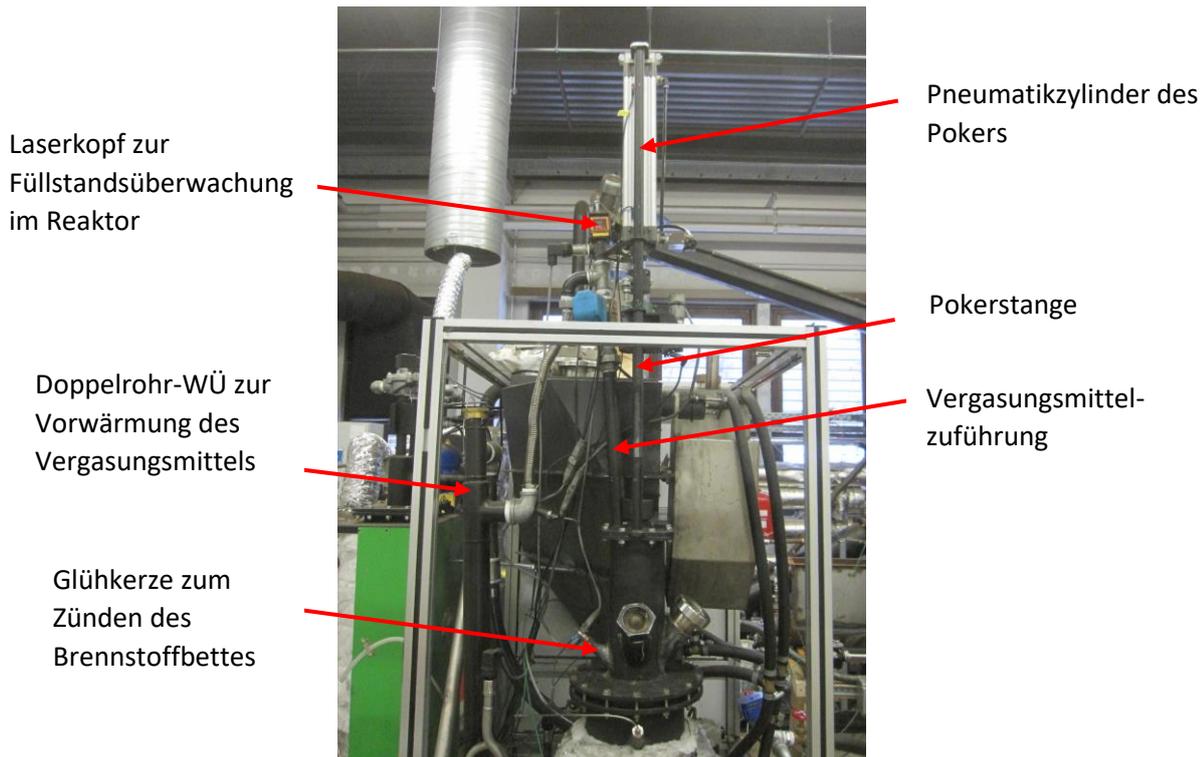


Abb. 1-26 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 2 (Vorderansicht oben)

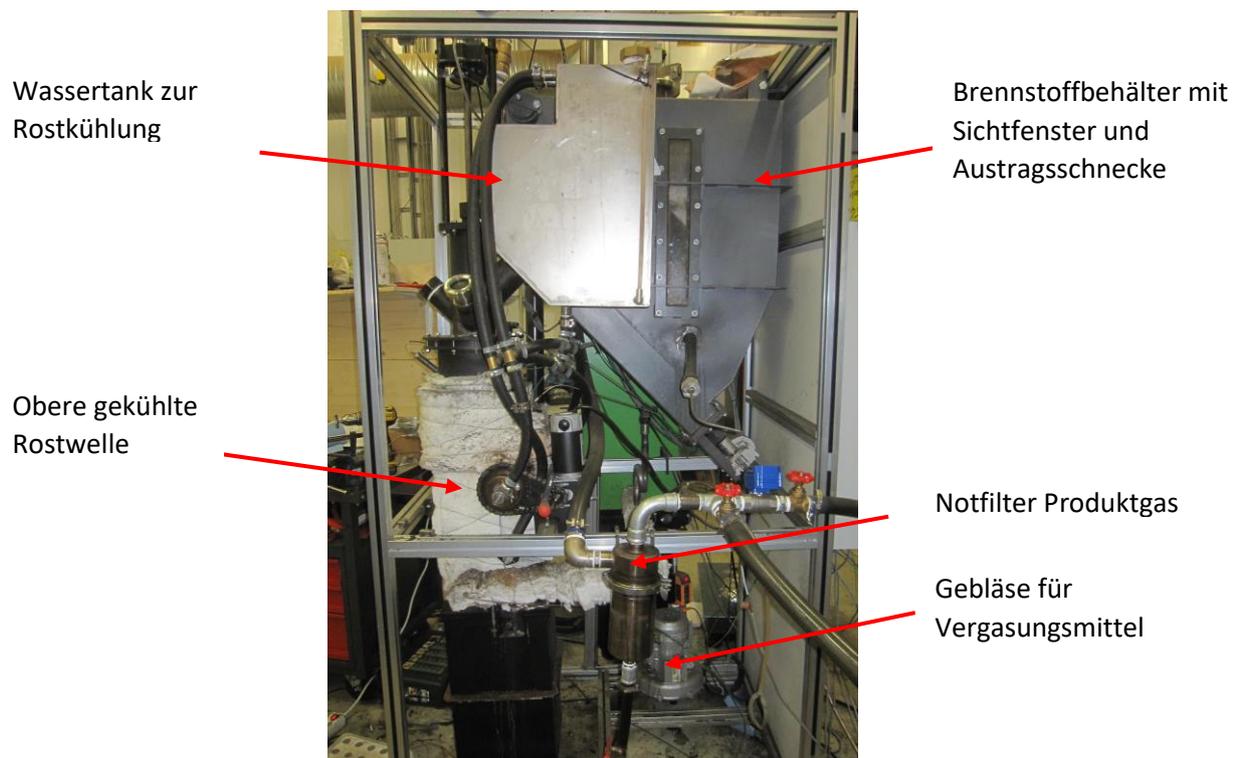
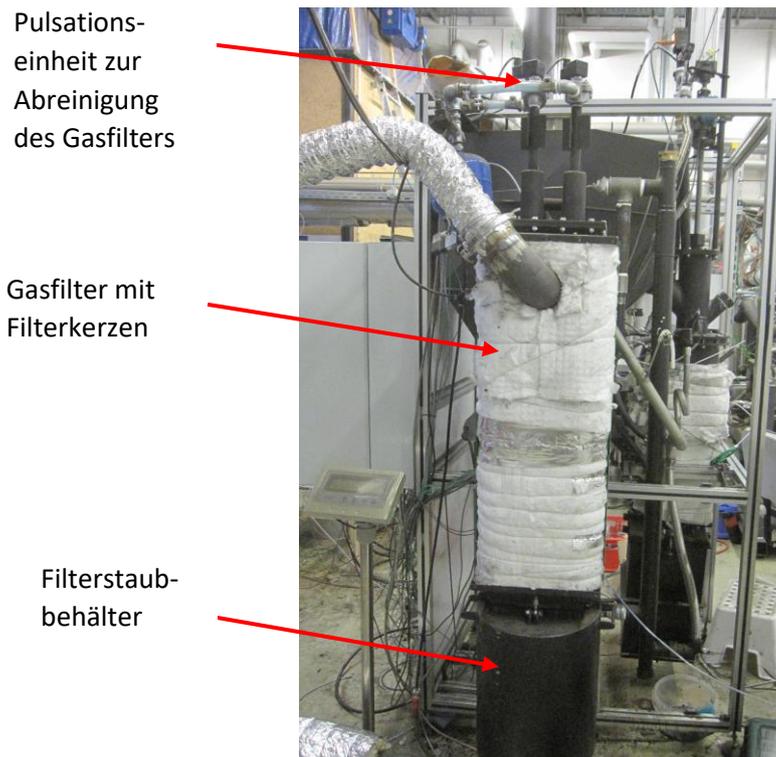


Abb. 1-27 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 3 (Seitenansicht rechts)



*Abb. 1-28 Vergasungsanlage X5 der Fa. MFC GmbH, Ansicht 4 (Seitenansicht links)*

Zur weiteren Veranschaulichung der Anlage und des Prozessablaufes ist in Abb. 1-29 das R&I-Schema der Versuchsanlage abgebildet.

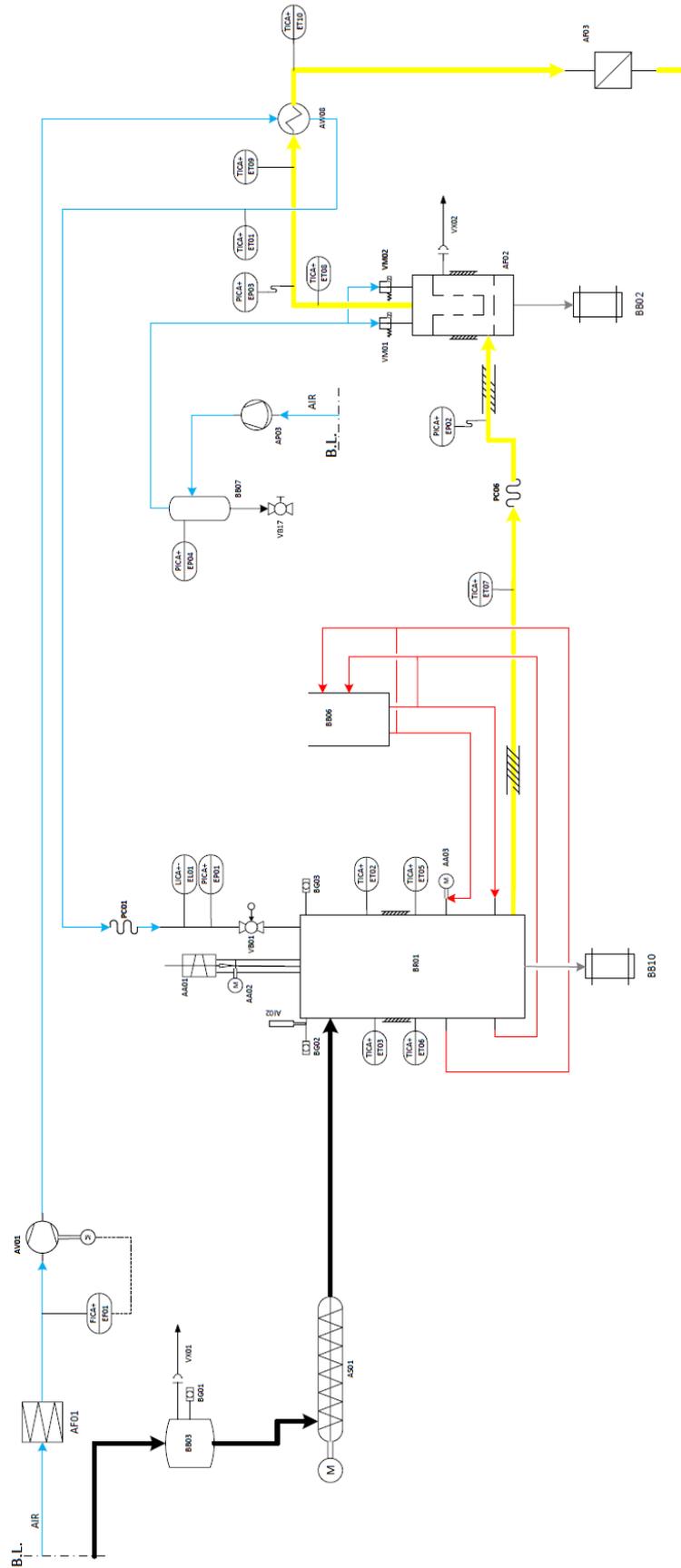


Abb. 1-29 Auszug aus dem R&I der Versuchsanlage X5 der Fa. MFC GmbH [7]

Hinsichtlich der für die Versuche eingesetzten Messtechnik wurde zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung ein Mikro-Gaschromatograph ( $\mu$ GC) der Fa. INRAG AG (I-Graph XSII) und zur Erfassung des Wassergehaltes im Produktgas ein Prallstrahlpsychrometer der Fa. Bartec AG eingesetzt.

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. 1-5. Die hierfür zur Verfügung stehenden Mess- und Probenahmestellen sind in Abb. 1-30 ersichtlich.

Tab. 1-5 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.

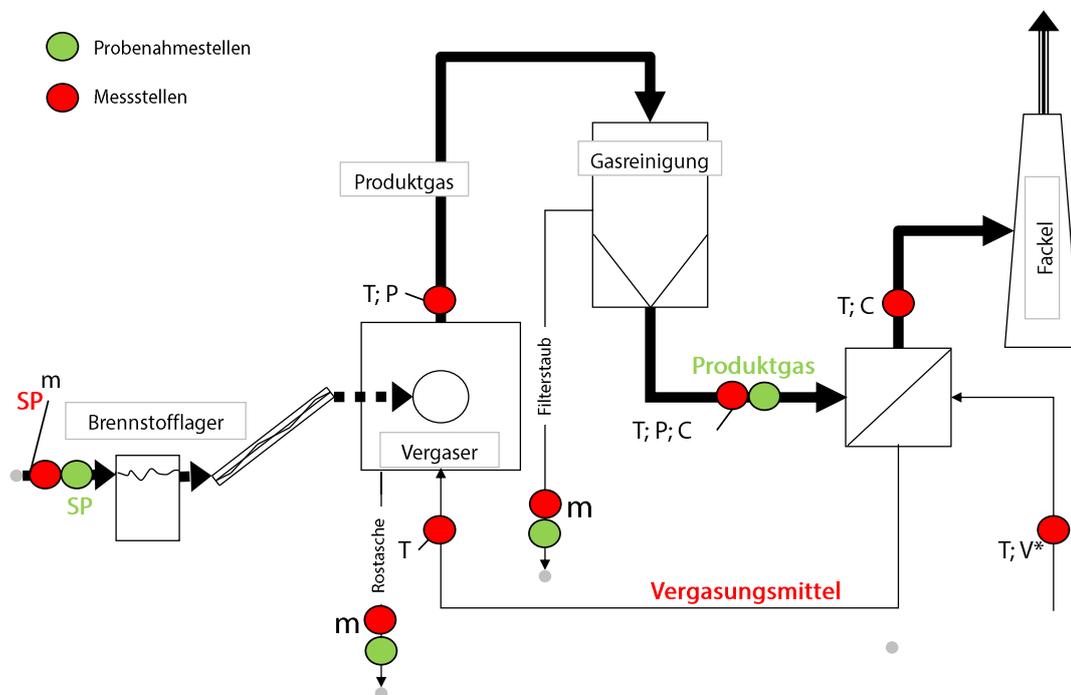


Abb. 1-30 Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF

Die Messstelle für die Zusammensetzung des Produktgases ist in der folgenden Abb. 1-31 und die Messstelle zur Erfassung des Wassergehaltes im Produktgas ist in Abb.

1-32 dargestellt. In den Abb. 1-33 und Abb. 1-34 sind die Sammelbehälter für Rostasche und Filterstaub abgebildet und die Art und Weise der Rostascheprobeentnahme nach der jeweiligen MF wird in Abb. 1-35 dargestellt.

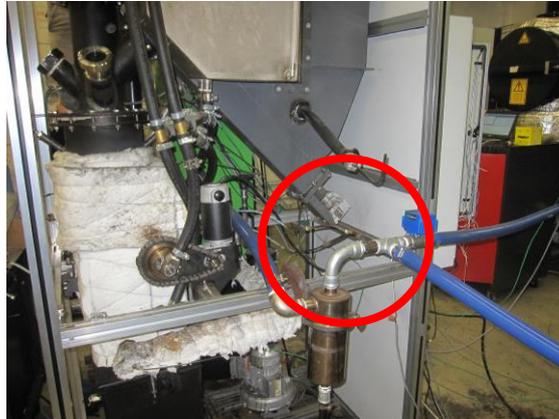


Abb. 1-31 Darstellung der Messstelle (nach Notfilter) zur Erfassung der Produktgaszusammensetzung



Abb. 1-32 Darstellung der Messstelle zur Erfassung des Produktgas-Wassergehaltes



Abb. 1-33 Nach der MF deinstallierter Filterstaubbehälter zur Abwägung und Probenahme des Filterstaubes



*Abb. 1-34 Nach der MF deinstallierter Rostaschesammelbehälter zur Abwägung der Rostasche*



*Abb. 1-35 Nach der MF Probenahme der Rostasche bei laufendem Rost*

Zur Information und für die Lesbarkeit der im Bericht nachfolgenden Diagramme sind in der Tab. 1-6 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. 1-6 Messstellenübersicht mit Bezeichnung und Beispielmesswert

Messstellenbeschreibung	Bezeichnung MFC	Bezeichnung HSZG	Bsp.-messwert MFC Lang
Volumenstrom Vergasungsmittel	EF01	F1201	8,97 m <sup>3</sup> /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, Reaktorausritt	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

### Beschreibung der Messfahrten

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.

Zur Übersicht sind in folgender Tab. 1-7 die durchgeführten Messfahrten mit Gesamtversuchsdauer und den jeweiligen Auswertungszeiträumen (stationärer Zustand) dargestellt.

Tab. 1-7 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

Datum	Bezeichnung	Startzeit	Endzeit	Versuchsdauer Gesamt	Auswertungszeitraum
Einheit		h:min	h:min	h	h
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 m<sup>3</sup>/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. 1-8). Dabei zeigte sich, dass bei einem Volumenstrom des Vergasungsmittels von 8,5 bis 9,5 m<sup>3</sup>/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. 1-8 Bewertung der Parametervariationen und Parameterauswahl für MF MFC-Lang

Bezeichnung	Vergasungsmittel Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h (i.N.)	Füllhöhe Reaktor in cm	Einschätzung
MFC-MF6	7,5	32	qualitativ schlechteres Produktgas; O <sub>2</sub> 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 CH <sub>4</sub> -Gehalt
MFC-MF12	9,5	27	starker Rostascheanfall; O <sub>2</sub> im Produktgas
MFC-MF13	9,5	32	qualitativ gutes Produktgas; O <sub>2</sub> im Produktgas
MFC-Lang	9,0	32	hoher Wassergehalt im Produktgas (Plausibilität prüfen);

### Laboranalysen

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.

Zur Kurz- bzw. Immediatanalyse 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.

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

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.

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. 1-35). 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.

Die Ergebnisse der Kurz- und Brennwertanalyse der eingesetzten Brennstoffe und der Rostasche- bzw. Filterstaubproben sind nachfolgend im analysenfeuchten Zustand in Tab. 1-9 zusammengestellt.

Tab. 1-9 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
<b>Strohpellets</b>										
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
<b>Rostasche</b>										
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
<b>Filterstaub</b>										
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

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

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 Analysenergebnisse hinweist.

Die Elementaranalyse der eingesetzten Strohpellets ergab die in Tab. 1-10 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. 1-10 Elementaranalysenergebnis 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.

#### 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. 1-36 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.

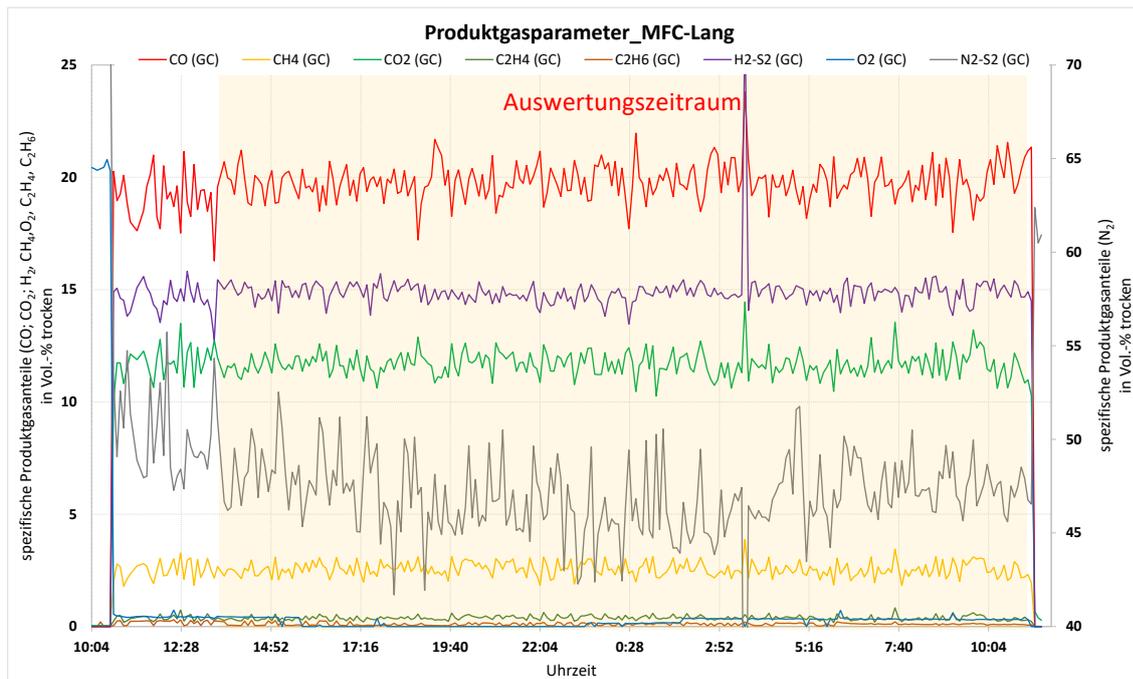


Abb. 1-36 Produktgaszusammensetzung während MF MFC-Lang

Im Folgenden sind die für den Auswertungszeitraum gemittelten Messwerte der erfassten Stoffströme aufgeführt.

Wie in Tab. 1-11 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. 1-8 erkennbar ist.

Tab. 1-11 Brennstoffcharakteristika bei MF zur Parametervariation und MFC-Lang

Datum	Bezeichnung	Versuchsdauer Gesamt	Brennstoffbedarf	Wassergehalt	Heizwert	chem. Brennstoffleistung
Einheit		h	kg/h	Ma.-%	MJ/kg	kW
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

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 m<sup>3</sup>/h (i.N.). Die resultierenden Volumen- und Massenströme der Luft sind zur Übersicht in Tab. 1-12

aufgeführt. Anhand der erfassten Zusammensetzung und der Massenströme des Brennstoffes und des Vergasungsmittels Luft konnte darüber hinaus die ebenfalls in Tab. 1-12 für die jeweilige MF aufgeführte Luftzahl der Vergasung berechnet werden.

Tab. 1-12 Vergasungsmittelcharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	Volumenstrom Vergasungsmittel	Massenstrom Vergasungsmittel	Luftzahl
<i>Einheit</i>		<i>m<sup>3</sup>/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. 1-13 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 Anlagenfahrweise beschrieben.

Anhand der ermittelten Zusammensetzung des Produktgases wurde für jede MF der Stickstoff (N<sub>2</sub>) - Anteil als Differenz zu 100 Vol.-% berechnet. Hiermit konnte nun bei Berücksichtigung des Produktgasmassenstromes für die Stoffstrombilanz (vgl. Kapitel Bilanzierung) der jeweiligen MF ein N - Anteil im Gasstrom ermittelt werden.

Tab. 1-13 Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<i>Einheit</i>		<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-% f.</i>	<i>Vol.-%</i>
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. 1-13 aufgeführten Produktgaszusammensetzungen sind für eine bessere Anschaulichkeit und Vergleichbarkeit noch einmal grafisch in Abb. 1-37 abgebildet.

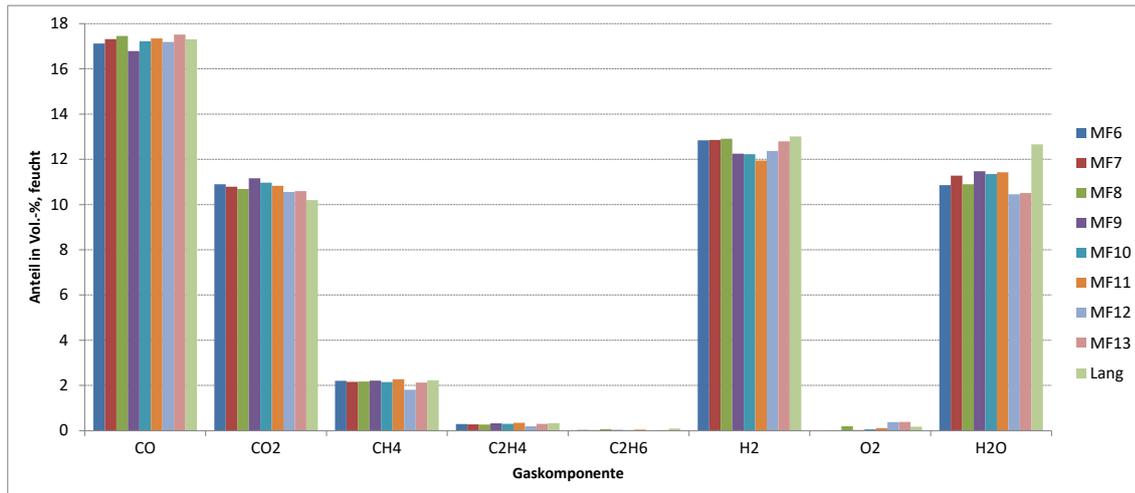


Abb. 1-37 Produktgaszusammensetzung, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Aufgrund der zuvor dargestellten Änderungen der Produktgaszusammensetzung ergaben sich beim Vergleich der Produktgasqualität geringe Unterschiede des Heizwertes (vgl. Tab. 1-14). 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/m<sup>3</sup> (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. 1-14 miteinander verglichen. Aufgrund der nur geringen Unterschiede der Produktgasqualität (Heizwert) resultiert das unterschiedliche Niveau der Produktgasleistung entsprechend dem berechneten Produktgasmassestrom und ist damit wiederum maßgeblich vom Massestrom des Vergasungsmittels Luft abhängig.

Tab. 1-14 Produktgascharakteristika der MF, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	Heizwert Produktgas		Massenstrom Produktgas	Chem. Produktgasleistung
Einheit		MJ/m <sup>3</sup> (i.N.)	MJ/kg	kg/h	kW
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 Anlagenfahrweise in Diagrammform grafisch dargestellt. Auf eine Gegenüberstellung und Vergleich dieser Messdaten für alle MF wurde in diesem Forschungsbericht verzichtet.

Wie in Tab. 1-15 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. 1-15 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

Die zuvor beschriebenen Mess- und Berechnungsdaten der jeweiligen Auswertungszeiträume sind zusammengefasst in Tab. 1-16 und

Tab. 1-17 aufgeführt.

Tab. 1-16 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
<i>Einheit</i>		<i>kg/h</i>	<i>kW</i>		<i>MJ/kg</i>	<i>kW</i>	<i>kg/h</i>	<i>Ma.-%</i>	<i>kg/h</i>	<i>Ma.-%</i>
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. 1-17 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

### 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 Bewertung).

### 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. 1-38 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. 1-32) 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.-%.

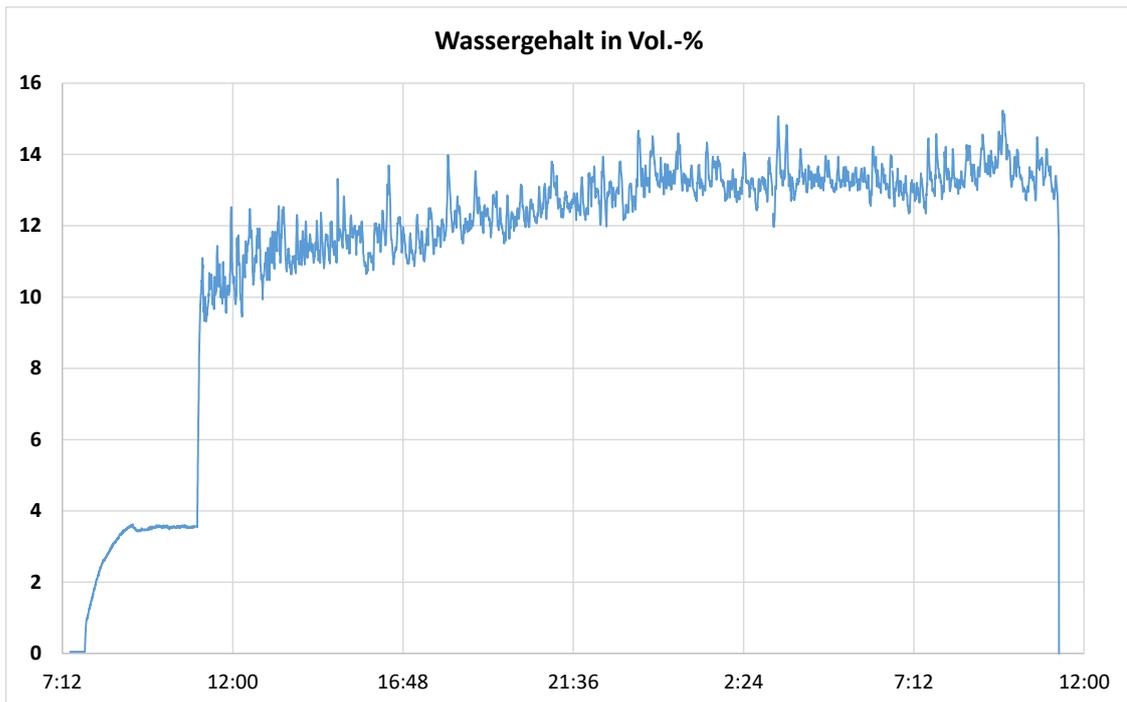


Abb. 1-38 Verlauf des Wassergehaltes im Produktgas, MF MFC-Lang

Die weiteren erfassten Bestandteile des Produktgases und der Verlauf dieser Zusammensetzung während MF MFC-Lang ist in Abb. 1-39 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.

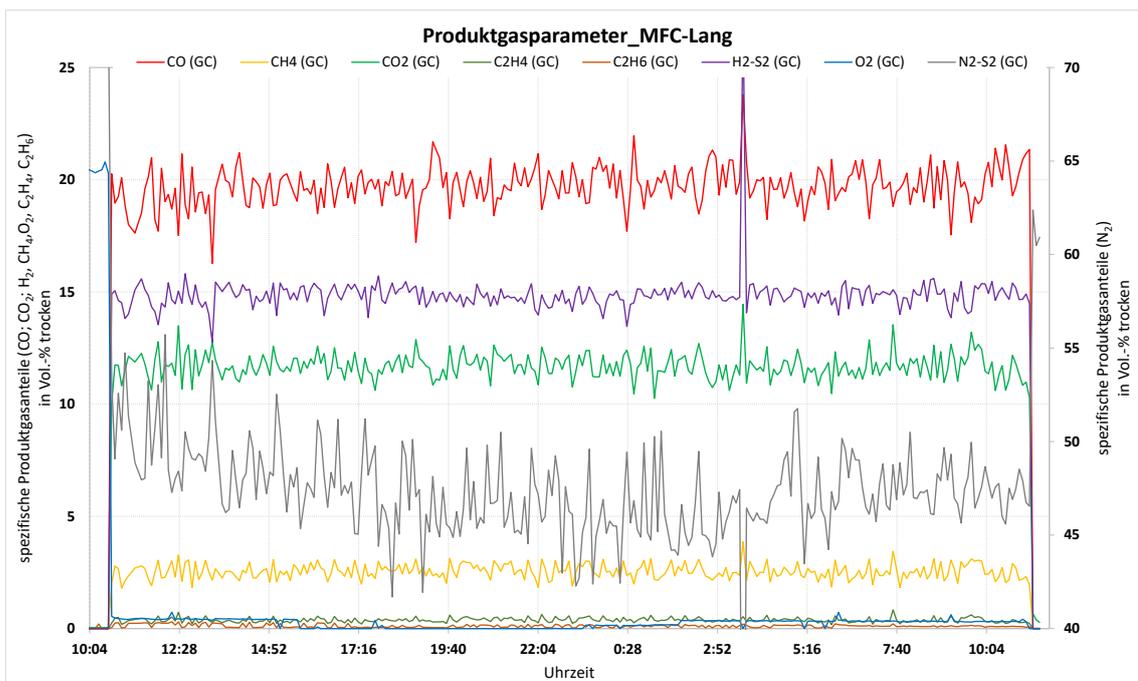


Abb. 1-39 Verlauf der Produktgaszusammensetzung, MF MFC-Lang

Ähnlich wie beim Verlauf der Produktgaszusammensetzung sind auch beim Verlauf der Temperaturen vom Vergasungsmittel Luft (T1201 (Reaktoreintritt)) und dem Produktgas (T1105 (Reaktoraustritt)) bis T1108 (WÜ-Austritt) in Abb. 1-40 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.

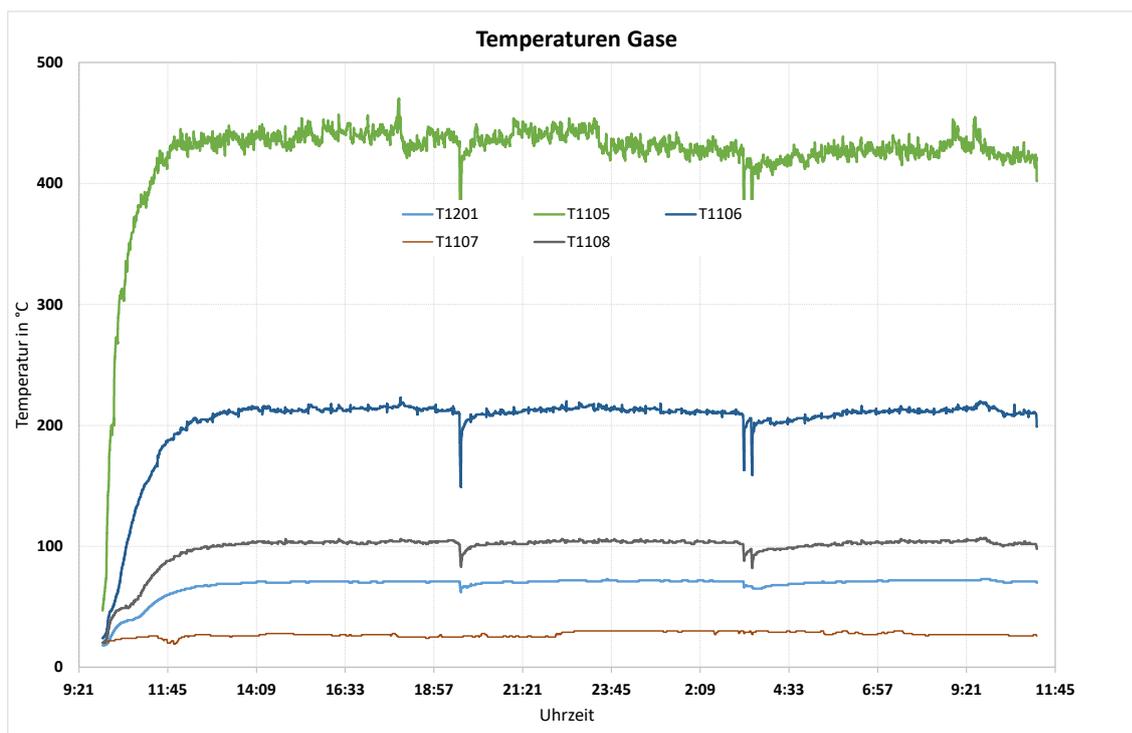


Abb. 1-40 Verlauf der Gastemperaturen (Luft, Produktgas), MF MFC-Lang

In Abb. 1-41 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.

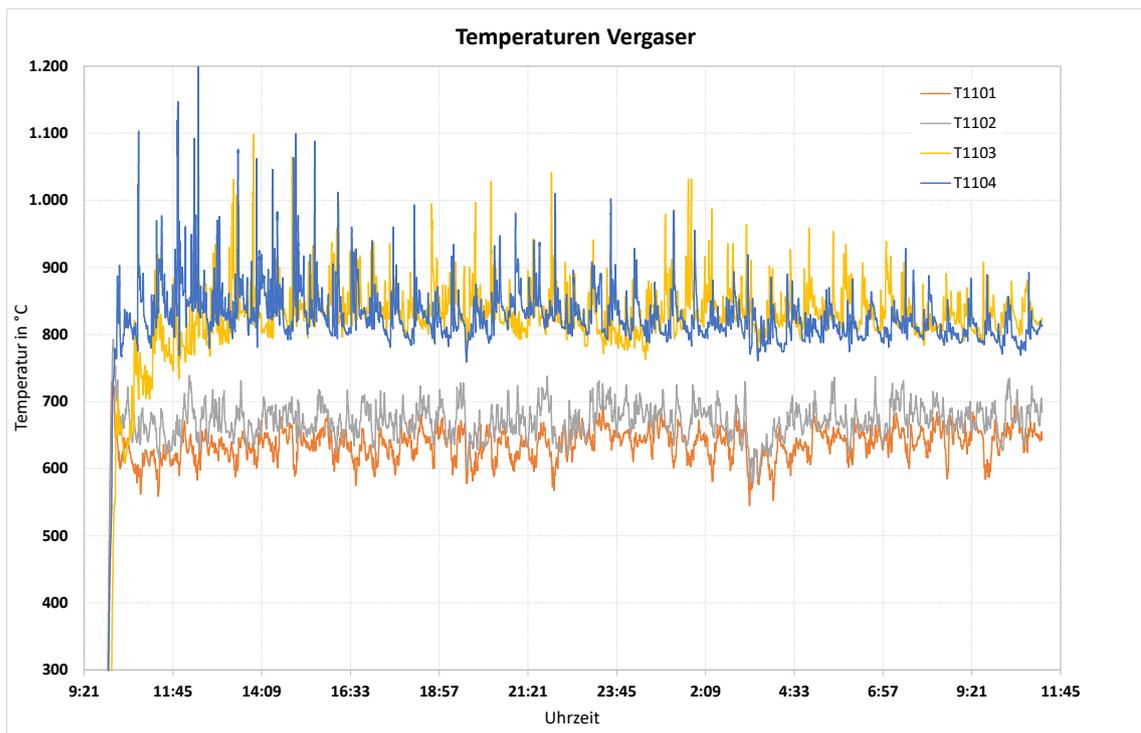


Abb. 1-41 Verlauf der Reaktortemperaturen, MF MFC-Lang

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. 1-42 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.

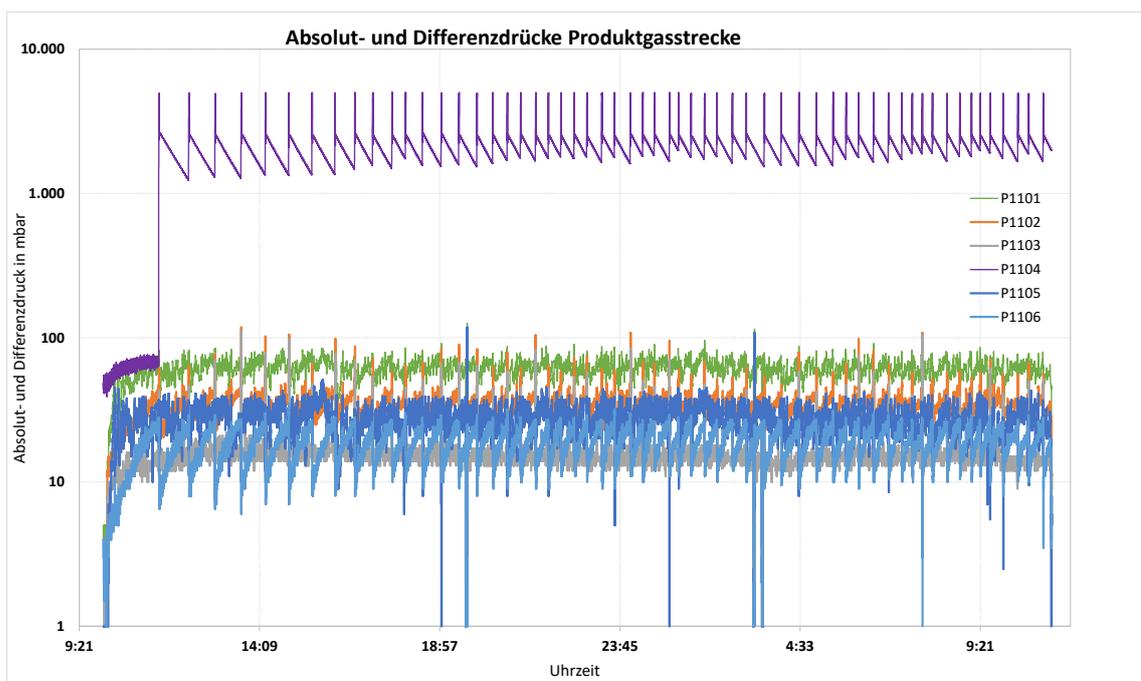
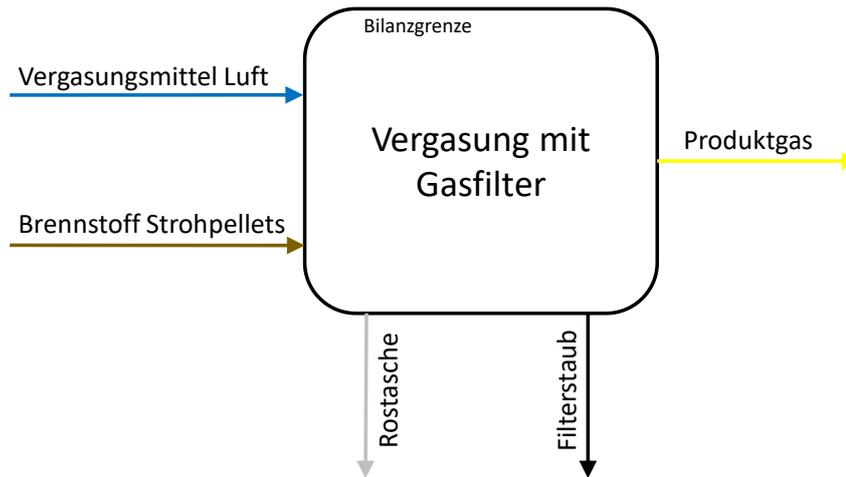


Abb. 1-42 Verlauf der Absolut- und Differenzdrücke in der Produktgasstrecke, MF MFC-Lang

### 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. 1-43 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. 1-43 Darstellung des Bilanzraumes zur Bilanzierung der Langzeitmessfahrt*

In Tab. 1-18 sind die für eine Bilanzierung notwendigen stationären Messdaten, die daraus berechneten weiteren Versuchsparameter sowie die dem Versuch zuzuordnenden Ergebnisse der Laboranalysen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 1-18 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten der MF MFC-Lang für den stationären Auswertungszeitraum (ca. 22 h)

Parameter	Wert	Einheit	Datenherkunft	
<b>Brennstoff</b> (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	
<b>Vergasungsmittel</b> (Luft)				
Volumenstrom	8,97	m <sup>3</sup> /h (i.N.)	Messung	
Massenstrom	11,55	kg/h	Berechnung	
Temperatur (Reaktoreintritt)	70,69	°C	Messung	
Thermische Energie (Reaktoreintritt)	0,45	kW	Berechnung	
<b>Produktgas</b>				
Massenstrom	17,16	kg/h	Berechnung	
Temperatur (Reaktoraustritt)	431,98	°C	Messung	
Thermische Energie (Reaktoraustritt)	9,09	kW	Berechnung	
Zusammensetzung				
	O <sub>2</sub>	0,20	Vol.-%, tr.	Messung
	CO	19,82	Vol.-%, tr.	Messung
	CO <sub>2</sub>	11,68	Vol.-%, tr.	Messung
	CH <sub>4</sub>	2,55	Vol.-%, tr.	Messung
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,38	Vol.-%, tr.	Messung
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,10	Vol.-%, tr.	Messung
	H <sub>2</sub>	14,90	Vol.-%, tr.	Messung
	N <sub>2</sub>	50,38	Vol.-%, tr.	Berechnung
	H <sub>2</sub> O	12,66	Vol.-%	Messung
Heizwert	4,20	MJ/kg	Berechnung	
<b>Filterstaub</b>				
Massenstrom	0,04	kg/h	Messung/Berechnung	
Heizwert	11,19	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung	
Aschegehalt	51,02	Ma.-%	Laboranalyse	
<b>Rostasche</b>				
Massenstrom	0,24	kg/h	Messung/Berechnung	
Heizwert	7,64	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung	
Aschegehalt	72,40	Ma.-% TS	Laboranalyse	

In Tab. 1-19 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 Laboranalysen).

Tab. 1-19 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. 1-19 aufgeführten Daten für die Stoffstrombilanz sind im nachfolgenden Sankey-Diagramm der Abb. 1-44 noch einmal visuell veranschaulicht.

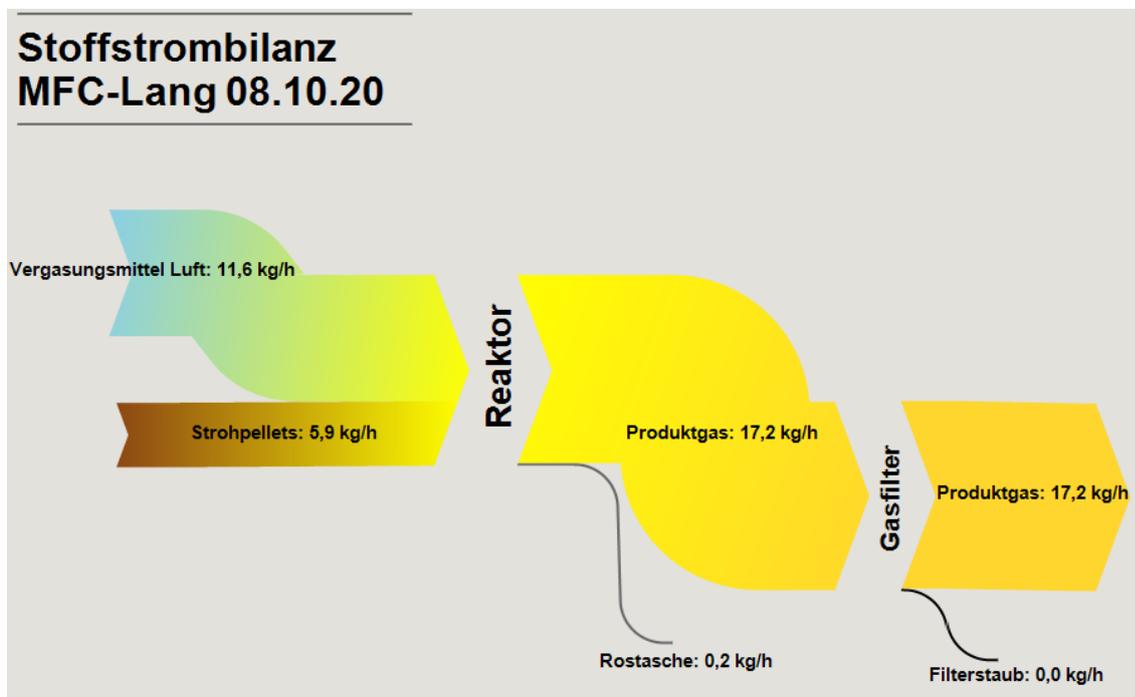


Abb. 1-44 Sankey-Diagramm der Stoffstrombilanz der MF MFC-Lang

In Tab. 1-20 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 -3,4 kW bzw. relativ -13% ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum eintretenden Energiestrom ein um 13% größerer Energiestrom den Reaktor verlässt. Die Ursache hierfür kann in Messungenauigkeiten der jeweiligen Stoffstromcharakterisierung (Temperaturen, Volumenströme, Gaszusammensetzung) 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. 1-20 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	0,45	0,00	0,00	-9,09	0,00		
Energiebilanz	25,95	0,45	-0,50	-0,13	-29,12	0,00	-3,37	-13%

Die in Tab. 1-20 aufgeführten Daten für die Energiebilanz sind im nachfolgenden Sankey-Diagramm der Abb. 1-45 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 7,0 kW zwischen Wärmeübertrager eintritt und -austritt.

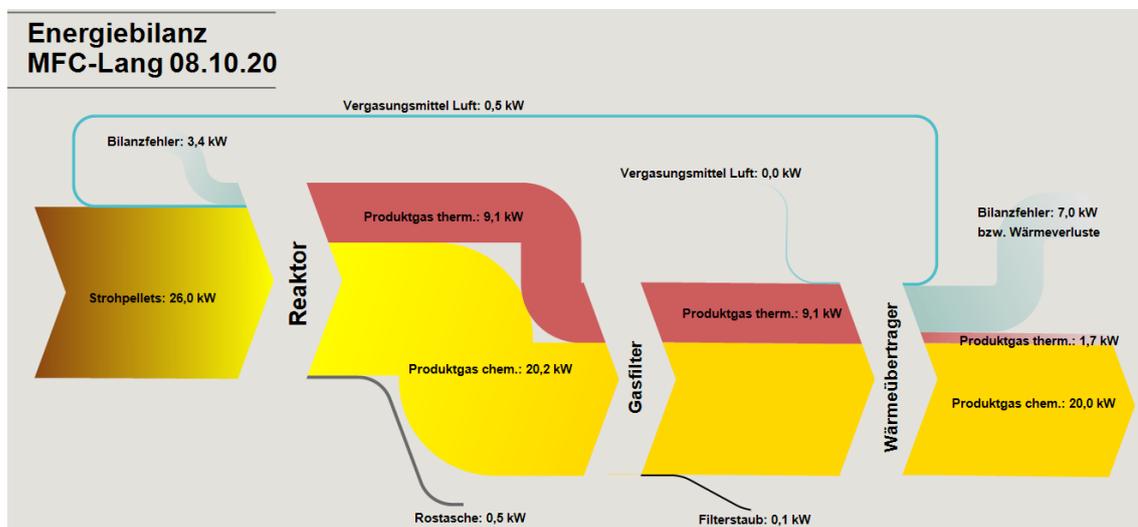


Abb. 1-45 Sankey-Diagramm der Energiebilanz der MF MFC-Lang

## 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 m<sup>3</sup>/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. 1-21). Der hier dargestellte Kaltgaswirkungsgrad wird nach [8] aus dem Quotient der chemischen Gasleistung und der Brennstoffleistung berechnet und beschreibt folglich, wie groß das Verhältnis zwischen der im Produktgas chemisch gebundenen Energie und der mit dem Brennstoff eingebrachten chemischen Energie ist. Die Brennstoff- und Gasleistung wiederum werden als Produkt des jeweiligen Massenstroms und Heizwertes berechnet.

Der Brennstoffausnutzungsgrad kennzeichnet nach [9], 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 Strohgas erfolgte, wurde für die Betrachtung des Brennstoffausnutzungsgrades die chemische und thermische Energie des Strohgas am Anlagenausstritt berücksichtigt.

Tab. 1-21 Wirkungsgrade der einzelnen Messfahrten, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Bezeichnung	Kaltgaswirkungsgrad	Brennstoffausnutzungsgrad
<i>Einheit</i>		%	%
11.06.20	MFC-MF6	72	77
12.06.20	MFC-MF7	73	79
17.06.20	MFC-MF8	76	83
18.06.20	MFC-MF9	71	76
19.06.20	MFC-MF10	74	81
22.06.20	MFC-MF11	74	82
16.07.20	MFC-MF12	75	82
17.07.20	MFC-MF13	77	84
09.10.20	MFC-Lang	77	84

Der Heizwert des Produktgases variierte dabei zwischen 3,8 (MF12) und 4,2 MJ/kg (MF Lang) bzw. 4,5 und 4,9 MJ/m<sup>3</sup> (i.N.). Dies entspricht nach [10] 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. 1-21)
- Die Funktionsfähigkeit der mechanischen Behandlung der bei der Strohvergassung 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.

### Weitere Brennstoffvariationen

---

Innerhalb des Berichtszeitraumes wurden in Anlehnung an die Vorgehensweise in [15] weitere Einsatztests von Rest- und Abfallstoffen durchgeführt. So wurde beispielsweise Landschaftspflegematerial (LPM) zuerst in loser Form und später in brikettierter Form als Brennstoff für die Biomasse-Vergasungsanlage getestet. Auch der Einsatz von Macadamianusschalen, als Nebenprodukt der Macadamiabereitstellung, wurde im Rahmen von Laboranalysen und anstelle des Standardbrennstoffes HHS in diversen Messfahrten umfangreich untersucht. Die entsprechenden Messdaten befinden sich aktuell in der Auswertung und werden nach Abschluss dieser wiederum in Form eines Forschungsberichtes veröffentlicht sowie im Abschlussbericht von HORA ausführlich dargestellt.

Weitere potenzielle Brennstoffe wie Abfälle aus der Tabakindustrie (Tabakstämme und Tabakstengel), Abfälle aus der Baustoffindustrie (z.B. Hanfschäben) oder auch getrocknete kommunale Klärschlämme wurden hinsichtlich ihrer Eignung als Brennstoff für die Festbett-Gleichstrom-Vergasung im vorhandenen Brennstofflabor der HSZG untersucht.

## AP2 Speichertechnologien

### AE2.1 Aufbau und Validierung der entwickelten und gefertigten prototypischen PCM-Speicherdemonstratoren

#### PCM-Speicherdemonstratoren

##### - Aufbau

Da die Einzelkomponenten für die im vorangegangenen Projekt TCV III [11] entwickelten und gefertigten Speicherdemonstratoren von Beginn an zur Verfügung standen, konnte direkt mit dem Aufbau und der Befüllung der beiden baugleichen PCM-Speicherdemonstratoren begonnen werden. Der Aufbau verlief ohne Hürden und spiegelt gesammelte Erfahrungswerte, bei der Entwicklung sowie den engen Kontakt mit den Lieferanten und Fertigungsbetrieben, wider. Somit lagen beste Voraussetzungen für die Validierung der Speicherdemonstratoren an der Wärmespeichertestanlage des Zittauer Kraftwerkslabors vor.

Beim Aufbau der beiden Speicher wurden die Komponenten Ständerwerk, welches ebenfalls zuvor aus Aluminiumprofilen und Verbindern aufgebaut werden musste, Wärmeübertrager (WÜ), Behälter, Richtbleche und Deckel zusammengefügt. Es folgten weitere Kleinkomponenten wie Entlüftungsventile, Kupplungen für die Fluidein- und -ausgänge, sowie mehrere Thermoelementverschraubungen an den Sammlern der WÜ. Der Aufbau ist in der Abb. 1-46 dargestellt.



Abb. 1-46 links: Speicherbehälter auf Ständerwerk ;rechts: Kollegin und Kollegen mit viel Interesse und Unterstützung beim Speicheraufbau

Die Speicher sind baugleich und unterscheiden sich lediglich in der Wahl des verwendeten PCM. Speicherdemonstrator 1 (SD 1) wurde mit dem Paraffin RT70HC und SD 2 mit dem Salzhydrat SP70 der Firma „Rubitherm“ befüllt (**Datenblätter siehe Anlage**). Bevor jedoch die Befüllung des Behälters mit dem PCM durchgeführt werden konnte, mussten Druck- und Dichtheitsprüfungen durchgeführt werden. So soll ein Vermischen des PCM mit dem bei Undichtigkeiten austretenden Wasser verhindert werden. Dazu wurde der Wärmeübertrager mit Wasser befüllt. Die anschließende Druckprüfung wurde für beide Speicher separat bei  $p_{\text{Prüf,Ü}} = 2 \text{ bar}$  und einer

Medientemperatur von  $\vartheta_{\text{Prüf}} = 90 \text{ °C}$  durchgeführt und bestanden. Es kam also zu keinem Druckabfall oder Medianaustritt. Im selben Messdurchgang wurden die Temperaturen des strömenden Mediums in den Sammlern bzw. Anschlussleitungen gemessen. Das Ansprechen der einzelnen Thermoelemente gemäß der Abb. 1-47 (hier Abkühlung von 45 auf 24 °C) und Abb. 1-48 veranschaulicht die stetige und gleichmäßige Durchströmung aller Sammler und U-Rohre des Wärmeübertragers in Strömungsrichtung.

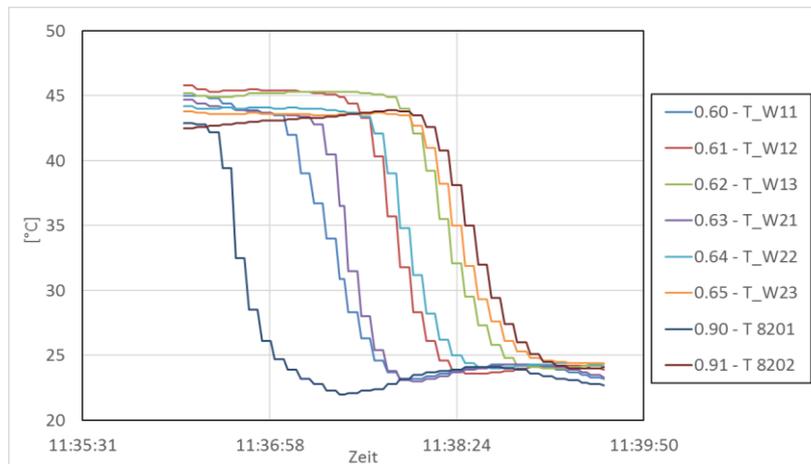


Abb. 1-47 Ansprechen der Temperaturmessstellen im WÜ zeigt eine gleichmäßige Durchströmung – T 8201 und T 8202 messen Vor- und Rücklauf

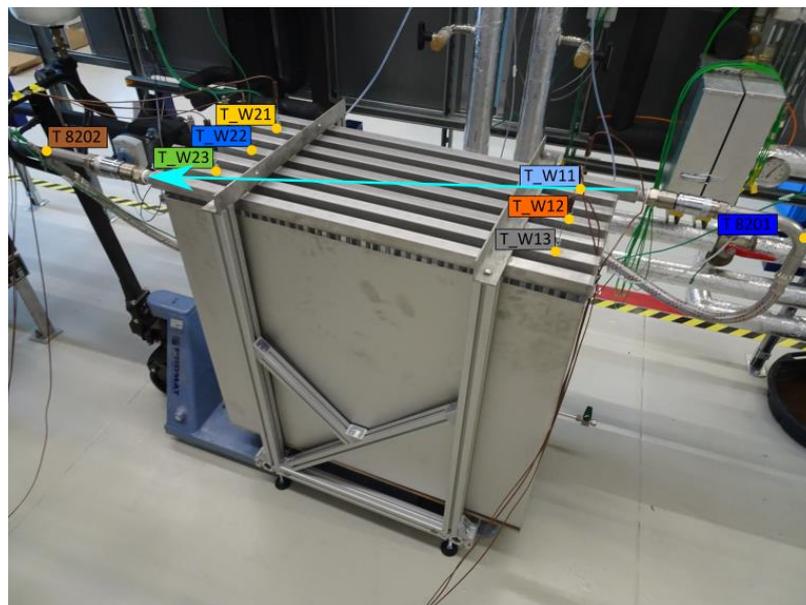


Abb. 1-48 Positionierung der Temperaturmessstellen am WÜ des Speichers

Bei Auslegung des Speichers wurde auf gleiche Druckverluste/Strömungslänge jedes möglichen Strömungsweges geachtet, um homogene Strömungsverteilung schon in der Konzeptionierungsphase zu gewährleisten. Während der durchströmenden Druckprüfung konnte bereits der vorherrschende Druckverlust im Wärmeübertrager ermittelt werden. Dieser beläuft sich bei dem vorgesehenen Fluidmassenstrom von 0,42 kg/s und einer Vorlauftemperatur von 83 °C auf 137 mbar pro Speicher.

Im weiteren Verlauf des Speicheraufbaus wurde das granuliert gelieferte PCM „RT70HC“ chargenweise in den ersten Speicher gegeben, welchem daraufhin die

Bezeichnung „Speicherdemonstrator 1“ (SD 1) zugewiesen wurde. Damit die geplante PCM-Masse in den SD 1 gefüllt werden konnte, musste der WÜ beheizt werden. Dadurch konnte das PCM-Granulat verflüssigt und die Hohlräume im Granulat für weiteres PCM freigegeben werden. Die PCM Gesamtmasse beläuft sich auf 325 kg. Nach Befüllung und Verflüssigung des gesamten PCM wurde der Speicher entladen, um Bildmaterial zu erstellen und die Performance des Speichers zu beobachten. Dies erfolgte im unisolierten Zustand des Speichers.

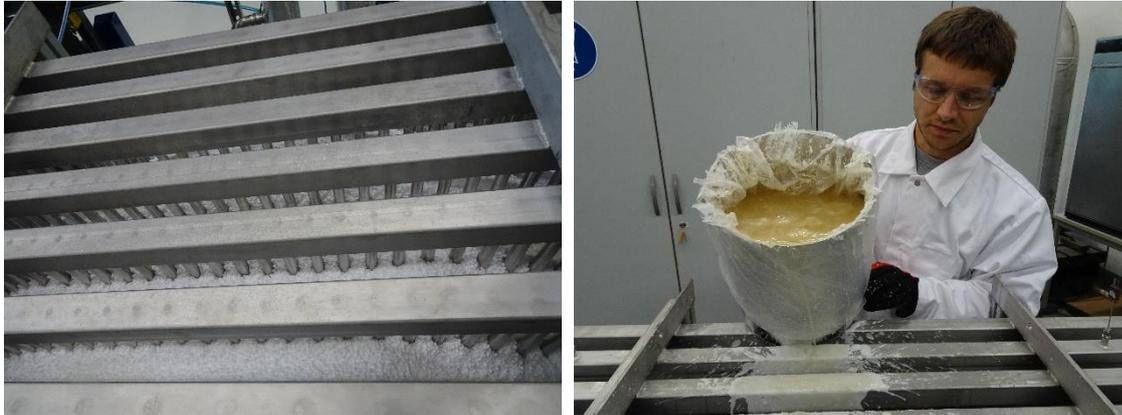


Abb. 1-49 links: SD 1 mit Paraffingranulat (RT70HC) gefüllt; recht: Einfüllen des verflüssigten Salzhydrates (SP70) in den SD 2

Der Lieferzustand des PCM „SP70“ war in mehrere 10-Liter-Eimer gefüllte und erstarrte PCM-Blöcke. Diese mussten chargenweise in einem Trockenschrank für 3 Tage verflüssigt, und anschließend in den zweiten Speicher gefüllt werden. Die Gesamtmasse des PCM beläuft sich hier auf 600 kg.

Im Anschluss an die erfolgte Befüllung der Speicher mit PCM, konnten diese isoliert werden. Dafür wurde eine 60 mm Armaflex-Isolierung (Schaumstoff auf Basis synthetischen Kautschuks) gewählt, da diese für das Handling bei der Sichtkontrolle von Vorteil ist. Nachteil hierbei ist der erhöhte Preis und die schwarze Oberfläche mit hohem Gesamtemissionsverhältnis, welche leicht erhöhte Wärmeverlust durch Wärmestrahlung zulässt. In Abb. 1-50 sind die isolierten Speicher in Kaskaden-Schaltweise (Reihenschaltung) zu sehen. Die oberen überstehenden Isolierungsbestandteile lassen sich zur Beobachtung des Beladungszustandes bzw. des PCM abnehmen.



Abb. 1-50 Isolierte Speicherdemonstratoren in Kaskadenschaltung

### - Validierungsmessungen

Bei den an die Isolierungsarbeiten nachfolgenden Validierungsmessungen wurden die beiden Speicher zuerst einzeln untersucht. An der Wärmespeichertestanlage im Zittauer Kraftwerkslabor wurden die Speicher mit einem definierten Wärmeträgerstrom (Fluidstrom) beaufschlagt. Die Parameter des Wärmestromes sind für beide Speicher gleich. Diese entsprechen Parametern, wie sie im Produktgas-Kühlkreislauf am Biomasse-Vergasungs-BHKW vorliegen. Die Parameter sind zusammen mit geforderten Speicherparametern, welche validiert werden sollen in Tab. 1-22 aufgeführt.

Tab. 1-22 Fluidparameter und zu validierende Speicherparameter

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Massestrom	$\dot{m}_F$	0,42	kg/s
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{VL,F,B}$	83	°C
Fluiddruck	$p_{F,abs}$	1,5 ... 2	bar
geforderte mittlere Beladeleistung	$\dot{Q}_{B,g}$	11	kW
geforderte maximale Beladezeit	$t_{B,g}$	10	h
theoretische Beladungswärme SD 1	$Q_{B,SD1}^T$	33,4	kWh
theoretische Beladungswärme SD 2	$Q_{B,SD2}^T$	43,3	kWh

Die geforderte maximale Beladeleistung ist gleich dem Wärmestrom, welcher im stationären Zustand vom PG-KK auf den am Biomasse-Vergasungs-BHKW vorhanden (2000 Liter fassenden) Pufferspeicher übergeben wird. Ermittelt wurden die Speicherleistungen während der Validierungsmessungen anhand des mit dem Fluid zugeführten Wärmestrom pro Zeitschritt. Der Zeitschritt beträgt 2 s. Dies entspricht der Abtastrate der Messdatenerfassung.

$$Q = \sum (\dot{m}_F * cp_{F,m} * (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) * \Delta t)$$

Die maximale Beladezeit entspricht der Dauer einer durchschnittlichen Messfahrt am BHKW. Um einen Speicher als voll beladen zu definieren, wurden Werte für die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf und der mittleren Temperatur der Thermolemente im PCM des Speichers festgelegt (Siehe Tab. 1-23).

Tab. 1-23 Parameter für die Definition des Abschluss einer Speicherbeladung

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Temperaturdifferenz	$\Delta T^b$	1	K
Beladeleistung (ergibt sich aus $\dot{m}_F$ und $\Delta T$ )	$\dot{Q}_B^b$	1,76	kW
Mittlere PCM-Temperatur	$\vartheta_{PCM,m}^b$	75	°C

Thermolemente im PCM sind wie in Abb. 1-51 zu sehen positioniert und bezeichnet. Die horizontale Position A befindet sich in der Nähe des Vorlaufes, B im Zentrum und C in der Nähe des Rücklaufes. Die Unterbezeichnung K, M und L beziehen sich auf die Länge (kurz, mittel und lang) der Thermolemente vom Deckel des Speichers aus betrachtet. K misst somit in Nähe der PCM-Oberfläche, M im vertikalen Zentrum und L am Boden des Speichers. Aufgrund von Konvektionserscheinungen im PCM wurde davon ausgegangen, dass das PCM in Oberflächennähe schneller aufschmilzt, da flüssiges und heißes PCM durch Dichteunterschiede nach oben strömt. Diese Annahme wurde während der Messungen bestätigt. Tiefer liegenden Thermolemente brauchen demnach länger um Schmelztemperaturen zu messen. Ähnlich verhält es sich mit der

horizontalen Lage. Da die Fluidtemperaturen in Richtung des Rücklaufes über den Speicher abnehmen, wurde in der Position C mit verzögerter PCM-Verflüssigung gerechnet. Dieser Sachverhalt konnte nur bedingt bestätigt werden, da in der Position AL und BL ähnliche Aufschmelzzeiten beobachtet wurden.

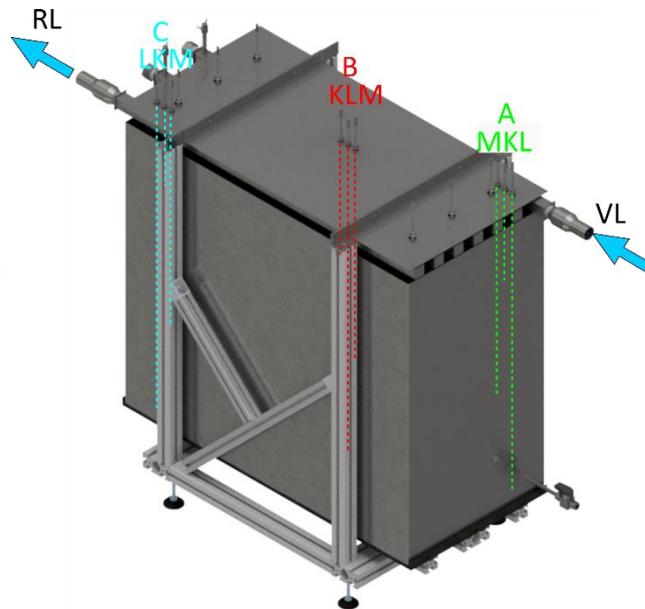


Abb. 1-51 Positionierung der Temperaturmessstellen im PCM

- Erwartete Beobachtungen aus der Theorie

- Eine höhere Beladeleistung des SD 2 im Vergleich zum SD 1, da höhere Wärmeleitfähigkeit des PCM
- Größere eingespeicherte Wärmemenge des SD 2, da Dichte des PCM viel größer

Zu Beginn einer Messfahrt treten Wärmeleistungen weit oberhalb der mittleren Leistung auf. Dies ist auf die niedrigen Rücklauftemperaturen während des Beginns zurückzuführen, da die Rücklauftemperatur dem kalten Wasser bei Umgebungstemperatur entspricht, welches sich im gesamten Speicher befindet. Unabhängig davon ist die Leistung von PCM-Speicher zu Beginn von Natur aus hoch, da sich die Phasengrenze direkt an der Rohrwand befindet und nur sehr kurze Übertragungswege überwunden werden müssen. Diese überschreitet die Leistungsfähigkeit des Prozessthermostats (30 kW) für kurze Zeit (20 min.), so zu sehen in Abb. 1-52 (violetter Graph).

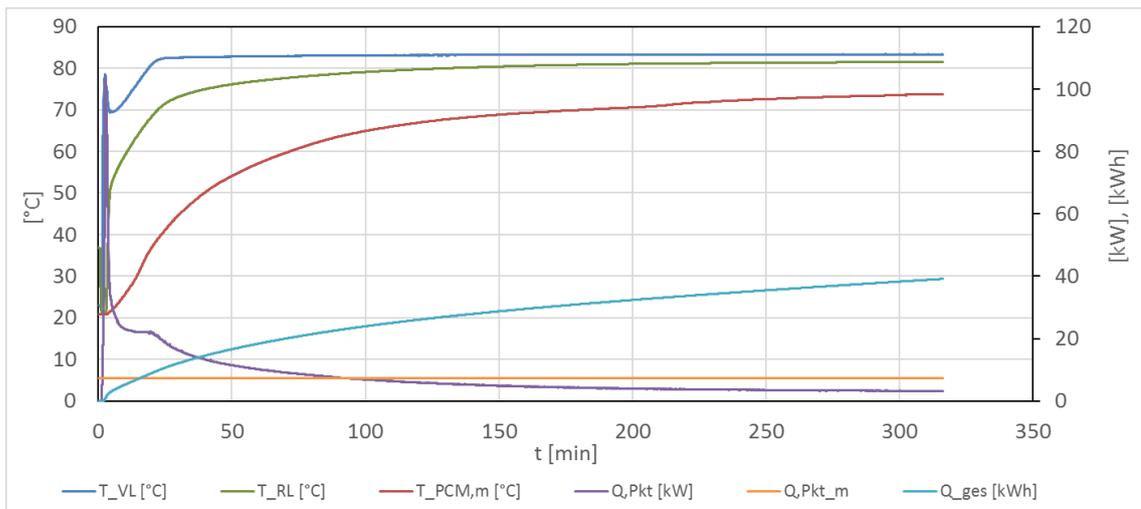


Abb. 1-52 Temperaturverläufe, Leistung und kumulierte Wärmemenge während der Beladung des SD 2

Nach ca. 320 Minuten (5,33 h) konnte der Speicherdemonstrator 2 als beladen betrachtet werden. Wobei die optische Überprüfung, durch Betrachten des Inneren des Speichers, noch festes PCM feststellte, welches sich aber durch angleichen der Temperaturen über die Speicherdauer noch verflüssigt. Tab. 1-24 zeigt die vollständigen Ergebnisse der Speichervalidierung für die Beladung von Speicherdemonstrator 1 und 2.

Tab. 1-24 Ergebnisse der Beladung des SD 2

Bezeichnung	Speicher	Symbol	Wert	Einheit
Beladezeit	SD 1	$t_{B,SD1}$	5,2	h
	SD 2	$t_{B,SD2}$	5,33	
Mittlere Beladeleistung	SD 1	$\dot{Q}_{B,m,SD1}$	4,3	kW
	SD 2	$\dot{Q}_{B,m,SD2}$	7,42	
Eingespeicherte Wärmemenge	SD 1	$Q_{B,SD1}$	27,04	kWh
	SD 2	$Q_{B,SD2}$	39,12	

Die Beladedauer der Speicher liegt mit etwas über 5 Stunden im geforderten Bereich von max. 10 h. Die eingespeicherten Wärmemengen liegen unter den theoretisch berechneten Werten von Tab. 1-24. Somit könnte mit der Gewährleistung einer durchaus zulässigen längeren Beladedauer das vorhandene Potential ausgenutzt werden, da auch die Parameter zur Definition des Beladezustands nicht zu 100% erreicht wurden. Aufgrund dass beide Speicher einzeln betrachtet nicht die benötigte Beladeleistung von 11 kW erbrachten und somit die Wärme im Anwendungsfall nicht vollständig aus dem PG-KK abgeführt werden könnte, wurde auf die Entladung und die weitere Untersuchung der einzelnen Speicher verzichtet. Im Folgenden werden die Speicher in einer Kaskadenschaltung in Reihe betrachte, wobei durch Addition der Speicherleistungen die benötigte Beladeleistung erreicht werden sollte (siehe Abb. 1-50). Speicherdemonstrator 1 wird bei der Kaskadenschaltung zuerst durchströmt und der Speicherdemonstrator 2 mit dem Rücklaufwasser des PCM-SD 1 gespeist. Die Austrittstemperatur des Wassers aus dem SD 1 ist somit gleich der Vorlauftemperatur des SD 2. Die zwischen den Speichern gemessene Fluidtemperatur wird dadurch im Folgenden als Transfertemperatur bezeichnet. Mit dem vorgegebenen Massestrom, der Vorlauftemperatur des SD 1, der Transfertemperatur und der Rücklauftemperatur des SD 2 können beide Speicher auch gesondert bilanziert werden.

Für die Validationsmessung im Zittauer Kraftwerkslabor wurden 2 komplette Speicherzyklen für die kaskadierten Speicher, bestehend aus Beladung, Speicherdauer und Entladung, aufgezeichnet. Dabei unterscheiden sich die beiden vermessenen Speicherzyklen nur geringfügig. In den Diagrammen Abb. 1-53, Abb. 1-54 und Abb. 1-55 sind die Belade-, Wärmeverlust- und Entladekurven dargestellt.

Bei der Beladung ist am Graphenband (in Abb. 1-53) bestehend aus blauem, grünem und rotem (gestricheltem) Graphen zu sehen, dass die PCM-Temperaturen von Beginn steil ansteigen. Im Bereich der Schmelztemperaturen (ab ca. 150 min) wird der Einfluss des Phasenwechsels sichtbar. Der Phasenwechsel kann somit im Mittel über alle Thermoelemente thermisch sichtbar gemacht werden. Ab 380 Minuten ist der Phasenwechsel im Bereich der Thermoelemente abgeschlossen und es beginnt die Überhitzung. Dies gilt für beide Speicher gleichermaßen. Nach den Definitionen in Tab. 1-23 sind die Speicher am Ende dieser Validierungsmessung voll beladen.

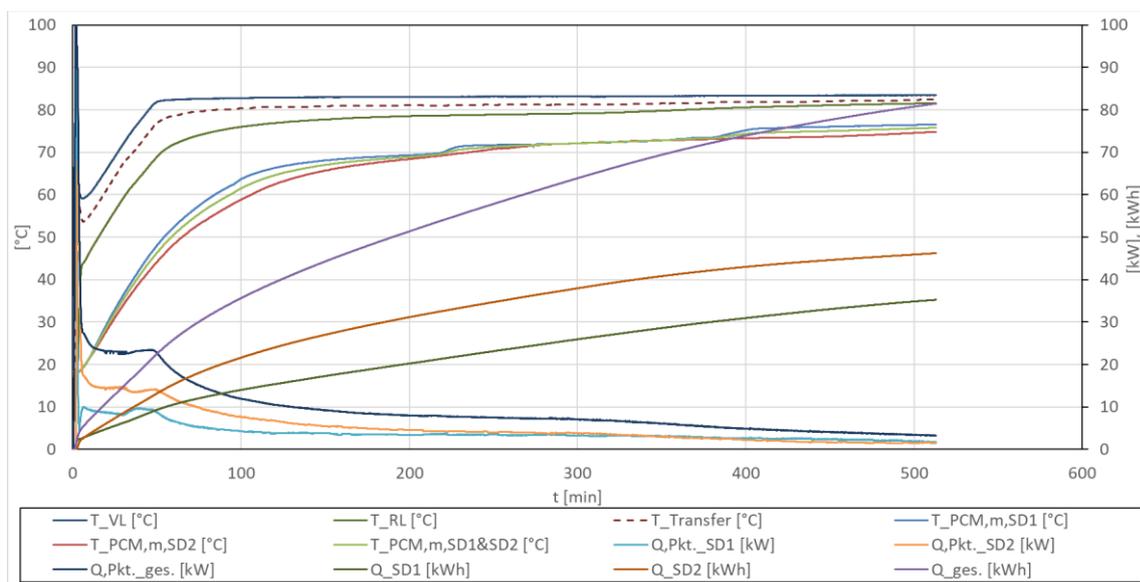


Abb. 1-53 Beladung kaskadierte Speicher im KWL vom 14.01.2020

In Abb. 1-54 sind die Abkühlkurven der einzelnen Speichertemperaturen zu sehen. Die mittleren PCM-Temperaturen der beiden Speicher befinden sich nach der Speicherdauer unterhalb der Schmelztemperatur. Einige der Thermoelemente zeigen noch Werte oberhalb der Schmelztemperatur von 70 °C. Das betrifft vor allem die oberen Thermoelemente, was für eine ausgebildete Temperaturschichtung in den Speichern spricht.

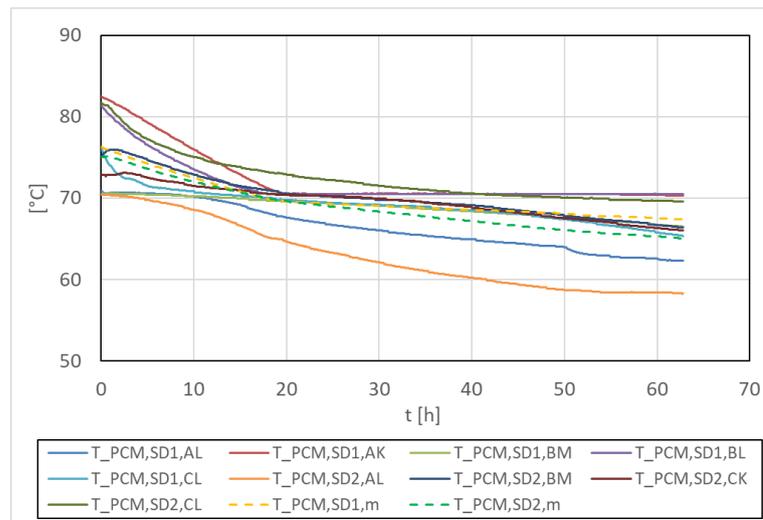


Abb. 1-54 Abkühlkurven/Wärmeverluste von 13.01.2020 bis 17.01.2020

Während der Entladung der kaskadierten Speicher konnten ca. 30 kW Wärme aus beiden Speichern ausgespeichert werden. Das entspricht Speicherverlusten zwischen 15 % und 36 %. Diese Verluste sprechen dafür, dass sich die Speicher noch im latenten Bereich des Speicherzustandes befinden, da die latente Wärme einen Anteil von 73 % ausmacht. Im Gegensatz zum Diagramm der Beladung kann hier kein Phasenwechsel anhand der mittleren PCM-Temperaturen ausgemacht werden, das bedeutet es ist kein Ansatz eines Plateaus zu sehen, da wie erwähnt die mittleren PCM-Temperaturen bereits nach der Speicherdauer unter der Schmelztemperatur liegen (siehe Abb. 1-55) Oberliegende Thermoelemente zeigten, aufgrund der Temperaturschichtung, im längeren Verlauf des Entladevorgangs die Schmelztemperatur und deuten somit auf noch verflüssigtes PCM hin.

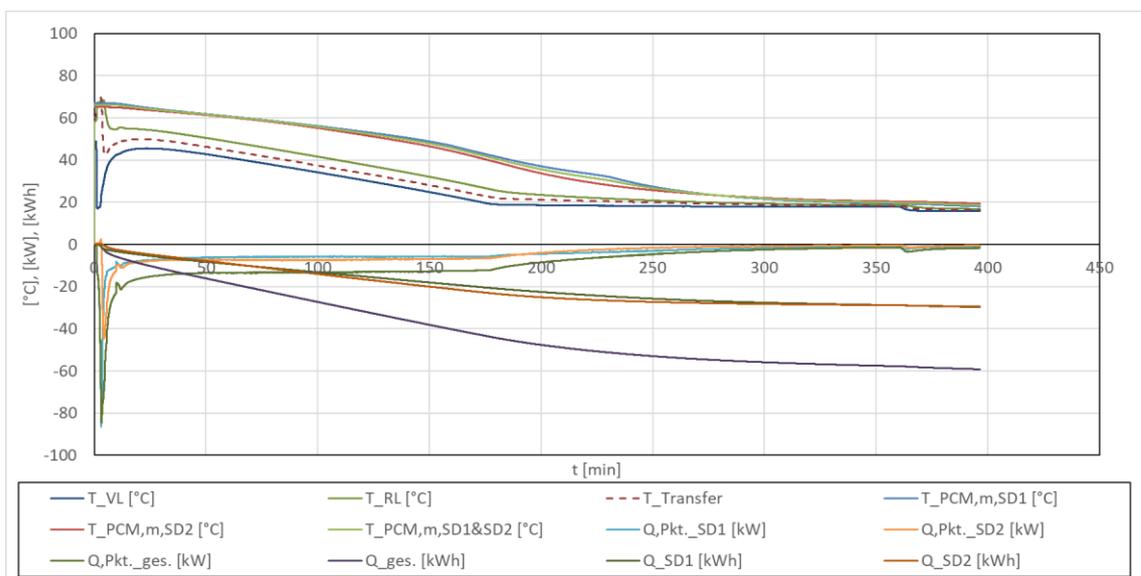


Abb. 1-55 Entladung kaskadierte Speicher im KWL vom 17.01.2020

Eine annähernd konstante Fluidtemperatur kann für einen Zeitraum von fast einer Stunde sichergestellt werden. Die mittleren Entladeleistungen sind gleich der mittleren Beladeleistungen, was ein etwas überraschendes Ergebnis ist. Entladeparameter und

Zielparameter der Entladung sind in Tab. 1-25 dargestellt. Alle Ergebnisse und Messwerte sind in Tab. 1-26 und Tab. 1-27 aufgelistet.

Tab. 1-25 Vorgegebene und geforderte Parameter einer Entladung

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Massestrom	$\dot{m}_F$	0,42	kg/s
Vorlauftemperatur	$\vartheta_{VL,E}$	20	°C
Fluiddruck	$p_{F,abs}$	1,5 ... 2	bar
geforderte Speicherdauer (Zeit zwischen Be- und Entladung)	$t_{Sp,g}$	64	h
geforderte minimale nutzbare Fluidtemperatur	$\vartheta_{RL,max,E}$	60	h
geforderte mittlere PCM-Temperatur nach Speicherdauer	$\vartheta_{PCM,m,E}$	70	°C
Überschlägig benötigte Wärme zur Vorwärmung der Vergaserkomponente	$Q_{VW,PG-KK}$	3 bis 8	kWh

Tab. 1-26 Gemessene Werte der Speichervalidierung von der Messung 14.01. – 17.01.2020

Bezeichnung	Speicher	Symbol	Wert	Einheit
Beladezeit	SD 1 + 2	$t_B$	8,5	h
mittlere Beladeleistung	SD 1	$\dot{Q}_{B,SD1}$	4,12	kW
	SD 2	$\dot{Q}_{B,SD2}$	5,41	
beladene Wärmemenge	SD 1	$Q_{B,SD1}$	35,24	kWh
	SD 2	$Q_{B,SD2}$	46,22	
minimale mittlere PCM-Temperatur	SD 1	$\vartheta_{PCM,B,max,SD1}$	76,58	°C
	SD 2	$\vartheta_{PCM,B,max,SD2}$	74,78	
Speicherdauer	SD 1 + 2	$t_{Sp}$	63	h
minimale nutzbare Fluidtemperatur	SD 1	$\vartheta_{Transf,E,max,SD1}$	50	°C
	SD 2	$\vartheta_{RL,E,max,SD2}$	55	
Entladezeit	SD 1 + 2	$t_E$	6,6	h
mittlere Entladeleistung	SD 1	$\dot{Q}_{E,SD1}$	-4,50	kW
	SD 2	$\dot{Q}_{E,SD2}$	-4,46	
entladene Wärmemenge	SD 1	$Q_{E,SD1}$	-29,75	kWh
	SD 2	$Q_{E,SD2}$	-29,46	
Anteil Speicherverluste	SD 1	$SV_{SD1}$	15,58	%
	SD 2	$SV_{SD2}$	36,27	

Tab. 1-27 Gemessene Werte der Speichervalidierung von der Messung 03.12. – 06.12.2019

Bezeichnung	Speicher	Symbol	Wert	Einheit
Beladezeit	SD 1 + 2	$t_B$	8,9	h
mittlere Beladeleistung	SD 1	$\dot{Q}_{B,SD1}$	4,09	kW
	SD 2	$\dot{Q}_{B,SD2}$	5,11	
beladene Wärmemenge	SD 1	$Q_{B,SD1}$	36,33	kWh
	SD 2	$Q_{B,SD2}$	45,25	
minimale mittlere PCM-Temperatur	SD 1	$\vartheta_{PCM,B,max,SD1}$	76,46	°C
	SD 2	$\vartheta_{PCM,B,max,SD2}$	76,56	
Speicherdauer	SD 1 + 2	$t_{Sp}$	65	h
minimal nutzbare Fluidtemperatur	SD 1	$\vartheta_{Transf,E,max,SD1}$	50,4	°C
	SD 2	$\vartheta_{RL,E,max,SD2}$	55,4	
Entladezeit	SD 1 + 2	$t_E$	5,6	h

Bezeichnung	Speicher	Symbol	Wert	Einheit
mittlere Entladeleistung	SD 1	$\dot{Q}_{E,SD1}$	-4,93	kW
	SD 2	$\dot{Q}_{E,SD2}$	-5,31	
entladene Wärmemenge	SD 1	$Q_{E,SD1}$	-27,71	kWh
	SD 2	$Q_{E,SD2}$	-29,80	
Anteil Speicherverluste	SD 1	$SV_{SD1}$	23,74	%
	SD 2	$SV_{SD2}$	34,14	

Trotz des Zusammenschaltens der beiden Speicher konnte die geforderte mittlere Beladeleistung von 11 kW in beiden vermessenen Speicherzyklen nicht erreicht werden. Für die Integration der Speicher am Biomasse-Vergasungs-BHKW wurde somit eine kombinierte Produktgaskühlung aus Latentwärmespeichern und Pufferspeicher zurückgegriffen. Ziel war es, die gesamte Wärme aus dem Produktgas-Kühlkreislauf ausschließlich in die Latentwärmespeicher zu fahren. Die geforderte Beladedauer von unter 10 h konnte dennoch eingehalten werden und die Speicher sollten innerhalb einer Messfahrt am Biomasse-Vergasungs-BHKW beladen werden.

Zwischen den beiden Versuchsanlagen Wärmespeichertestanlage und Biomasse-Vergasungs-BHKW gibt es zwei unterschiedliche Fahrweisen für die angewendeten Speicher. Während an der Wärmespeichertestanlage die Wärme bei der Entladung kontinuierlich rückgekühlt wird, bewirkt die Wärme am BHKW eine Aufwärmung der Komponenten des PG-KK, welche im Laufe der Vorwärmung die Entladeleistung der Speicher vermindert, solange bis sich die Temperaturen angeglichen haben und keine Wärme mehr übertragen wird. Dadurch können die Validierungsmessung nicht zu 100% Aufschluss auf die Anwendbarkeit der Latentwärmespeicher am Biomasse-Vergasungs-BHKW geben

Bei einer geschätzten Gesamtmasse an Stahl und Wasser von 1000 kg der Komponenten kommt man auf einen Wärmebedarf zwischen 3 und 8 kWh. Die nach der Speicherdauer von 64 h Stunden enthaltene Wärme von im Schnitt 58 kWh, bei einer Temperatur von 55 °C, wird für die Vorwärmung der Komponenten das Produktgaskühlkreislauf ausreichen. Komponenten sollten auf eine Temperatur von > 45 °C aufgeheizt werden, um die bisherige Kondensatbildung in der Produktgasleitung zu reduzieren. Etwa bei diesen Temperaturen kondensieren Bestandteile des Produktgases aus.

Die erwarteten Beobachtungen aus der Theorie konnten auch in der Praxis festgestellt werden. So wurde der SD 2 aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des PCM SP70 schneller beladen und weist eine höhere Leistung auf. Dieser Vorteil wird jedoch bei der Überbrückung der Speicherdauer zum Nachteil, weil dadurch etwa 36 % der Wärme verloren geht. Der Paraffinspeicher (SD 1) verliert dagegen nur rund 15 % seiner eingespeicherten Wärme.

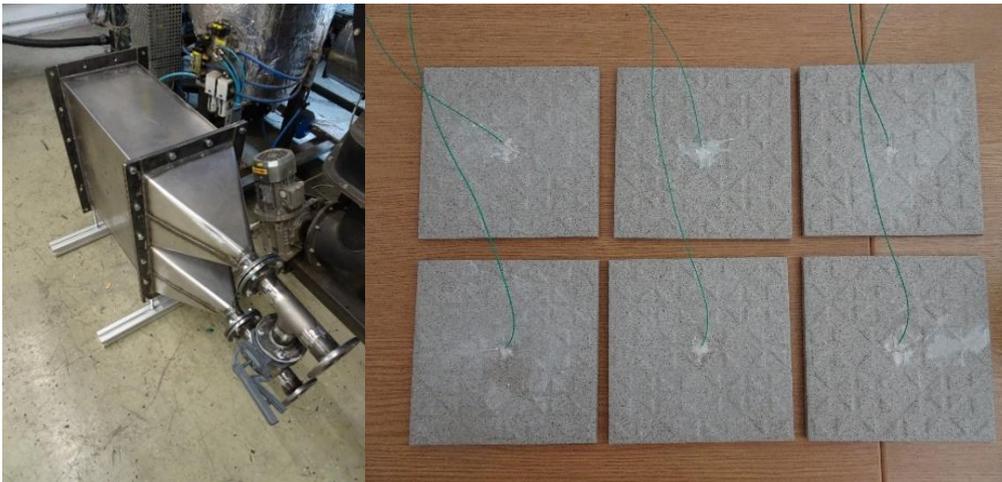
#### - Fazit

- Die Beladeleistung ist zu gering, auch in kaskadierter Fahrweise.
- Temperaturniveau ist nach der geforderten Speicherdauer vorhanden um den Produktgas-Kühlkreislauf über die Gaskondensationstemperatur aufzuwärmen.
- Nach der Speicherdauer enthaltene Wärme reicht aus um die Komponenten des PG-KK auf die minimale nutzbare Fluidtemperatur aufwärmen zu können.
- Platzangebot für beide Speicher ist am Biomasse-Vergasungs-BHKW vorhanden.

## LuVo-Speicher

### - Aufbau

Auch die Einzelkomponenten des im vorangegangenen Projekt TCV III [11] entwickelten und gefertigten LuVo-Speichers standen von Beginn an zur Verfügung. Somit haben sich die ersten Tätigkeiten am LuVo-Speicher mit dessen Aufbau befasst. Zuerst wurden die Komponenten Stellprofile, Doppeldiffusor und der Bypass mit Stellklappe am Doppelkanal montiert. Der Doppelkanal dient als Speicherbehälter und Grundkörper des Speichers. Zu sehen sind diese Komponenten in Abb. 1-56.



*Abb. 1-56 links: vormontierter Luvo-Speicher, rechts: mit Thermoelementen versehene Fliesen*

Anschließend wurden sechs Fliesen im Kern mit Thermoelementen ausgerüstet. Dafür wurden die Fliesen mit einem Diamantbohrer bis zur halben Fliesendicke angebohrt und die Thermoelemente mit Thermoguss eingeklebt (siehe Abb. 1-56). Der Thermoguss hat ähnliche Materialeigenschaften wie die Keramik der Fliesen. Dies ist besonders wichtig, da bedingt durch die kurze Wegstrecke, die Wärmeleitung über die Bohrstelle großen Einfluss auf die von den Thermoelementen gemessene Temperatur hat. Für die Bestückung des Speichers mit Fliesen wurden, 200 kg (12,2 m<sup>2</sup>) Fliesen für Nassräume bestellt. Auf diesen Fliesen befinden sich Erhebungen/Noppen, welche beim Betreten Rutschfestigkeit garantieren sollen. Im LuVo-Speicher dienen diese Noppen als Abstandshalter zwischen den gestapelten Fliesen und gewährleisten eine Fülle an kleinen Strömungskanälen. Somit kann eine große Wärmeübertragungsfläche und eine hohe Leistung sichergestellt werden. Nach dem Aushärten der Thermogussmasse wurden alle Fliesen in den Speicher gestapelt. Insgesamt enthält der Speicher 496 Fliesen mit einer Gesamtmasse von 171,5 kg. Die Fliesen besitzen ein Format von 150x150x9,5 mm, sodass sie die zwei Kanäle mit den Abmaßen von jeweils 300x300x600 mm wie in Abb. 1-57 ausfüllen.



Abb. 1-57 Links: teilbestückter LuVo-Speicher, mitte: an den Heißluftkanal-Versuchsstand gekoppelter und voll bestückter Speicher, rechts: Bezeichnung der Fliesenstapel im Speicher und Darstellung des Strömungsweges

Nach dem Schließen des Speichers mit dem Umlenkblech konnte eine erfolgreiche Druck- und Strömungsprüfung durchgeführt werden, wobei der Druckverlust über den Speicher geringer ausgefallen ist als erwartet. Selbst bei voll geöffnetem Bypass strömte noch Luft durch den Speicher. Aus diesem Grund musste eine zweite Absperrklappe zum aktiven Absperrn des Speichers installiert werden. Die Klappe wurde am Austritt des Speichers angebracht. Nun kann das Potential der manuellen Volumenstromregelung ausgeschöpft werden. Anschließend wurde der Speicher mit einer blechummantelten 100 mm dicken Mineralwollisolierung ausgestattet um Wärmeverluste zu minimieren (siehe Abb. 1-58).

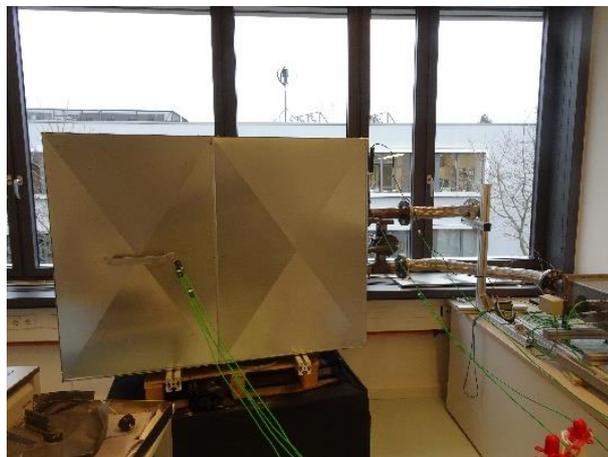


Abb. 1-58 Isolierter und an den Heißluftkanal angeschlossener LuVo-Speicher ohne Zuleitungsisolierung

In Abb. 1-59 ist zu sehen wo sich die mit Thermoelementen versehenen Fliesen befinden und in welcher Reihenfolge die Fliesenstapel durchströmt werden.

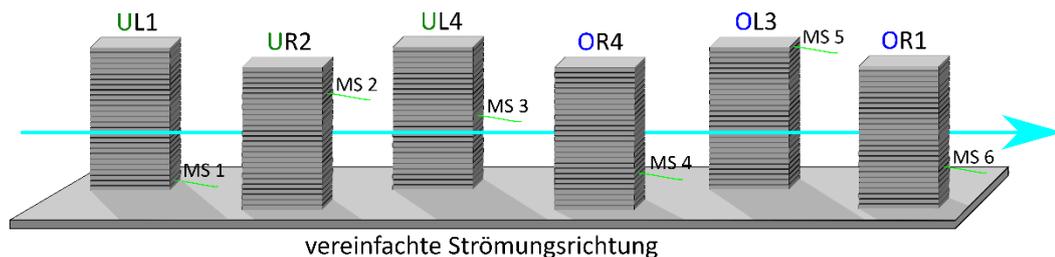


Abb. 1-59 Positionierung der mit Thermoelementen versehenen Fliesen in den Stapeln

Die Messstellen 1 bis 6 befinden sich im Speicher und spiegeln die Speichertemperaturen wieder. Messstelle 0, 7 und 8 erfassen die Fluidtemperatur am Eintritt vor dem Bypass, am Austritt aus dem Speicher und die Mischtemperatur von Bypass und Speicheraustritt (siehe Abb. 1-60).

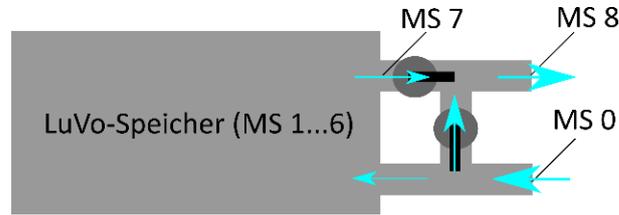


Abb. 1-60 Positionierung der Fluidthermoelemente

### - Validierungsmessungen

Am Biomasse-Vergasungs-BHKW liegen im stationären Betrieb aktuell Vergasungslufttemperaturen von bis zu 340 °C vor. Diese Luft wird mit dem heißen Produktgas und Wärme aus der Nachreformung über Wärmeübertrager vorgewärmt. Ein Teil dieser vorgewärmten Luft soll abgezapft und durch den LuVo-Speicher geführt werden, wodurch dieser mit Wärme beladen wird. Die Vorgabe besteht darin, nur so viel Wärme zu entnehmen, dass die Mischtemperatur hinter der Zusammenführung von Speicheraustritt und Bypass mindestens 200 °C beträgt. Leider wurde diese Vorgabe bei der Auslegung des Speichers im Projekt TCV III vernachlässigt und mit dem gesamten Massestrom zur Beladung des Speichers gerechnet. Möglicherweise ergeben sich bei der Beladung mit einem Teilmassestrom zu große Beladungszeiten um den Speicher in der vorgegebenen Zeit von 10 Stunden zu laden. Die Vorgabezeit von 10 Stunden entspricht der Vorgabezeit für eine Speicherbeladung aus dem Abschnitt Validierung der PCM-Speicherdemonstratoren.

Eine im Projekt durchgeführte Simulation bestätigt diese Annahme. In Abb. 1-61 sind die Ergebnisse der Beladung des simulierten LuVo-Speicher mit vollen Massestromes und 33 % des Massestromes zu sehen. Bei einer Beladedauer von 23 Stunden könnte der Speicher nicht innerhalb einer Messfahrt bis auf ein zur Vorwärmung nützlich Temperaturniveau gebracht werden. Genaueres werden die Messungen am Heißluftkanal zeigen.

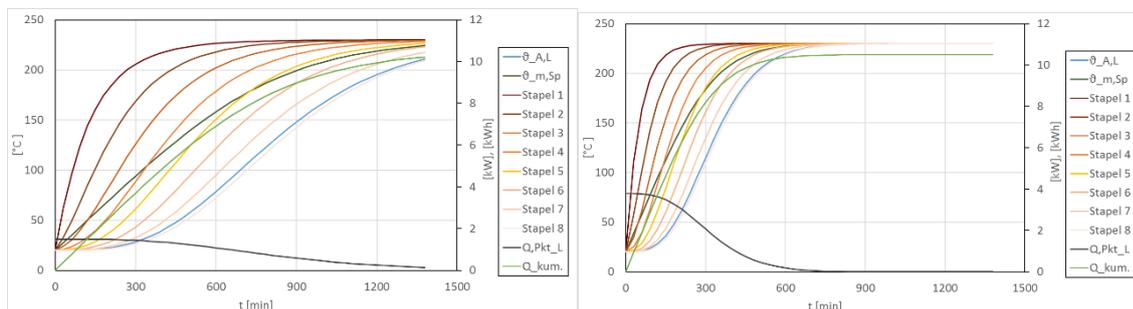


Abb. 1-61 Links: Simulation LuVo-Speicher mit 100 % Luftmassestrom ( $t_{B,100} = 23$  h), rechts: Simulation LuVo-Speicher mit 33 % Luftmassestrom ( $t_{B,33} = 9$  h)

Die 33 % ergeben sich aus der Mischtemperatur des Massestromes durch den Bypass mit  $\vartheta_{MS0} = 230$  °C und der geforderten Mischtemperatur von  $\vartheta_{MS8} = 150$  °C.

$$\vartheta_{MS8} \approx \frac{2}{3} \vartheta_{MS0} \approx 150^{\circ}\text{C}$$

Der Faktor 2/3 ergibt sich aus dem Verhältnis der Vergasungslufttemperatur von (>) 300 °C und der geforderten minimalen Vergasungslufttemperatur von 200 °C im stationären Zustand des Biomasse-Vergasungs-BHKW. Dies ist der Anteil des Massestromes der den Bypass mit  $\vartheta_{MS0} = 230 \text{ °C}$  passiert. Die Temperatur von 20 °C, welche der Speicher im nichtbeladenen Zustand aufweist, ist hierbei als Sicherheit vernachlässigt worden. Am Versuchsstand „Heißluftkanal“ (HK) können nur Temperaturen von 280 °C erzeugt werden. Auf dem Weg bis zum Testobjekt, in diesem Fall der LuVo-Speicher, geht Wärme verloren, und es liegen nur noch 230 °C vor. Bei der Speicherbeladung steigt mit der Speichertemperatur auch die Luftaustrittstemperatur an. Erhöht sich dadurch auch die Mischtemperatur, kann mit den Luftklappen mehr Luft in den Speicher gegeben werden. Aber nur so viel, dass die Mischtemperatur von 150 °C nicht unterschritten wird. Dadurch, dass nur Temperaturen von 230 °C anliegen musste auch die Vorgabe für die Mischtemperatur im Verhältnis von 2/3 reduziert werden, dies ergibt die genannten 150 °C.

Die gespeicherte Wärme soll zur Beschleunigung des Anfahrverhaltens, genauer gesagt der Vergasung, der darauffolgenden Messfahrt genutzt werden. Die geforderte Speicherdauer ist wie in Abschnitt „Validierung der PCM-Speicherdemonstratoren“ mit 64 Stunden (über ein Wochenende) angesetzt. Na ca. 8 Stunden kommt der Vergasungsprozess gänzlich zum Erliegen, das heißt es befindet sich kein Glutbett mehr im Vergaser und die Komponenten sind teilweise ausgekühlt. Ab diesem Zeitpunkt kann eine Vorwärmung hilfreich sein.

Der Gesamtmassestrom entspricht dem Vergasungsluftmassestrom am Vergaser (50 kg/h = 0,014 kg/s) und wird am Heißluftkanal in der kalten Schiene mittels Geschwindigkeitsmessung, Querschnitt und Dichte bei Umgebungstemperatur ermittelt. Mit der nachfolgenden Formel lässt sich der Massestrom  $\dot{m}_{LuVo}$  berechnen. Mit diesem Massestrom und den Ein- und Austrittstemperaturen MS0 und MS7, kann eine Bilanzierung des Speichers vorgenommen werden. Beim Nachführen der Luftklappe ändert sich der Massestrom entsprechend der Temperaturen MS0, MS7 und MS8.

$$\dot{m}_{LuVo} = \frac{\dot{m}_{ges} (\vartheta_{MS0} - \vartheta_{MS8})}{(\vartheta_{MS0} - \vartheta_{MS7})}$$

In Abb. 1-62 ist zu erkennen, was sich in der Simulation angedeutet hat. Die betrachteten Messstellen in den Fliesen erreichen, über eine Messdauer von über 8 Stunden, nicht die geforderten Temperaturen. Messstelle 6 sollte in diesem Zeitraum ca. 200 °C erreicht haben, da die Fluidaustrittstemperatur bei der Entladung stark von der Temperatur der am Ende des Speichers befindlichen Speichersegmente abhängt. Somit kann festgehalten werden, dass der Speicher für den zur Verfügung stehenden Luftmassestrom überdimensioniert ist. Auch das Entfernen von Fliesen brachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Zuerst wurden 4 und dann insgesamt 6 Fliesenstapel entfernt, was auf die Wärmeverluste bezogen ein ungünstiges Verhältnis zwischen Speicherkapazität und Speichervolumen ergab.

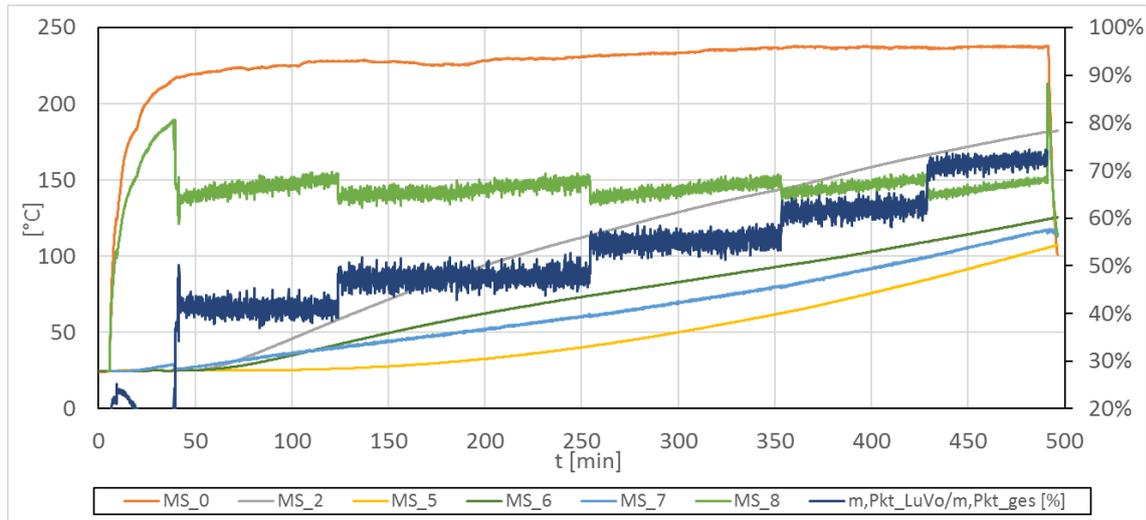


Abb. 1-62 Messwerte einer Validierungsmessung des LuVo-Speichers mit Luftklappennachführung

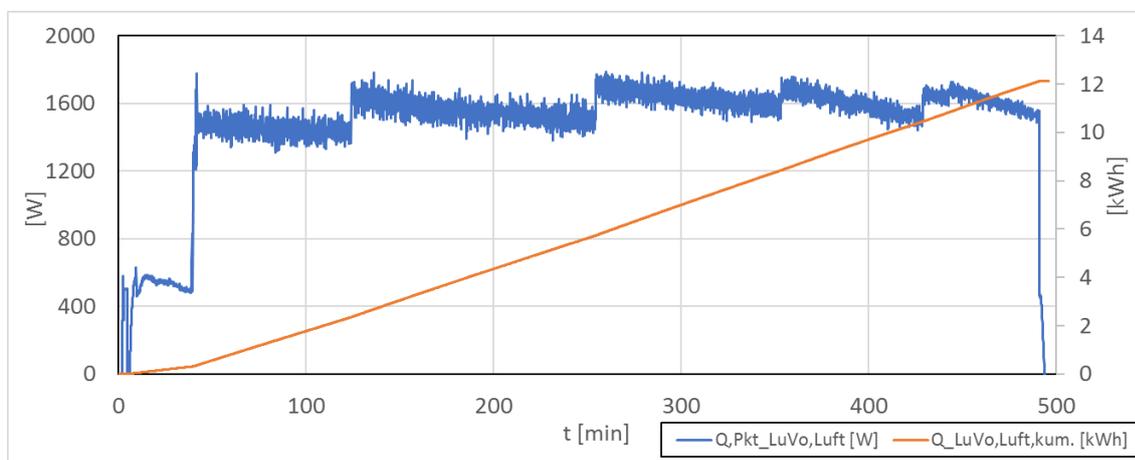


Abb. 1-63 Leistungsverlauf und kumulierte eingespeicherte Wärmemenge des LuVo-Speichers

Die geforderten Parameter wurden für die Validierungsmessungen am Heißluftkanal im Labor Energiesystemtechnik angepasst, da dort eine maximale Vorlauftemperatur von nur 230 °C erreicht wird. In Tab. 1-28 und Tab. 1-29 sind die geforderten Parameter für den Einsatz am Holzvergaser (HVG) und die Ergebnisse der Validierungsmessungen am HK aufgelistet.

Auf die Speicherentladung wurde aufgrund der nicht abgeschlossenen Beladung und der niedrigen erreichten Speichertemperaturen verzichtet. Dafür wurde eine Simulation durchgeführt. Die wichtigsten Parameter bei der Entladung sind die noch vorliegende mittlere Speichertemperatur und die über eine gewisse Dauer bereitgestellte nutzbare Fluidaustrittstemperatur. Der Bedarf an Wärme zur Vorwärmung kann nur grob abgeschätzt werden. Eine Vorwärmedauer von 30 Minuten bei einer Austrittstemperaturänderung von maximal 20 Kelvin, sollte realisierbar sein. Ähnlich wie in Abschnitt „Validierung der PCM-Speicherdemonstratoren“ bestehen Unterschiede bei der Speicherentladungs-Fahrweise zwischen Heißluftkanal und Holzvergaser. Während am HK immer wieder Kaltluft aus der Umgebung angesaugt, wärmt sich die durch die Produktgasleitung strömende Luft aus dem Speicher über Wärmeübertrager selbst vor. So verbleibt ein Teil der Wärme im Kreislauf. Und der Wärmebedarf sinkt im Vergleich zu einer nichtvorhandenen Wärmerückgewinnung.

Tab. 1-28 Geforderte Parameter eines LuVo-Speichers an den betreffenden Versuchsständen

Kategorie	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
am HVG gefordert	Beladezeit	$t_{B,HVG}$	< 10	h
	Speichertemp. nach Beladung	$\vartheta_{Sp,m,B}$	> 300	°C
	Speicherdauer	$t_{B \rightarrow E}$	> 64	h
	Speichertemp. nach Speicherdauer	$\vartheta_{Sp,m,B \rightarrow E}$	> 200	°C
	Entladezeit bei Temp. >180 °C	$t_{E,180,HVG}$	> 45	min
am HK gefordert	Beladezeit	$t_{B,HVG}$	< 10	h
	Speichertemp. nach Beladung	$\vartheta_{Sp,m,B}$	> 210	°C
	Speicherdauer	$t_{B \rightarrow E}$	> 64	h
	Speichertemp. nach Speicherdauer	$\vartheta_{Sp,m,B \rightarrow E}$	> 150	°C
	Entladezeit bei Temp. > 130 °C	$t_{E,130,HVG}$	> 45	min

Tab. 1-29 Ergebnisse der Simulation und Validierungsmessung (Parameter, welche die Anforderungen nicht erfüllt haben sind rot markiert)

Kategorie	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Simulation LuVo-Sp. 1 am HK (keine Speicherdauer simuliert)	Beladezeit	$t_{B,HK}$	23	h
	Speichertemp. nach gef. Beladezeit	$\vartheta_{Sp,m,10h,B}$	160	°C
	Speicherkapazität bis Ende Beladung	$Q_B$	10,4	kWh
	Mittlere Beladeleistung	$\dot{Q}_{B,m}$	900	W
	Entladezeit bei Temp. >130 °C	$t_{E,130,HK}$	120	min
Ergebnisse Validation LuVo-Speicher (keine Entladung durchgeführt)	Beladezeit	$t_{B,HVG}$	> 10	h
	Speichertemp. nach gef. Beladezeit	$\vartheta_{Sp,m,10h,B}$	138,2	°C
	Speicherdauer	$t_{B \rightarrow E}$	64	h
	Speichertemp. nach Speicherdauer	$\vartheta_{Sp,m,B \rightarrow E}$	54	°C
	Speicherdauer bis Speichertemp. 150 °C	$t_{B \rightarrow E,150}$	2,5	h
	Speicherkapazität bis Ende Beladung	$Q_B$	12,14	kWh
	Mittlere Beladeleistung	$\dot{Q}_{B,m}$	1560	W

Auch wenn der LuVo-Speicher hinsichtlich der Beladezeit nicht für den Einsatz im Laborbetrieb geeignet ist, birgt seine Speicherkapazität Potentiale, wenn es darum geht längere Stillstandzeiten an Vergaser- oder Feuerungsanlagen zu überbrücken.

Für den Laborbetrieb des Biomasse-Vergasungs-BHKW wurde sich für die Konstruktion eines kleineren LuVo-Speichers entschieden. Dieser erhielt die Bezeichnung „LuVo-Speicher 2“. Eine Konstruktionsansicht ist in Abb. 1-64 zu sehen. Die Bypass-Verrohrung wurde übernommen und die Umlenkung extern über eine Rohrleitung realisiert. Der Speicher besitzt einen einfachen kanalförmigen Behälter und bietet Platz für 4 x 15 Fliesen mit einer Masse von 20,7 kg. Zur möglichen Skalierung des Speichers, kann an Stelle des oberen Rückführrohres die gleiche Speichereinheit hinzugefügt werden.

Die Vorgehensweise am LuVo-Speicher 2 war analog zu der des LuVo-Speicher.

Aufbau → Druck – und Strömungsprüfung → Isolierung → Validierungsmessung → Auswertung → Bewertung



Abb. 1-64 Links: Konstruktionsdarstellung des LuVo-Speicher 2 im Halbschnitt; rechts: LuVo-Speicher mit Fliesen bestückt

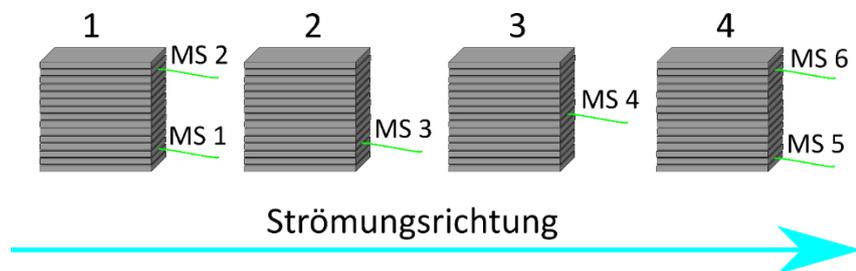


Abb. 1-65 Positionierung der mit Thermoelementen bestückten Fliesen im LuVo-Speicher 2



Abb. 1-66 LuVo-Speicher 2 mit halber Isolierung und Bypass-Verrohrung am Heißluftkanal

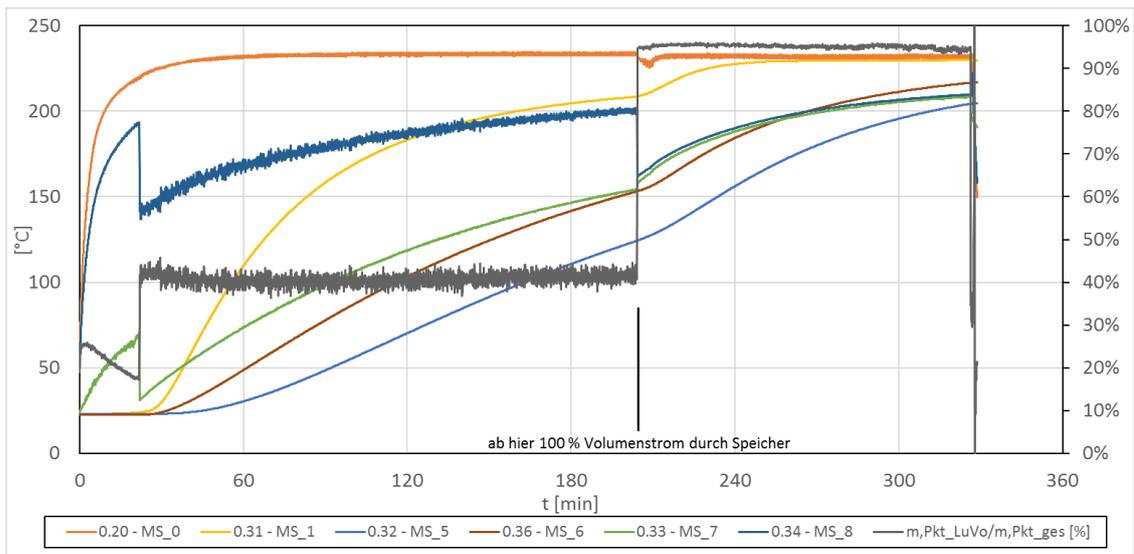


Abb. 1-67 Messwerte einer Validierungsmessung des LuVo-Speicher 2 mit Luftklappennachführung

Die Diagramme der Messergebnisse zeigen, dass eine Beladung des kleinen LuVo-Speicher in den geforderten 10 Stunden problemlos realisierbar ist. Es brauchte nur 5,5 Stunden den Speicher in seiner Mitteltemperatur über 200 °C zu beladen. In Abb. 1-67 sind Temperatur- und Massestromverhältnisse dargestellt, in Abb. 1-68 der Leistungsverlauf und die eingespeicherte kumulierte Wärmemenge.

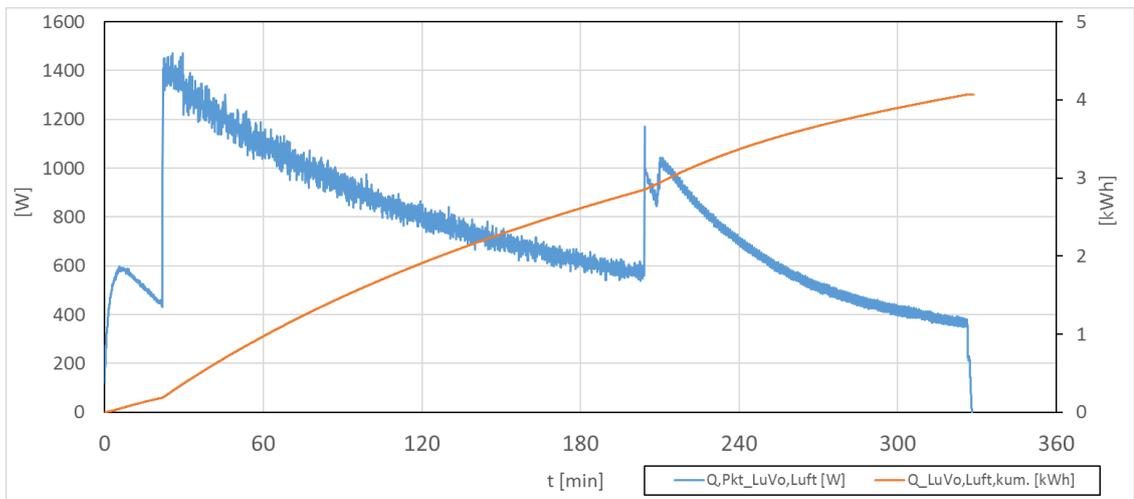


Abb. 1-68 Leistungsverlauf und kumulierte eingespeicherte Wärmemenge des LuVo-Speichers

Hinsichtlich der Speicherdauer und der damit verbundenen Wärmeverluste, kann der LuVo-Speicher 2 nicht die geforderten Parameter einhalten. Die geforderte 150 °C werden länger als beim LuVo-Speicher 1 gehalten, jedoch liegt dies am niedrigeren erreichten Temperaturniveau des großen Speichers. In Tab. 1-30 sind die Ergebnisse der Speichersimulation und der Validierungsmessung für den LuVo-Speicher 2 dargestellt. Die Speicher unterscheiden sich in den Simulationen hinsichtlich der Speicherkapazität in dem Verhältnis 8:1, entsprechend der Mengen der enthaltenen Fliesen. Die Leistungsaufnahme ist fast identisch, da die Wärmeübertragung vom Fluid an die Fliesen auf einer Fläche stattfindet, welche beide mit ihrer großen inneren Oberfläche liefern.

Tab. 1-30 Ergebnisse der Simulation und Validierungsmessung für den LuVo-Speicher 2 (Parameter, welche die Anforderungen nicht erfüllen sind rot markiert)

Kategorie	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Simulation LuVo-Sp. 2 am HK (keine Speicherdauer simuliert)	Beladezeit	$t_{B,HK}$	4	h
	Speichertemp. nach gef. Beladezeit	$\vartheta_{Sp,m,10h,B}$	230	°C
	Speicherkapazität bis Ende Beladung	$Q_B$	1,3	kWh
	Mittlere Beladeleistung	$\dot{Q}_{B,m}$	610	W
	Entladezeit bei Temp. >130 °C	$t_{E,130,HK}$	30	min
Ergebnisse Validation LuVo-Speicher 2 (keine Entladung durchgeführt)	Beladezeit	$t_{B,HVG}$	5,5	h
	Speichertemp. nach gef. Beladezeit	$\vartheta_{Sp,m,10h,B}$	217,1	°C
	Speicherdauer	$t_{B \rightarrow E}$	64	h
	Speichertemp. nach Speicherdauer	$\vartheta_{Sp,m,B \rightarrow E}$	33	°C
	Speicherdauer bis Speichertemp. 150 °C	$t_{B \rightarrow E,150}$	6,16	h
	Speicherkapazität bis Ende Beladung	$Q_B$	4,07	kWh
	Mittlere Beladeleistung	$\dot{Q}_{B,m}$	762	W

Die Messungen haben ergeben, dass sich mit Fliesen bestückte sensible Speicher für eine Hochtemperatur Luftvorwärmung eignen. Es waren kein nachteiliges Verhalten im Umgang mit hohen Temperaturen zu beobachten. Einzig die Speicherung bei hohen Temperaturen führt bei großer Speicherdauer für hohe Verluste in der bereitgestellten Exergie. In Abb. 1-69 sind die mittleren Temperaturen der beiden Speicher während der Beladung bzw. der Speicherdauer dargestellt.

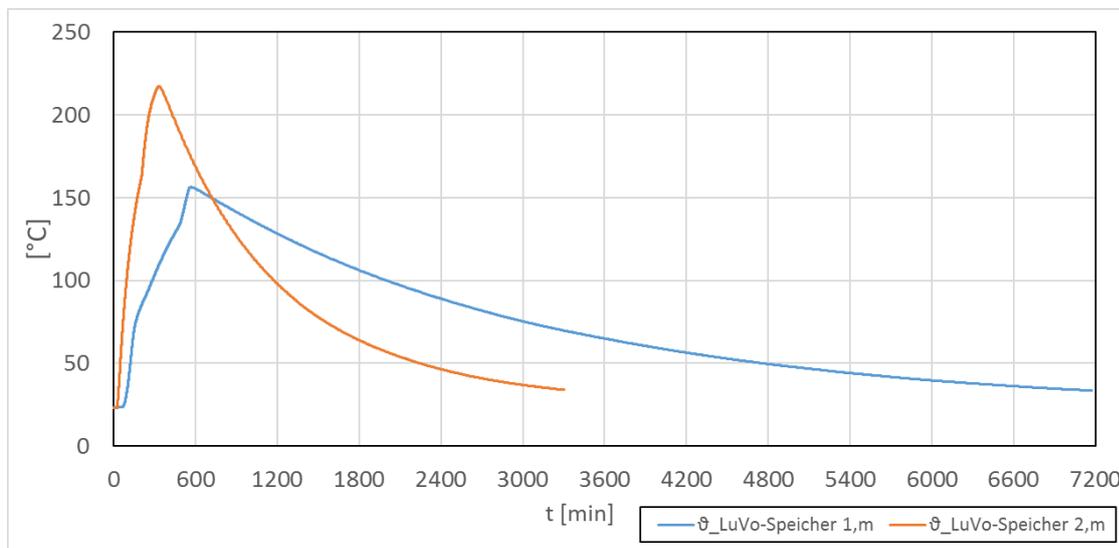


Abb. 1-69 Mittlere Speichertemperatur während Beladung und anschließender Speicherung von LuVo-Speicher 1 und LuVo-Speicher 2

In Bezug auf die Validierungsmessungen wird die Vorwärmung des Vergasungsmittels am Biomasse-Vergasungs-BHKW nach einem Zeitraum von 8 Stunden angestrebt. Dies ist der Zeitraum in dem die Vergasung zum Erliegen kommt und nach dem eine Vorwärmung sinnvoll ist. Somit spiegeln die 8 Stunden den Zeitraum zwischen Be- und Entladung des Speichers wieder. Zu Beginn des Arbeitsabschnittes Integration des LuVo-Speichers wird sich vorwiegend auf die Integration des LuVo-Speicher 2 konzentriert, welcher nicht Teil dieses Berichtes ist.

- Fazit

- Prinzip des fliesenbestückten Hochtemperatur-LuVo-Speicher sinnvoll.
- Heißluftleistung am Vergaser zu gering um größere Speicher in Messfahrdauer zu beladen.
- Reduzierung der Baugröße → keine Kompensation von Wärmeverlusten über mittels Speicherkapazität während einem längeren Zeitraum.

## AE2.2 Technische Integration der Speicher in das Biomasse-Vergasungs-BHKW

### PCM-Speicherdemonstratoren

Nachdem die Planung bereits im Projekt TCV III [11] durchgeführt wurde, konnte nach den in AE2.1 beschriebenen Validierungsmessungen direkt mit der Integration begonnen werden. Für die Integration mussten die Speicher vom Zittauer Kraftwerkslabor in die Halle des Biomasse-Vergasungs-BHKW transportiert werden. Der vorgesehene Aufstellort konnte verwendet werden und befindet sich unter dem Brennstoff-Tagesbehälter (Abb. 1-70).



*Abb. 1-70 Aufstellort der Speicher unter dem Tagesbehälter der Anlage*

Der speichereigene Kreislauf wurde nach Abb. 1-71 an den Produktgas-Kühlkreislauf mittels Plattenwärmeübertrager im Gegenstrom gekoppelt. Der Aufbau des Kreislaufes benötigte mehrere Tage und dauerte vom 25. bis 27.07.2020.

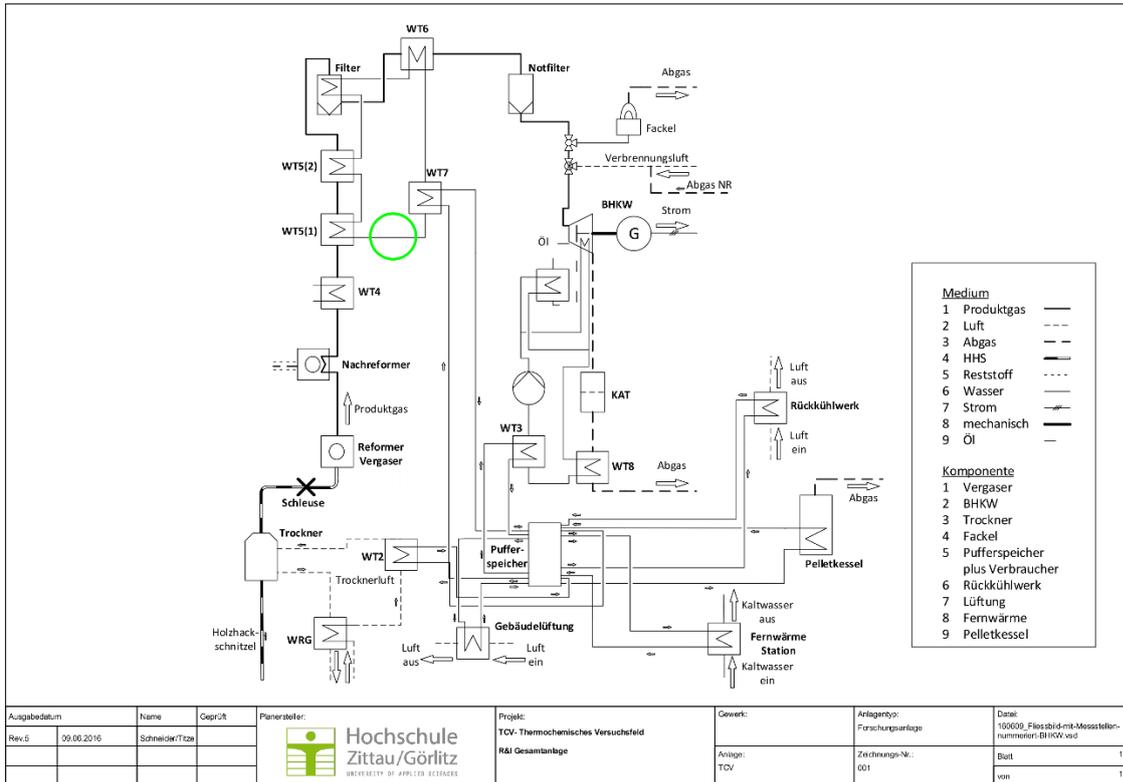


Abb. 1-71 R&I-Fließschema der Biomasse-Vergasungs-Anlage, markiert die Anschlussstelle des Speicherkreislaufes

Einzelne Komponenten des Kreislaufs konnten schon im Vorgängerprojekt beschafft werden. So z.B. die Pumpe und die Anschlusskupplungen für die Speicher. In der folgenden Abb. 1-72 sind Fotos zu sehen, welche den installierten Speicherkreislauf zeigen.



Abb. 1-72 links Anschlussstelle des Speicherkreislaufes mit Pumpe, MAG und WÜ; recht: gesamter Kreislauf mit Rohrstrecke zu den Speichern unter dem Tagesbehälter

Die Speicher wurden wie in den Validierungsmessungen in einer Kaskadenschaltung in Reihe angeordnet, bei der der Speicherdemonstrator 1 primär durchströmt wird. Messtechnisch werden der Fluidmassestrom, die PCM-, Vor-, Transfer-, und Rücklauftemperaturen erfasst und aufgezeichnet. Dazu diente uns das

Messdatenerfassungssystem des Heißluftkanales aus dem Labor Energiesystemtechnik der HSZG. Dadurch können die aktuell vorliegenden Temperaturen und somit die Ladezustände der Speicher erfasst werden. Da sich zwischen den Kreisläufen ein Wärmeübertrager befindet, wurde eine leicht geringere maximale Vorlauftemperatur im Vergleich zu den Validierungsmessungen erreicht. Dieser war im Verlauf der Validierungsmessungen noch nicht vorgesehen. Belade- und Entladevorgang werden mit der Stromversorgung der Speicherkreislaufpumpe und dem Öffnen der Absperrhähne an den Speicherzuleitungen gestartet. Der Massestrom ist mit 0,42 ... 0,48 kg/s identisch zu den Validierungsmessungen.

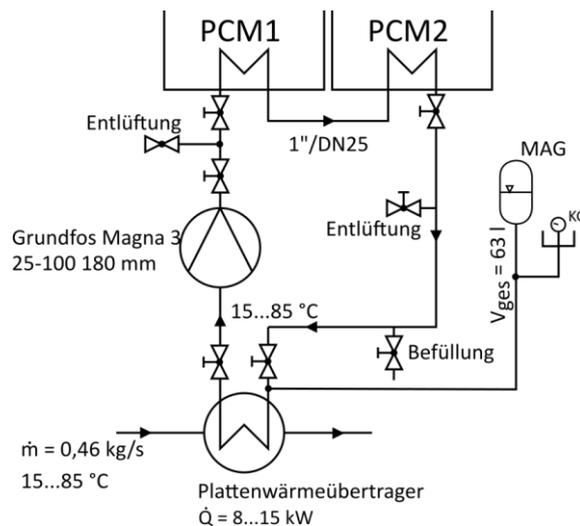


Abb. 1-73 Schema des Speicherkreislauf, Revision nach erfolgtem Aufbau

Nach der abgeschlossenen Integration folgte eine Druck- und Strömungsprüfung sowie Entlüftung des Kreislaufs samt Speicher. Die Druckprüfung- und Strömungsprüfung wurden, bis auf ein paar Verschraubungen welche aufgrund von Leckagen nachgezogen werden mussten, bestanden. Damit war die Integration der Latentwärmespeicher in die Versuchsanlage abgeschlossen. Informationen zu dem Anlagenverhalten mit Vorwärmung des Produktgaskühlkreislaufs und welche Änderungen in der Fahrweise vorgenommen werden mussten finden sich im nachfolgendem AE2.3.

## AE2.3 Abstimmung der Speicher auf den Anlagenbetrieb

### PCM-Speicherdemonstratoren

Mit dem Betrieb der Speicher an der Biomasse-Vergasungs-Anlage müssen Veränderungen in der Anlagenfahrweise vorgenommen werden. So zum Beispiel muss das Mischventil, welches bei Erreichen eines bestimmten Temperaturwertes öffnet und Wärme aus dem Produktgas-Kühlkreislauf auf den Pufferspeicher übergibt, per Handsteuerung geschlossen werden. Dies trifft zu, wenn die Speicher be- und entladen werden. Der Schwellwert für die automatische Regelung des Mischventiles müsste in Richtung der maximal zulässigen Temperatur des Kühlkreislaufes geändert werden. Jedoch ist nur begrenzter Zugriff in die Herstellersteuerung der Anlage vorhanden. Bei der Beladung muss die Kühlkreislaufpumpe vor dem Anlagenstart in Betrieb genommen werden, um bei der Vorwärmung die vom Speicherkreislauf zur Verfügung gestellte Wärme auf die Komponenten übergeben zu können. Ab ca. 85 °C sollte das Mischventil per Hand auf Automatik Regelung gestellt um Wärme auf den Puffer zu übergeben.

Wärme, welche zur Vorwärmung genutzt wird, muss nicht durch das Rückkühlwerk an die Umgebung abgegeben werden. Sobald der Pufferspeicher eine bestimmte Temperatur erreicht, wird Wärme an das Rückkühlwerk übergeben. Die schützt den Pufferspeicher vor Überhitzung bzw. Druckerhöhung.

Die Bewertung des Speichereinsatzes erfolgt anhand von Zeitmessungen zwischen Holzvergaserstart und BHKW-Start und der Zeit bis zum stationären Zustand der Anlage. Ein weiterer Maßstab ist die Menge an Kondensat, welches in der Produktgasleitung anfällt. Gemessen wird dies anhand des Kondensatfüllstandes im Schauglas. Das Schauglas wurde für die Geschwindigkeitsmessung mittels Laserdoppler Anemometer installiert. Der Beurteilungszeitpunkt ist 30 Minuten nach BHKW-Start.

Das Verhalten der PCM-SD an der Anlage ist den Erwartungen entsprechend. Ein Unterschied zu den Validierungsmessungen besteht nur in der verzögerten Wärmeleistungsbereitstellung durch den Holzvergaser. Der HVG und das Produktgas wärmen sich erst mit Voranschreiten der Pyrolyse auf. Bei den Validierungsmessungen standen die maximale Vorlauftemperatur von 83 °C durch das Temperiergerät von Beginn an zur Verfügung. Deshalb war die Leistung von Beginn an höher. Speicherparameter sind in Abb. 1-74 dargestellt.

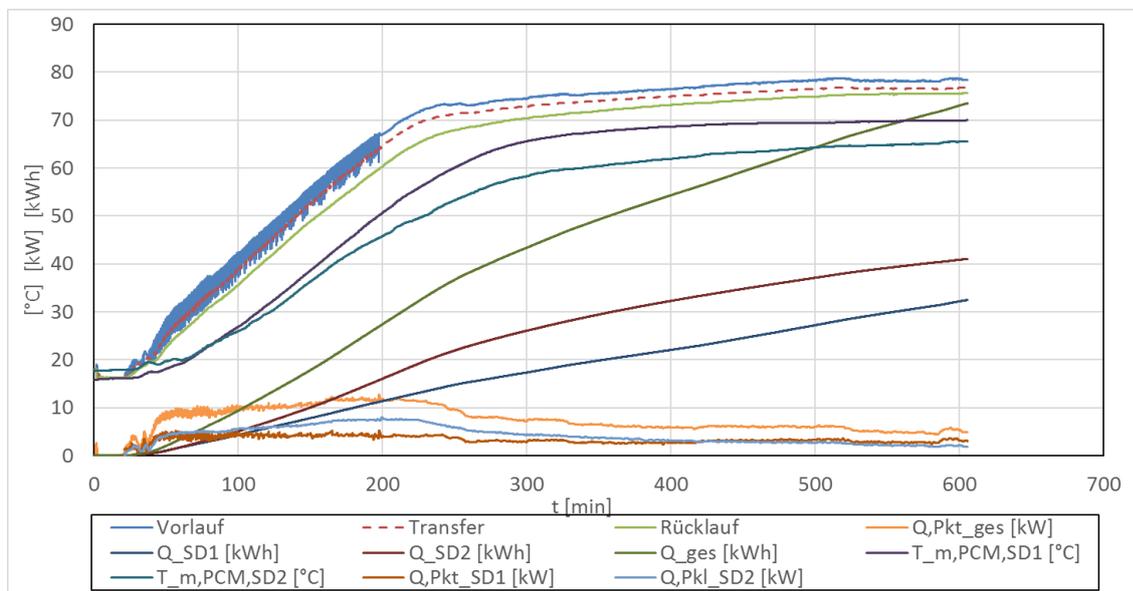


Abb. 1-74 Messdaten einer Speichervermessung am Biomasse-Vergasungs-BHKW

Die mittlere Beladeleistung von 11 kW konnte, wie durch die Validierungsmessungen vorweggenommen wurde, nicht erreicht werden. Ein Öffnen des Mischventiles bzw. das Umstellen auf Automatikregelung ist somit im Verlauf der Messfahrt von Nöten. Auch die unterschiedlichen PCM der Speicher verhalten sich hinsichtlich Leistung und Wärmeverluste wie in AE2.1 beschrieben.

Der Entladevorgang der Speicher dauert im Schnitt 45 Minuten. Danach ist der Produktgas-Kühlkreislauf vorgewärmt und die Pyrolyse im Holzvergaser bereits wieder im Gange. Sobald die Temperatur des PG-KK über die Temperatur des Speicherkreislaufes gestiegen ist, beginnt die erneute Beladung der Speicher. Somit konnten 2 Be- und 2 Entladungen (2 Speicherzyklen) innerhalb von 3 Messfahrten durchgeführt werden. Zwischen den Messfahrten lagen jeweils eine 64-stündige Speicherdauer.

In Tab. 1-31 sind die Startzeiten von HVG-Start bis Start des BHKW und bis zum Erreichen eines stationären Zustandes der Biomasse-Vergasungs-Anlage aufgeführt. Diese sind in Abb. 1-75 übersichtlich dargestellt. Die Auswahl der dargestellten

Messfahrten beruht auf den gleichen Rahmenbedingungen wie Außentemperatur und Brennstoff. Deshalb liegen die ausgewählten Messfahrten alle im Herbst oder Frühling, da zu diesen Jahreszeiten auch die bisherigen Messfahrten mit Speichereinsatz stattfanden.

Tab. 1-31 Vergleich Messfahrten mit und ohne Speichereinsatz, bei etwa gleichen Rahmenbedingungen

Messfahrt Datum	Messfahrt (Ifd. Nummer)	Startdauer BHKW [min]	Zeit bis Anlage stationär nach T1206 [min.]	Außentemp. zu Datum, 8 Uhr [°C]	Hallentemp. Nach T1202 bei Start Datenerfassung [°C]	PCM-Speichereinsatz	PG-KK Temp. zu HVG Start [°C]	Wärme für Vorwärmung [kWh]	Brennstoff
13.04.2016	1	25	274	9	19	nein	19	keine	Standart HHS
24.11.2016	2	19	317	6	20	nein	20	keine	
26.04.2017	3	37	287	5	16	nein	16	keine	
23.10.2017	4	26	keine	8	20	nein	20	keine	
06.11.2017	5	20	229	6	16	nein	16	keine	
16.10.2018	6	23	keine	14	21	nein	21	keine	
09.11.2018	7	30	277	6	22	nein	22	keine	
22.11.2018	8	12	202	1	18	nein	18	keine	
29.04.2019	9	16	375	7	21	nein	21	keine	
10.09.2019	10	18	keine	13	21	nein	21	keine	
13.09.2019	11	21	257	16	21	nein	21	keine	
02.10.2019	12	30	266	15	20	nein	20	keine	
19.02.2020	13	43	275	3	18	nein	18	keine	
06.03.2020	14	27	263	4	18	nein	18	keine	
30.10.2020	15	21	250	8	19	ja	22	5,1	
05.11.2020	16	23	302	4	22	ja	49,2	7,8	
30.11.2020	17	18	266	-1	20	ja	75,1	5,6	Macadam.
Mittelwerte		24,8	274,7					6,2	

Die Startzeiten der bisherig durchgeführten Messfahrten mit PCM-Speichereinsatz (in Tab. 1-31 blau dargestellt) befinden sich alle unterhalb des Mittelwertes der bisherigen Startzeiten ohne Speichereinsatz. Das kann auf einen Erfolg der Vorwärmung hindeuten. Jedoch ist die Datenlage bis zum jetzigen Stand noch recht aussageschwach um eine eindeutige Beschleunigung der Startvorgänge ausmachen zu können. Bei den gemessenen Zeiten bis zur Stationarität ergab sich keine Unterschiede zu den Messfahrten ohne Vorwärmung, wobei der Effekt solcher Maßnahmen mit fortschreitender Zeit relativ gering ist.

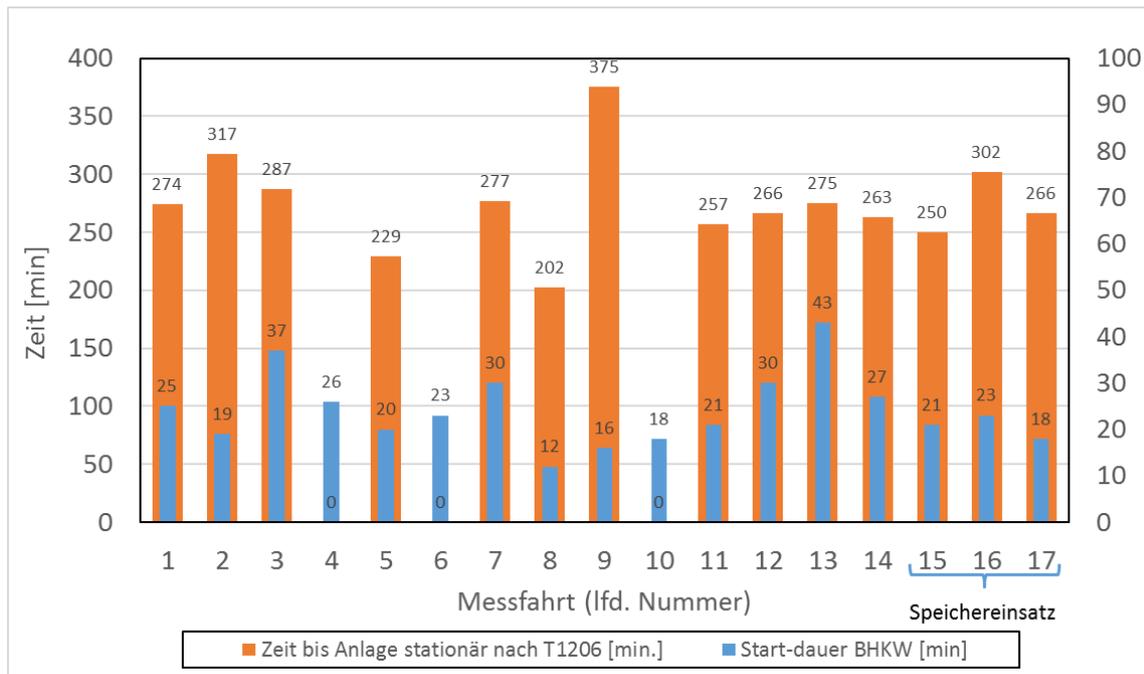


Abb. 1-75 Startzeiten und Zeiten bis Biomasse-Vergasungs-Anlage stationär

Bei der Beurteilung der Kondensatbildung in der Produktgasleitung können aussagekräftigere Ergebnisse verzeichnet werden. In Abb. 1-76 ist das Schauglas der Produktgasleitung zu drei unterschiedlichen Messfahrten dargestellt, jeweils zu gleichen Zeiten nach HVG-Start. Links ist das Schauglas kurz nach dem Einbau 2017 und rechts 2020 fotografiert worden. Man erkennt schon eine gewisse Ansammlung von Gaspartikel und Teer über diesen Zeitraum. Dies soll mit der Vorwärmung verhindert oder zumindest reduziert werden. Auf den Bildern rechts mit Vorwärmung kann man sehen, dass sich der Füllstand h des Kondensats im Schauglas wenigstens halbiert hat.

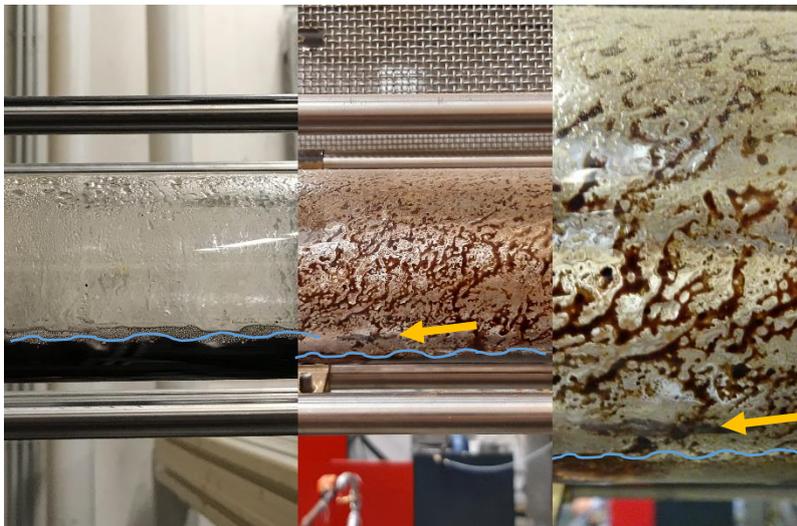


Abb. 1-76 Kondensat am Schauglas in Produktgasleitung links: ohne Speichereinsatz; rechts: 2 mal zu unterschiedlichen Messfahrten mit Speichereinsatz

Nach Abb. 1-77 nimmt das Kondensatvolumen quadratisch mit dem Füllstand im rohrförmigen Schauglas ab. Das heißt, dass sich die Kondensatbildung in etwa um 60 bis 80 % reduzieren lässt. Das spricht für einen positiven Effekt der Vorwärmung und kann

zur Lebensdauererlängerung der Anlage beitragen. Diese Aussagen können durch weitere Messfahrten im Projekt konkretisiert werden.

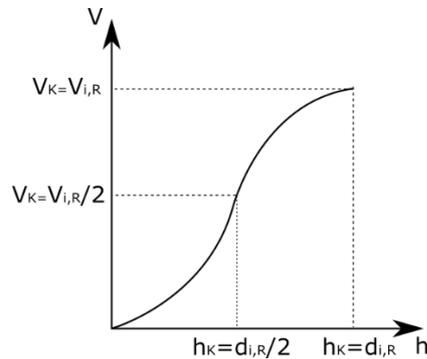


Abb. 1-77 Verlauf des Kondensatvolumens über der Schauglas-/Rohrhöhe

#### - Fazit

- Effekte der Vorwärmung sind tendenziell erkennbar und positiv zu bewerten.
- Startzeiten wurden bisher nur marginal reduziert.
- Kondensatbildung konnte drastisch reduziert, jedoch nicht verhindert werden.
- Speicher verhalten sich wie durch die Validierungsmessungen erprobt.
- Weitere Messfahrten in Planung und notwendig zur Validierung der Ergebnisse.

#### LuVo-Speicher

LuVo-Integration und Abstimmung auf Anlagenbetrieb nicht in diesem Berichtszeitraum durchgeführt. Verzögerungen gab es aufgrund des Downscaling und einer mit der Corona-Pandemie verbundenen Lieferverzögerungen des LuVo-Speicher 2.

### **AP3 Emissionsverhalten und Emissionsminderung**

Da die aktuellen Arbeitsstände zum Emissionsverhalten sowie zum Einsatz entsprechender Minderungsmaßnahmen in dem Forschungsbericht „Emissionsminderung am Holzgas-BHKW“ umfassend dargestellt und beschrieben sind, können die Ergebnisse der AE3.1 und AE3.2 zusammengefasst wie folgt beschrieben werden.

#### **AE3.1 Emissionsverhalten und AE3.2 Emissionsminderung**

##### **Emissionsminderung am Holzgas-BHKW**

---

#### Stand der Technik

Einhergehend mit dem Bestreben, durch die energetische Nutzung von Biomasse CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, müssen die dadurch zwangsweise auftretenden Emissionen der verwendeten Konversionstechnologien minimiert werden. Neben umwelttechnischen Aspekten spielt auch die damit einhergehende Akzeptanz für neuartige Anlagenkonzepte eine wichtige Rolle.

Die hier verwendete Technologie, die im Produktgas gespeicherte chemische Energie in Strom und Wärme zu wandeln, ist eine Kolbenmaschine nach dem Otto-Prinzip und seit Jahrzehnten als Stand der Technik zu bezeichnen. Im Laufe der Entwicklung und in Bezug auf die Nutzung fossiler Brennstoffe wie Erdgas und Heizöl/Diesel konnten immer wieder Verbesserungen im Emissionsverhalten erzielt werden. Auch hinlänglich bekannte gegenläufige Tendenzen, wie oftmals steigende Stickoxidemissionen beim Versuch Kohlenmonoxid zu minimieren, können mittlerweile beherrscht werden.

Die hierfür eingesetzten Technologien wie Abgasrezirkulation (AGR) und insbesondere die Verwendung von (3-Wege-) Katalysatoren kann als Stand der Technik bezeichnet werden und liefert teils sehr hohe Minderungspotenziale bestimmter Schadstoffe. Ebenfalls üblich ist der Einsatz von Harnstoff zur Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Reduktion als eingedüster zusätzlicher Betriebsstoff in den Abgasstrang in Kombination mit speziellen Katalysatoren. Aufgrund der Notwendigkeit zusätzlicher Betriebsstoffe wird diese Variante im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet.

All diese Minderungstechnologien haben gemein, dass sie auf eine genaue und gleichzeitig schnelle Anpassung des Brennstoff-Luft-Gemisches bzw. dem Luftverhältnis im Motorbrennraum angewiesen sind. Diese Betriebsweise wird bei stationär eingesetzten Verbrennungsmotoren zum einen durch einen möglichst konstanten Lastfall sowie moderate Laständerungsgeschwindigkeiten und zum anderen durch genau definierte Brennstoffe in Qualität und Quantität gewährleistet. Insbesondere die Kenntnis der genauen chemischen Eigenschaften des Brennstoffes, dessen konstante Qualität und die Brennstoffmenge in Sekundenbruchteilen anzupassen, machen den zielgerichteten Einsatz der zuvor genannten Emissionsminderungstechnologien möglich und führen zu einem Emissionsverhalten, das dem Stand der Technik entspricht.

Im konkreten Anwendungsfall, einem Holzvergaser BHKW in direkter Kopplung mit der Produktgaserzeugung, werden die zuvor genannten Anforderungen an den Einsatz marktüblicher, dem Stand der Technik entsprechender Emissionsminderungstechnologien, nicht oder nur sehr eingeschränkt erfüllt. Dadurch können bis dato nur sehr moderate Erfolge bei der Minderung von gasförmigen Emissionen erzielt werden. Eine besondere Schwierigkeit liegt u.a. in den damit einhergehenden strömungstechnischen Bedingungen im Verbrennungsmotor, wodurch der vorgeschaltete Vergasungsprozess mit beeinflusst wird und signifikant geringere elektrische Leistungen des BHKW ebenfalls vermieden werden müssen.

Holzgas-BHKW Anlagen, wie die hier betrachtete, sind aufgrund ihrer Feuerungswärmeleistung von unter 1 MW nach der 4. BImSchV [12] genehmigungsfrei und unterliegen auch nicht den Emissionsgrenzwerten der TA Luft 2002 [13]. Grundsätzlich gilt jedoch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [14], nach dem auch der Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen so zu erfolgen hat, dass schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden. Die Emissionsminderungsmaßnahmen sind dabei nach dem Stand der Technik zu treffen. Behörden können demnach in diesem konkreten Fall auf die VDI 3461 [10] verweisen. Diese praxisorientierte Richtlinie ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit von Herstellern, Behörden und Forschungsinstituten wie z.B. RWTH Aachen, Fraunhofer Umsicht, DBFZ und der Hochschule Zittau/Görlitz. Entsprechend Tab. 1-32 können daher folgende Grenzwerte herangezogen werden. Die Grenzwerte der TA Luft 2002 für größere Leistungen (> 1 MW) werden ebenfalls angegeben.

Tab. 1-32 Emissionsgrenzwerte nach TA Luft 2002 [13] und VDI 3461 [10]

mg/m <sup>3</sup> , 5 % O <sub>2</sub> , i.N. trocken	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	Kohlenstoff- monoxid (CO)	Gesamt- staub	Form- aldehyd (CH <sub>2</sub> O)	Benzol (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Gesamt-C
TA Luft 2002	500	1000	20	20	1	-
VDI 3461	750	300	10	10	1	50

Die Gesamtstaubemissionen wurden im Laufe des Projektes ermittelt. Konkret wurden mit einem Wöhler SM500 die Staubkonzentrationen im Projekt TCV III [11] ermittelt. Diese liegt unter bzw. beim Grenzwert. Nach [10] kann bei Gas-Otto-Motoren, wie hier vorliegend, ein regelmäßiger messtechnischer Nachweis der Staubemissionen entfallen. Aus diesem Grund wurden diese, auch aufgrund des hohen messtechnischen Aufwandes, zum jetzigen nicht erneut bestimmt. Eine Kontrollmessung erfolgt im weiteren Projektverlauf. Ebenfalls verweist [10] darauf, dass der Grenzwert für den Gesamtkohlenstoff bei Einhaltung der Emissionsgrenzwerte von CO und Benzol deutlich unterschritten wird und der regelmäßige messtechnische Nachweis entfallen kann. In [11] wurde die Gesamt-C Konzentration mit ca. 32 mg/m<sup>3</sup> (5 % O<sub>2</sub> i.N. trocken) ermittelt und damit der Grenzwert unterschritten. Eine Auswertung in Bezug auf Benzol und Formaldehyd erfolgt bei der sich im Laufe der Versuchsfahrten herausstellenden Vorzugsvariante.

#### Ansätze für konkrete Emissionsminderungsmaßnahmen

Im Auslieferungszustand besitzt das BHKW einen Oxidationskatalysator zur Oxidation von Kohlenmonoxid (CO) zu Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) bzw. zur Oxidation von unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Stickoxide werden nicht gezielt reduziert (NO<sub>x</sub> - O<sub>2</sub> -> N<sub>2</sub>).

Die Fahrweise des hier betrachteten Holzgas BHKW unterscheidet sich signifikant von BHKW, die mit z.B. Erdgas betrieben werden. Durch die gekoppelte, anlageninterne Gaserzeugung sind Schwankungen in Qualität (z.B. Zusammensetzung, Wassergehalt, Heizwert) und Quantität (Menge) nicht zu vermeiden.

- Integration Abgasrezirkulation (AGR)

#### *Chemische Grundlagen:*

Drei Bildungsmechanismen für die Entstehung von Stickoxiden sind bekannt: promptes NO<sub>x</sub>, Brennstoff NO<sub>x</sub> und thermisches NO<sub>x</sub>. Für die motorische Verbrennung ist das thermische NO<sub>x</sub> das bestimmende. Die NO<sub>x</sub> Emissionen sind hierbei vordergründig von der Temperatur abhängig und steigen ab ca. 1300 °C exponentiell. Gelingt es, die Temperatur in der Brennkammer bzw. die Verweilzeit von Verbrennungsluft (N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) bei hohen Temperaturen zu verringern, entsteht ein großes NO<sub>x</sub>-Minderungspotenzial. Das innermotorische NO<sub>x</sub>-Minderungspotenzial beruht daher auf der Senkung der Spitztemperatur während der Verbrennung im Brennraum. Durch die Verdünnung mit Abgas wird der Sauerstoffpartialdruck gesenkt, die Flammenfront wird aufgebrochen, verteilt sich weiter im Brennraum und eine Senkung der Spitztemperatur geht damit einher. Des Weiteren ist die spezifische Wärmekapazität des Abgases höher als die spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsluft. Hierdurch wird mehr Verbrennungswärme zum Aufheizen des Verbrennungsluft-Abgas-Gemisches benötigt. Auch dieser Effekt senkt die Brennraumtemperatur.

### Technische Realisierung:

Für den zielgerichteten Einsatz von primären (z.B. Abgasrezirkulation) und sekundären (z.B. dem Motor nachgeschaltete Katalysatoren) Emissionsminderungsmaßnahmen ist die genaue Erfassung des aktuellen Betriebszustandes und die darauffolgende sofortige Reaktion durch geeignete Aktoren (z.B. Nachregelung der Gemischzusammensetzung nach Messung des Restsauerstoffgehalts im Abgas durch eine Lambdasonde) zwingend notwendig. Im Auslieferungszustand wird eine konventionelle Lambdasonde vor dem Oxidationskatalysator eingesetzt. Diese ermittelt anhand einer Kennlinie den Restsauerstoffgehalt im Abgas und übermittelt das Sensorsignal an die BHKW-Steuerung. Dort wird die gemessene Lambdaspaltung mit der eingestellten Sollspannung verglichen und über einen Belimo Stellmotor und einer Drosselklappe das Mischungsverhältnis des angesaugten Produktgases mit der angesaugten Verbrennungsluft direkt vor dem Motor beeinflusst. Die Installation der AGR verändert dieses System signifikant durch Hinzunahme eines weiteren Stoffstroms (Abgas) in die Regel- und Steuerungscharakteristik. In Abb. 1-78 ist die Einbindung der unregulierten AGR schematisch dargestellt.

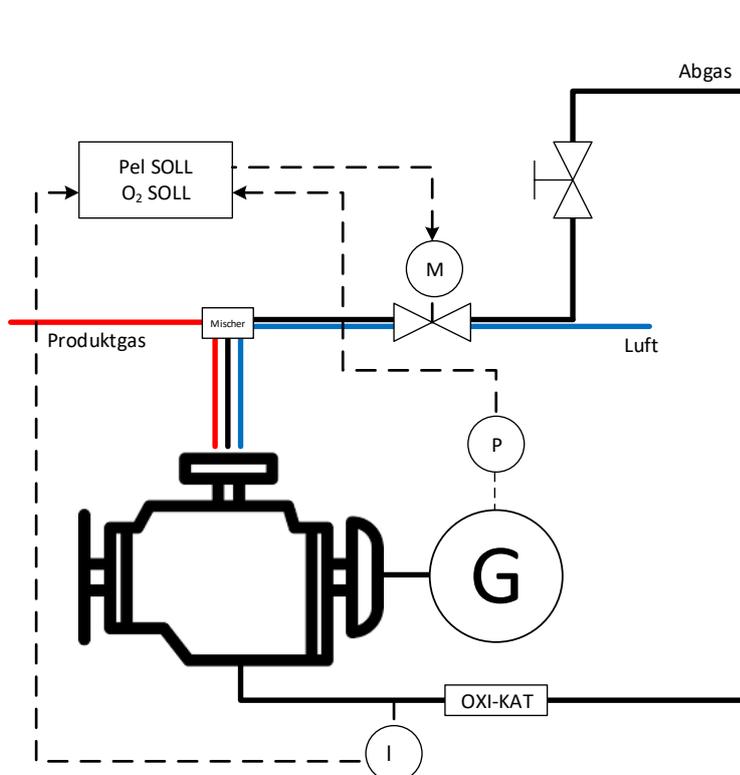


Abb. 1-78 BHKW mit Oxidationskatalysator und unregulierter AGR

Die elektrisch gesteuerte Drosselklappe fungiert als Aktor für die Leistungsregelung des Generators und zur Sicherstellung des für die Funktionsfähigkeit des Oxidationskatalysators notwendigen Restsauerstoffes. Bereits im Auslieferungszustand ist zu erkennen, dass diese beiden Größen (elektrische Leistung und Luftverhältnis) nicht unabhängig voneinander geregelt werden können. Soll die BHKW Leistung erhöht werden, muss mehr Brennstoff in den Motor gelangen. Hierfür wird das Ventil leicht geschlossen, der Motor saugt bei gleicher Drehzahl dann mehr Produktgas und weniger Verbrennungsluft an. Dadurch sinkt jedoch der Restsauerstoffgehalt nach dem Motor. Sinkt dieser Wert unter den eingestellten Sollwert, müsste sich das gleiche Ventil zwangsweise wieder leicht öffnen. Dieser Zielkonflikt verdeutlicht, dass das BHKW bereits ab Werk in einem zwar stabilen, jedoch kaum variablen Betriebszustand

betrieben wird. Wird jetzt zusätzlich, wie in Abb. 1-78 bereits dargestellt, ein unregelmäßiger Abgasstrom berücksichtigt, verkompliziert sich die Regelaufgabe deutlich.

Um eine manuelle Eingriffsmöglichkeit auf das Abgas-Luft-Gemisch zu erhalten, wird im Rahmen des Versuchsaufbaues eine motorisch betriebene Drosselklappe wie auch ein Handventil eingesetzt. Das Handventil begrenzt den maximal möglichen Abgasvolumenstrom insgesamt, während das elektrisch angetriebene Ventil (ausgeführt als Drosselklappe) eine feinere Einstellung ermöglicht.

Ziel ist es, möglichst viel Abgas der Verbrennungsluft zuzuführen, ohne jedoch dabei die elektrische Leistung negativ zu beeinflussen. Damit eine Beimischung überhaupt möglich wird, muss der Lambda-Sollwert, hin zu einem geringeren Restsauerstoffgehalt, eingestellt werden. Zunächst versucht nun die Steuerung und Regelung des BHKW durch eine größere Beimischung von sauerstofffreiem Produktgas dieser Regelanforderung gerecht zu werden. Wird jetzt gleichzeitig die AGR geöffnet, beginnt der Restsauerstoffgehalt nach dem BHKW ebenfalls zu sinken. Ziel ist es, dass die gleiche Menge Produktgas wie zuvor in das BHKW gelangt, dort aber mit weniger Sauerstoff verbrannt wird. Öffnet man das Abgasrückführventil zu weit, sinkt der Restsauerstoffgehalt nach dem Motor zu weit ab und damit unter den Sollwert. Die BHKW-Steuerung versucht nun den Sauerstoffgehalt zu erhöhen, indem mehr Luft und weniger Produktgas angesaugt wird. Sind die Druckverhältnisse in der Luftansaugung mit angeschlossener Abgasleitung allerdings ungünstig gewählt, verdrängt das mit Überdruck aus der Abgasleitung einströmende Abgas die Verbrennungsluft, wodurch der Restsauerstoffgehalt nach dem Motor noch weiter sinkt. Das System wird in diesem Fall instabil und der Motor geht letztendlich aus. Es ist daher eine feinfühligere Justierung der Ventile notwendig, um ein stabil laufendes Gesamtsystem zu erreichen. Nicht näher beschrieben ist eine zu vernachlässigende Menge Abgas aus dem Nachreformer der Vergasereinheit. Diese wird unregelmäßig dem Abgasstrom nach der geregelten Drosselklappe beigemischt, spielt jedoch für das Betriebsverhalten keine entscheidende Rolle.

Um die oben genannten Bedingungen einzuhalten, wurde für den Versuchsaufbau eine komplexe Ansauggeometrie entworfen und aus hinreichend temperaturbeständigem Kunststoffrohr errichtet. Zu Bilanzierungszwecken wurden zwei Volumenstrommessungseinrichtungen (Messblende Lindab FMU 100) eingebaut, sowie die hier nicht näher beschriebene Volumenstrommessung nach dem Karman-Vortex-Prinzip (siehe AE1.1). In [11] wurde zum Nachweis der prinzipiellen Tauglichkeit eine stark vereinfachte Versuchsanordnung einer AGR untersucht.

Die Ansaugung ist in Abb. 1-79 und Abb. 1-80 dargestellt.

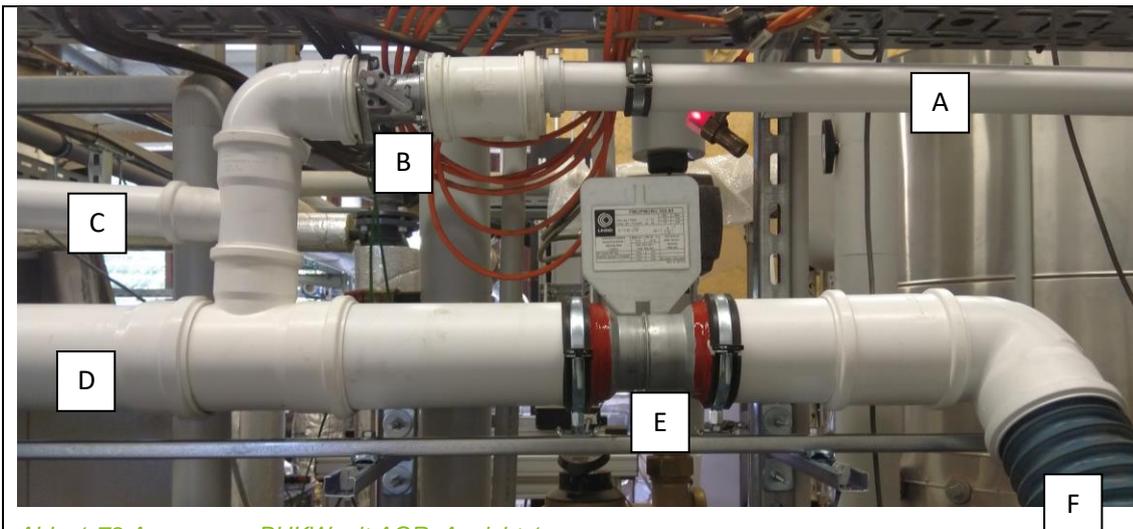


Abb. 1-79 Ansaugung BHKW mit AGR, Ansicht 1

A	Abgasleitung aus Schornstein, nicht im Bild das unregulierte Ventil zur Volumenstrombegrenzung
B	Elektrisch angetriebene Drosselklappe zur Feinjustierung des Abgasvolumenstroms
C	Nicht näher betrachtete Einleitung des Abgases aus dem Nachreformer
D	Luftleitung, angesaugt aus Raumluft, nicht im Bild Volumenstrommessung (2x)
E	Volumenstrommessung Messblende Typ Lindab für Luft-Abgas-Gemisch
F	Flexible Zuleitung des Abgas-Luft-Gemisches in die Ansaugbrücke des BHKW

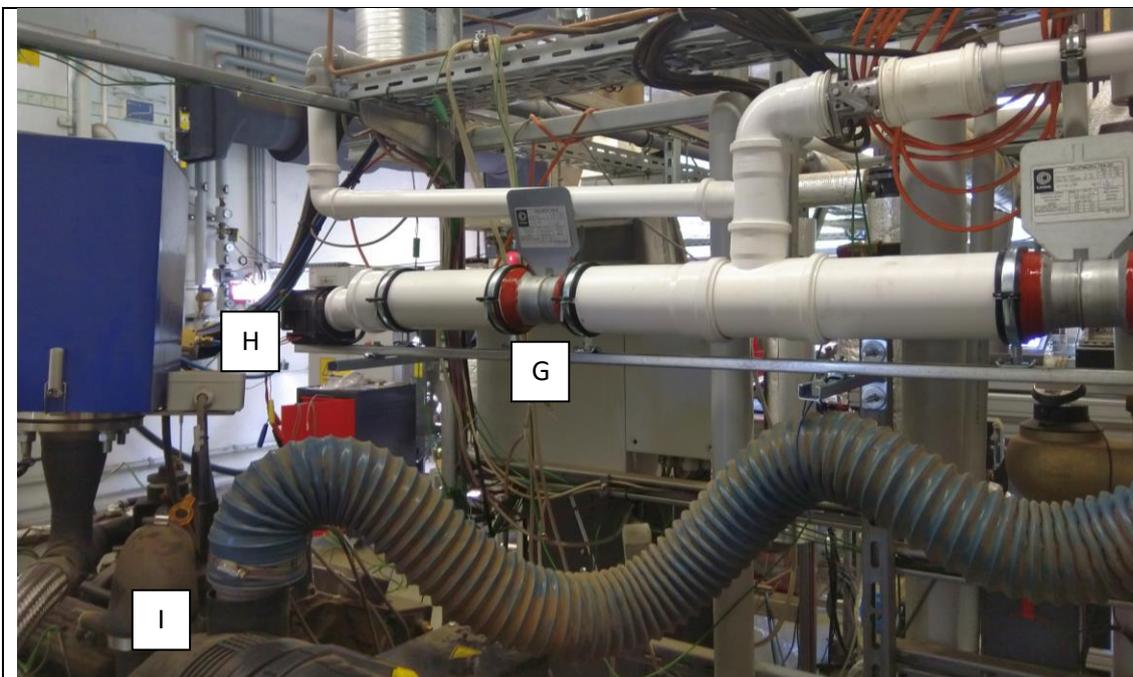


Abb. 1-80 Ansaugung BHKW mit AGR, Ansicht 2

G	Volumenstrommessung Messblende Typ Lindab für angesaugte Verbrennungsluft
H	Volumenstrommessung Typ Karman-Vortex für angesaugte Verbrennungsluft
I	Ansaugbrücke BHKW, Anschluss der flexiblen Leitung an den Luftfilterkasten

Die ermittelten Messwerte werden in das Leitsystem integriert und für die spätere Versuchsauswertung gespeichert. Das Karman-Vortex System ist optional und kann für die parallellaufenden Kalibriermessung demontiert werden.

- Integration Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung

*Chemische Grundlagen:*

Am Holzgas-BHKW sollen zusätzlich Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung erprobt werden. Dabei kommt u.a. eine modifizierte Katalysatorstrecke zum Einsatz, wobei ein 3-Wege-Katalysator (KAT 1) und ein Oxidationskatalysator (KAT 2) eingesetzt werden (Abb. 1-81 und Abb. 1-82). Zwischen beiden Katalysatoren erfolgt zusätzlich die Zugabe von Luft, um ausreichend Oxidationsmittel für KAT 2 bereitzustellen.

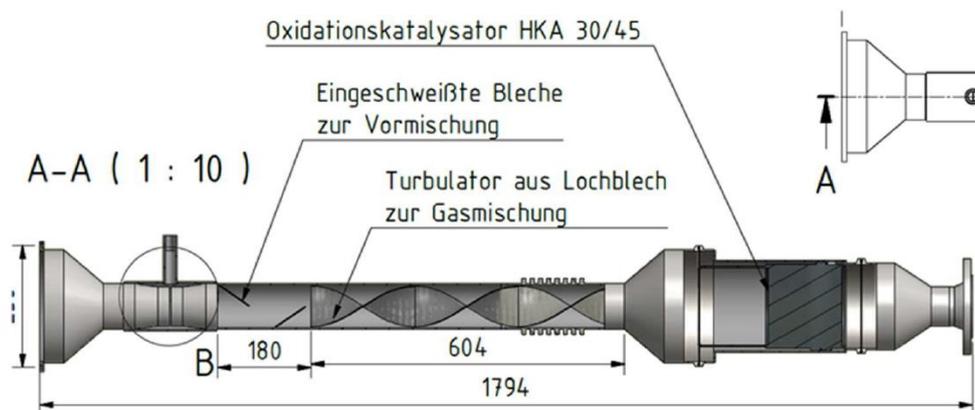


Abb. 1-81 Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung, Ansicht 1

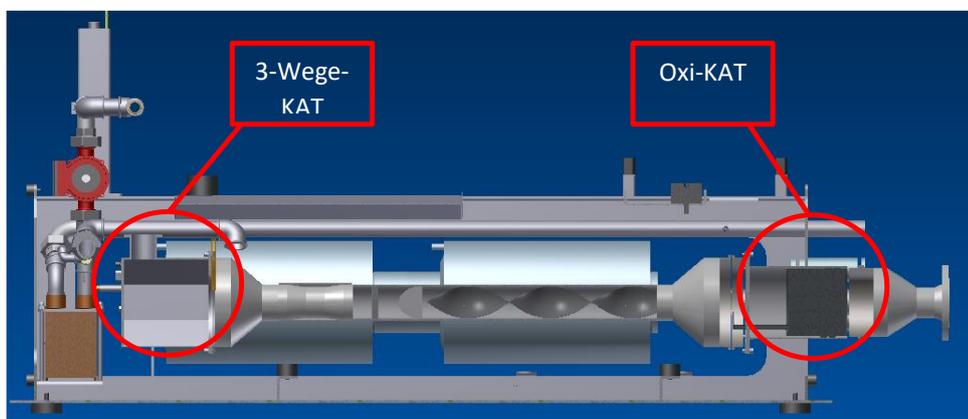
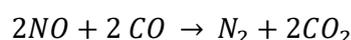


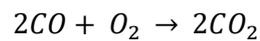
Abb. 1-82 Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung, Ansicht 2

Der 3-Wege-Katalysator oxidiert die Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid CO, Kohlenwasserstoffe C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> und reduziert die Stickoxide NO<sub>x</sub>. Dazu muss der Motor möglichst stöchiometrisch gefahren werden (λ=1). Bei Luftüberschuss (λ>1) werden Stickoxide schlechter abgebaut, da zu wenig Reduktionsmittel (CO) vorhanden ist:

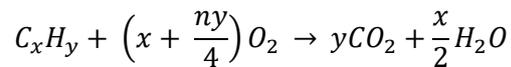


Formel 2

Bei fettem Gemisch (λ<1) fehlt der zur Oxidation der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenstoffmonoxids benötigte Sauerstoff:



Formel 3



Formel 4

Durch die stöchiometrische Fahrweise des Motors wird ggf. die Bildung von CO während der Verbrennung des Holzgases im Verbrennungsraum des Motors begünstigt. Um das CO schlussendlich wieder zu oxidieren, kommt der Oxidationskatalysator (KAT 2) zum Einsatz. Der für diesen Katalysator zur Oxidation benötigte Sauerstoff wird der Katalysatorstrecke mittig über einen Stutzen durch zusätzliche Umgebungsluft zugeführt.

#### Technische Realisierung:

Im vorangegangenen Projekt TCV III [11] wurden bereits Engineering und Fertigung des Doppel-Kat-Systems vorgenommen. Die Vermischung der zugeführten Luft mit dem Abgasstrom soll durch zwei Umlenkleche und einen Turbulator erreicht werden (Abb. 1-83 und Abb. 1-84). Im nachgeschalteten Oxidationskatalysator erfolgt die Minderung von CO und  $C_xH_y$  nach den Mechanismen in Formel 3 und Formel 4.

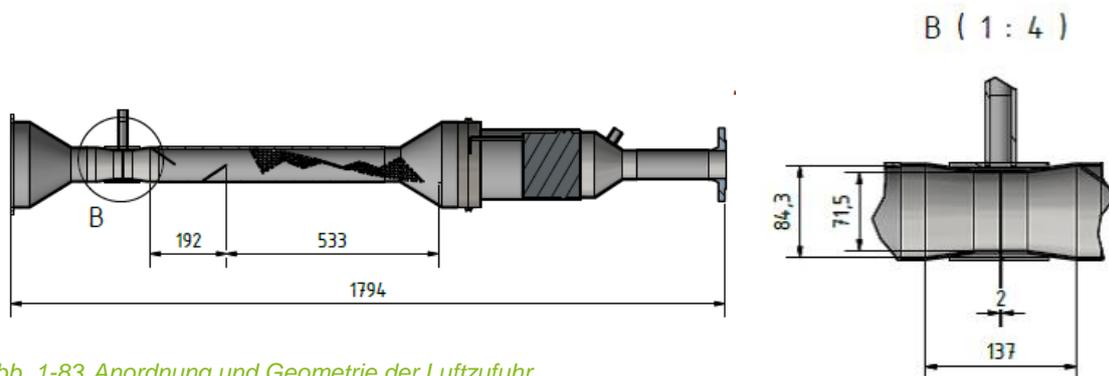


Abb. 1-83 Anordnung und Geometrie der Luftzufuhr

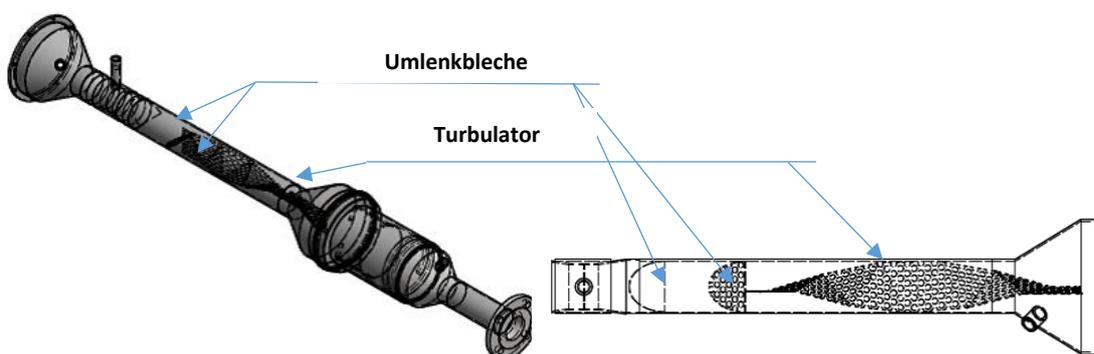


Abb. 1-84 Anordnung von Umlenklechen und Turbulator innerhalb der Katalysatorstrecke

Dieses System wird unterhalb des BHKW anstelle des werksseitig montierten Oxidationskatalysators installiert (Abb. 1-85 und Abb. 1-86).

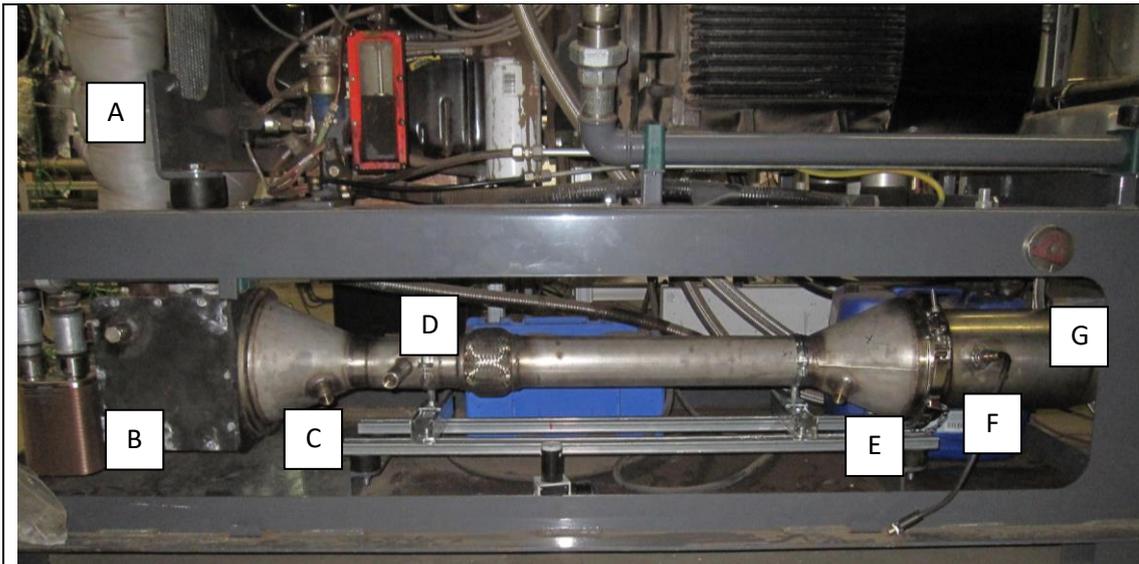


Abb. 1-85 Doppel-Kat-System, montiert unter dem BHKW (ohne Isolierung)

A	Motorabgasleitung
B	Gehäuse mit innen installierten 3-Wege Katalysator
C	Messpunkt Temperatur und Zusammensetzung Abgas nach 3-Wege-KAT
D	Zwischenlufteindüsung mit nachgeschaltetem Turbulator
E	Messpunkt Temperatur und Zusammensetzung Abgas nach 3-Wege-KAT und Zwischenlufteindüsung
F	Lambdasonde für Steuerung BHKW
G	Gehäuse mit innen installierten Oxi-KAT

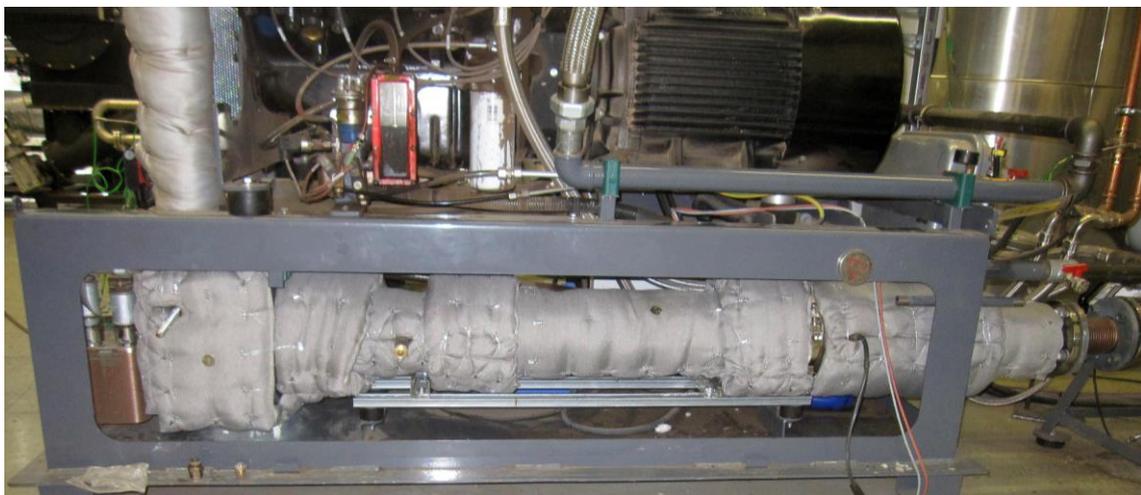


Abb. 1-86 Doppel-Kat-System, montiert unter dem BHKW (mit Isolierung)

Zusammengefasst kann die gewünschte Funktionsweise wie folgt beschrieben werden:

Die nachmotorische Reduktion von Stickoxiden erfordert eine möglichst stöchiometrische Fahrweise des BHKW. Aufgrund dieser Fahrweise sowie in Verbindung mit der schwankenden Produktgaszusammensetzung, ist mit einem deutlichen Anstieg der CO- Emissionen zu rechnen. Diese werden mit einem, dem 3-Wege-Katalysator nachgeschaltetem, Oxidationskatalysator gemindert. Der dafür notwendige Sauerstoff wird durch eine Zwischenlufteindüsung zwischen die beiden

Katalysatoren realisiert. Hierfür wird ein Drehschieberverdichter eingesetzt, der den notwendigen Luftvolumenstrom bei konstant hohem Druck bereitstellen kann. Die hierfür benötigte elektrische Hilfsenergie wird bei der späteren energetischen Bewertung nicht mit betrachtet, spielt aber in einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung eine wichtige Rolle. Für die Minimierung der Emissionen und das Verhalten des BHKW ist dies allerdings nicht von Bedeutung.

### Aufbau der Messung

Die eingesetzte Messtechnik besteht aus den bereits installierten und in [11] beschriebenen Messgeräten. Im Wesentlichen wird bei den hiermit beschriebenen Emissionsmessungen das FTIR angewendet.

### Versuchsfahrten

#### - Versuchsmatrix

Um eine möglichst große Variation der zur Verfügung stehenden Emissionsminderungsmaßnahmen zu gewährleisten, wurde eine Versuchsmatrix aufgestellt, mit der eine große Ergebnisdichte gewährleistet werden kann. Bei allen Versuchen wurde der Standardbrennstoff Holzhackschnitzel (HHS) in einer möglichst gleichbleibenden Qualität eingesetzt.

Aufgrund der Komplexität der Versuchsanlage sind möglichst konstante Versuchsbedingungen der jeweiligen Messfahrten zu gewährleisten und darüber hinaus konstante Betriebsbedingungen während der Dauer der Versuchsauswertung. Ab dem Kaltstart der Versuchsanlage wird eine mindestens 4-stündige Einfahrzeit festgelegt. Die Einfahrzeit kann dann gekürzt werden, wenn dadurch eine 2-stündige Dauer der Versuchsauswertung nicht mehr gewährleistet werden kann. Da je Versuchsfahrt jeweils zwei Betriebszustände (mit und ohne AGR) untersucht werden, ist nach der Aktivierung der AGR eine Stabilisierungsphase vorgesehen. Diese Stabilisierungsphase ist ebenfalls bei Eingriffen in die Anlagenparameter oder bei Störungen vorzusehen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Einflüsse auf das Betriebsverhalten kann es Abweichungen von den oben genannten Bedingungen geben. Die konkreten Randbedingungen der Versuchsauswertung sind in den jeweiligen Kapiteln angegeben.

Jede Versuchsfahrt wird mit einer geänderten Anordnung der Emissionsminderungsmaßnahmen in der nachgeschalteten Katalysatorstrecke durchgeführt und gleichzeitig die AGR zu- bzw. abgeschaltet. Es ergibt sich eine Versuchsmatrix wie in Tab. 1-33.

Tab. 1-33 Versuchsmatrix Emissionsminderungen am BHKW

	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	Kat-Strecke	Kat-Strecke-Luft+Oxi	Kat-Strecke-Luft
ohne Oxi-Kat							
mit Oxi-Kat							
ohne AGR	A1	B1					
mit AGR	A2	B2					
Kat-Strecke			C1	C2			
Kat-Strecke-Luft+Oxi				D			
Kat-Strecke-Luft			E1	E2			

Wie schon zuvor ausgeführt verfügt das BHKW im Auslieferungszustand bereits über einen Oxidationskatalysator. Für die Bewertung der einzelnen Komponenten bzw. deren Kombination miteinander sind auch die Rohemissionen des BHKW zu erfassen. Aus diesem Grund wurde eine Messfahrt ohne Oxidationskatalysator durchgeführt, um die Auswirkung der Abgasrückführung (AGR) zu bewerten (**A**). In der nächsten Messkampagne wurde der werksseitig gelieferte Oxidationskatalysator an seinem ursprünglichen Einsatzort wieder montiert und ebenfalls mit und ohne AGR betrieben (**B**). Die nächste Messkampagne (**C**) wurde bereits mit der montierten Kat-Strecke (also 3-Wege- und Oxi-Kat) durchgeführt, allerdings mit der originalen Position der Lambdasonde vor dem ersten Kat. Dies ist notwendig, weil in dieser Konfiguration noch keine zusätzliche Oxidationsluft zwischen die beiden Katalysatoren eingebracht wurde. Hierdurch kann ansatzweise bewertet werden, wie sich der Austausch des werksseitig montierten Oxidationskatalysators gegen einen 3-Wege-Katalysator auswirken würde. Der zweite Oxidationskatalysator mindert nur die CO-Emissionen, wodurch der Einfluss auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen des 3-Wege-Kats erprobt werden kann. Die finale Konfiguration, Kat-Strecke mit Zwischenlufteindüsung, war Gegenstand der letzten Messfahrt. Hierbei wird auch die Position der Lambdasonde nach hinten, vor den Oxidationskatalysator verlegt (**E**).

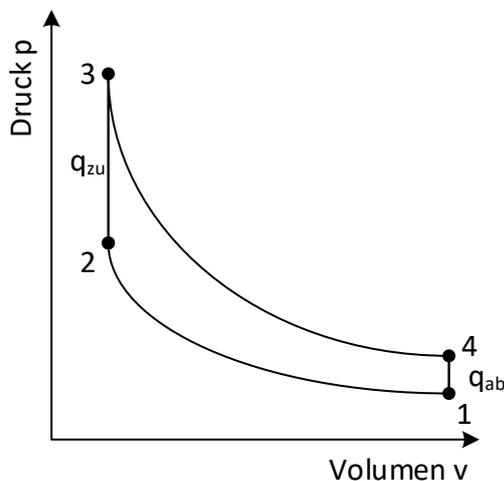
Eine weitere Messfahrt (**D**) wurde während einer ersten, testweisen Installation der Kat-Strecke vorgenommen. Es erfolgte auch lediglich eine Messung mit AGR. Die Aussagekraft ist daher begrenzt. Der Aufbau diente der Identifikation möglicher weiterer Katalysatorkombinationen. In diesem Fall wurde zusätzlich vor den 3-Wege-Katalysator ein Oxidationskatalysator installiert. Der restliche Versuchsaufbau ist wie bei Messfahrt **E**. Es handelt sich hierbei um das Zusammenspiel von insgesamt drei Katalysatoren. Der an erste Stelle verbaute Oxidationskatalysator dient der Minderung von CO und

damit zur Senkung des Restsauerstoffs. Dadurch soll ein besserer Betriebspunkt für den an zweiter Stelle installierten 3-Wege-Kat erreicht werden.

Der Werkzustand wird in der Versuchsfahrt **B1** abgebildet, die letzte Ausbaustufe der Emissionsminderungsmaßnahmen bildet Messfahrt E2 ab. In der abschließenden Bewertung wird daher besonderes Augenmerk auf diesen Vergleich gelegt.

Neben der Minderung der Emissionen des BHKW ist es für den Betrieb derartiger Anlagen von entscheidender Bedeutung, dass die elektrische Leistung möglichst auf konstant hohem Niveau entsprechend der Sollleistung gehalten wird. Die AGR senkt die Temperatur im Brennraum, wodurch der Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine negativ beeinflusst wird. Darüber hinaus erzeugt die komplexe Kat-Strecke zwangsweise einen höheren Abgasgegendruck, wodurch das Abgas nicht so weit entspannt werden kann. Auch dadurch sinkt der Wirkungsgrad.

Verdeutlicht wird das in einem p,V-Diagramm des Otto-(Gleichraum)-Prozess (Abb. 1-87).



- 1 → 2 Verdichten der Ladung
- 2 → 3 Arbeiten (Verbrennung und Expansion)
- 3 → 4 Arbeiten (Expansion ohne Wärmezufuhr)
- 4 → 1 Ausstoßen der verbrannten Ladung

$$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Abb. 1-87 p,V-Diagramm des Otto-(Gleichraum)-Prozess

Die spezifische Enthalpie  $h$  ist eine Funktion von Druck und Temperatur. Am Punkt 3 sinkt durch die AGR die Temperatur, wodurch auch die Enthalpie  $h_3$  an Punkt 3 sinkt. Die Enthalpie  $h_1$  an Punkt 1 hingegen soll möglichst gering sein. Durch einen steigenden Abgasgegendruck der Kat-Strecke steigt die Enthalpie  $h_1$  allerdings. Dieser Einfluss verschlechtert den Wirkungsgrad ebenfalls. Beide Eingriffe sind geeignet, bei konstantem Produktgasvolumenstrom die Ausbeute an Elektroenergie zu senken. Wie stark die Einflüsse tatsächlich sind und ob es zu signifikanten Leistungseinbußen kommt, zeigen die nachfolgenden Versuche und deren Auswertung.

Die tabellarische Darstellung der Messwerte bezieht sich immer auf den direkten Einfluss der zugeschalteten AGR. Eine Gesamtauswertung befindet sich am Ende dieses Kapitels. Die elektrische Leistung wird als negativer Zahlenwert angegeben, da sie einen den Prozess verlassenden Energiestrom darstellt.

- Messfahrt ohne Oxidationskatalysator ohne/mit AGR (A1 und A2)

In Abb. 1-88 sind die Emissionen des BHKW ohne und mit AGR dargestellt. Nicht relevante Bereiche sind ausgegraut. Diese Versuchsanordnung stellt nicht den werksseitigen Zustand dar und dient nur zum Aufzeigen des möglichen Emissionsminderungspotenzials.

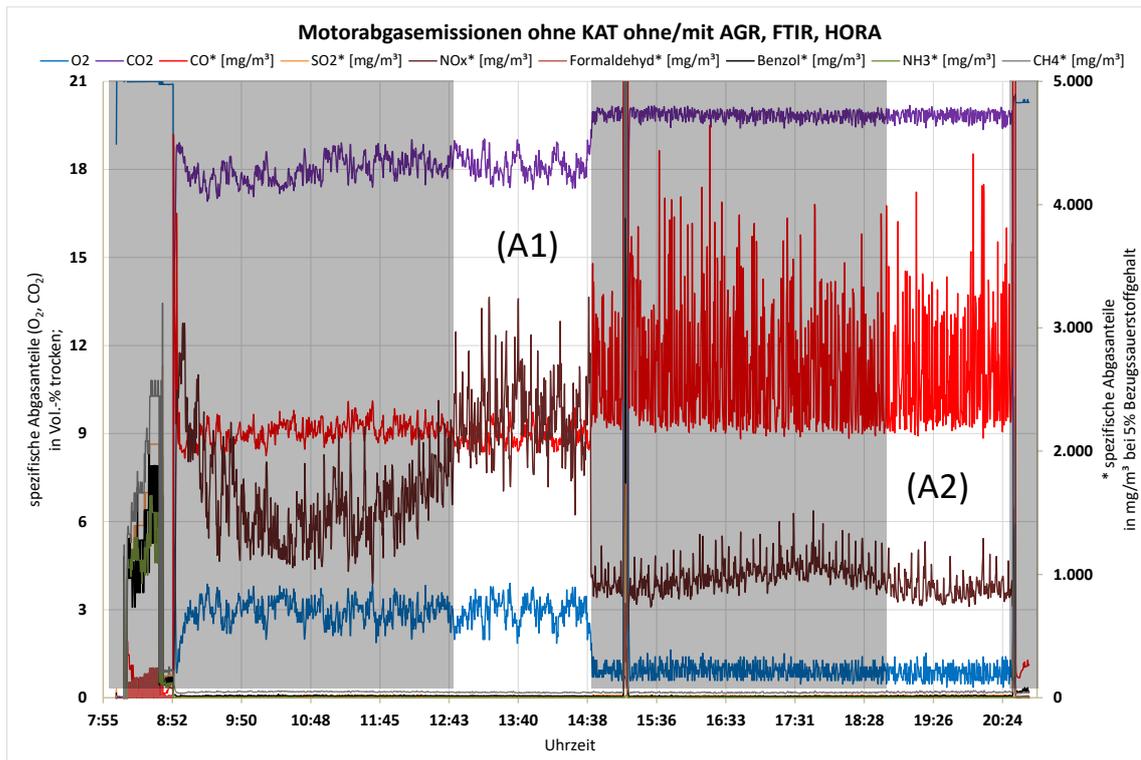


Abb. 1-88 Emissionen BHKW ohne Oxidationskatalysator ohne (A1) / mit (A2) AGR

Für die Versuchsauswertung wurden folgende Zeitintervalle gewählt (Tab. 1-34):

Tab. 1-34 Auswerteziträume ohne Oxidationskatalysator ohne (A1) / mit (A2) AGR

	(A1) ohne AGR	(A2) mit AGR
Startzeit [hh:mm:ss]	12:45:07	18:30:05
Endzeit [hh:mm:ss]	14:40:36	20:30:19
Auswertzeit [hh:mm:ss]	01:55:29	02:00:14

Die Bewertung der Emissionen und der elektrischen Leistung ergibt die Zahlenwerte in Tab. 1-35.

Tab. 1-35 Auswertung Emissionen BHKW ohne Oxidationskatalysator ohne (A1) / mit (A2) AGR

Bezeichnung	(A1) ohne AGR			(A2) mit AGR			Relative Veränderung		
	NOx	CO	Pel	NOx	CO	Pel	NOx	CO	Pel
Einheit	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW			
MIN	1482	1972	-32,4	740	2105	-31,4	-50,1%	+6,7%	-3,0%
MAX	3248	2350	-29,6	1291	4412	-28,7	-60,2%	+87,7%	-2,9%
MITTELWERT	2274	2127	-30,8	899	2603	-29,9	-60,5%	+22,4%	-2,9%

Durch den Einsatz der AGR konnten in diesem ersten Versuch die NOx Emissionen um ca. 60 % reduziert werden. Es zeigt sich folglich das große Potenzial dieser primären Minderungstechnologie. Es zeigt sich allerdings auch, dass die CO-Emissionen steigen (+ 22 %) und die elektrische Leistung sinkt (- 2,9 %). Die sinkenden NOx-Emissionen durch die gesenkte Spitztemperatur der Verbrennung treten erwartungsgemäß ein. Niedrige Temperaturen begünstigen eine unvollkommene Verbrennung, worauf die

steigenden CO-Emissionen zurückzuführen sind. Es konnte zu jeder Zeit ein stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet werden.

- Messfahrt mit Oxidationskatalysator ohne/mit AGR (B1 und B2)

In Abb. 1-89 sind die Emissionen des BHKW mit dem werksseitigen Oxi-KAT und ohne bzw. mit AGR dargestellt. Die Versuchsanordnung B1 spiegelt den werksseitigen Zustand wieder und wird im zweiten Teil der Messfahrt durch die Aktivierung der AGR modifiziert (B2).

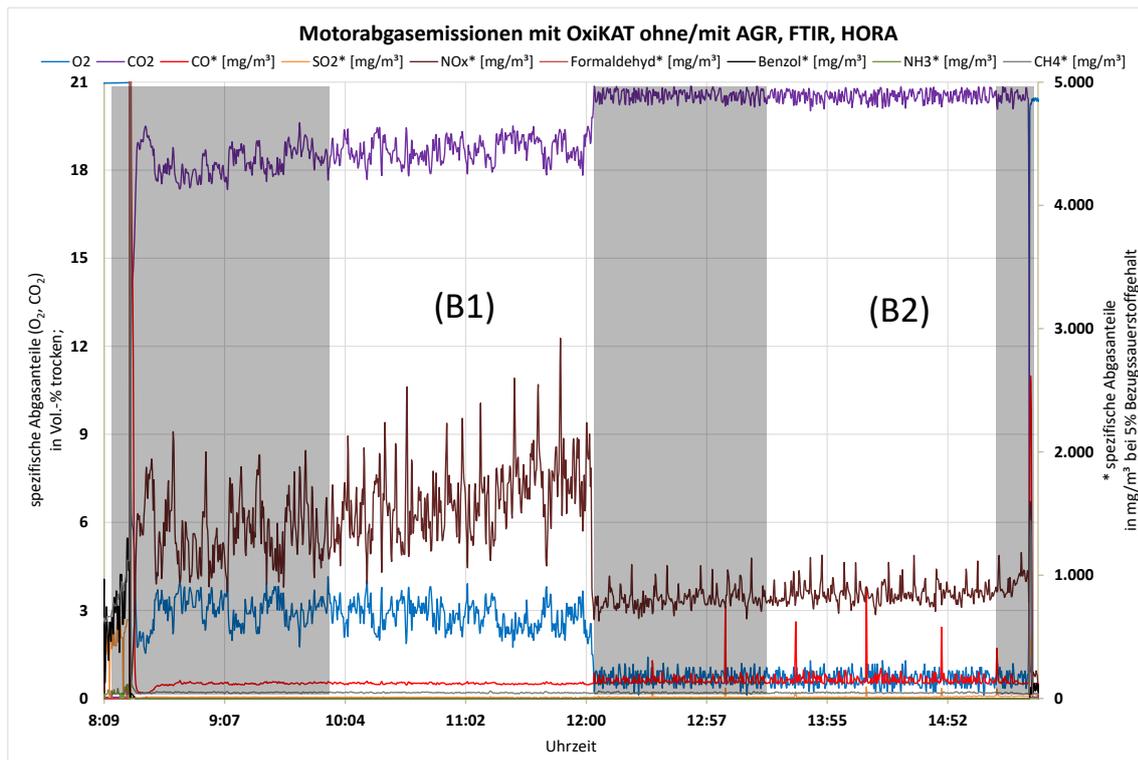


Abb. 1-89 Emissionen BHKW mit Oxidationskatalysator ohne (B1) / mit (B2) AGR

Für die Versuchsauswertung wurden folgende Zeitintervalle gewählt (Tab. 1-36):

Tab. 1-36 Auswerteziträume mit Oxidationskatalysator ohne (B1) / mit (B2) AGR

	(B1) ohne AGR	(B2) mit AGR
Startzeit [hh:mm:ss]	09:59:53	13:29:56
Endzeit [hh:mm:ss]	11:59:46	15:30:11
Auswertzeit [hh:mm:ss]	01:59:53	02:00:15

Die Bewertung der Emissionen und der elektrischen Leistung ergibt die Zahlenwerte in Tab. 1-37

Tab. 1-37 Auswertung Emissionen BHKW mit Oxidationskatalysator ohne (B1) / mit (B2) AGR

Bezeichnung	(B1) ohne AGR			(B2) mit AGR			Relative Veränderung		
	NOx	CO	Pel	NOx	CO	Pel	NOx	CO	Pel
Einheit	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW			
MIN	931	110	-31,4	679	119	-31,7	-27,1%	+7,4%	+0,8%
MAX	2922	140	-28,2	1184	899	-29,3	-59,5%	+541,1%	+3,9%
MITTELWERT	1616	121	-29,8	861	154	-30,5	-46,7%	+27,5%	+2,2%

Durch den Einsatz der AGR konnten in diesem Versuch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um ca. 46 % reduziert werden. Das im Vergleich zur Messfahrt A1 (ohne AGR) absolute Niveau der NO<sub>x</sub>-Emissionen liegt in der Messfahrt B1 deutlich niedriger. Begründet ist das in der verhältnismäßig kurzen Einfahrzeit des BHKW, dessen NO<sub>x</sub>-Emissionen erfahrungsgemäß mit der Betriebszeit langsam steigen und ein Niveau wie in Messfahrt A1 erreichen. Es zeigt sich allerdings auch, dass die CO-Emissionen steigen (+ 28 %). Die elektrische Leistung steigt leicht an (+ 2,2 %). Es konnte zu jeder Zeit ein stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet werden. Allein durch die Installation der AGR in Kombination mit dem Oxi-Kat lassen sich noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse der Emissionsminderung erzielen. Die leicht gestiegene elektrische Leistung ist erfreulich, jedoch unterliegt dieser Wert auch im normalen Anlagenbetrieb Schwankungen in dieser Größenordnung. Die zuvor beschriebenen negativen Auswirkungen der AGR sind vermutlich weniger signifikant.

- Messfahrt mit KAT-Strecke ohne/mit AGR (C1 und C2)

In Abb. 1-90 sind die Emissionen des BHKW mit 3-Wege-Kat, Oxi-Kat, ohne und mit AGR dargestellt. Verbaut ist in diesem Zustand bereits die neue Kat-Strecke, jedoch mit Lambdasonde in der ursprünglichen Anordnung, vor dem ersten Katalysator. Diese Messfahrt zeigt das Potenzial der NO<sub>x</sub>-Minderung bei Verwendung eines 3-Wege-Katalysators anstelle des werksseitig verbauten Oxi-Kat. Der zusätzlich verbaute Oxi-Kat hinter dem 3-Wege-Kat wirkt sich bei vorhandenem Restsauerstoff positiv auf die CO-Emissionen aus, erhöht jedoch auch den Abgasgedruck. Aufgrund einer im Anschluss durchgeführten Messfahrt mit einem anderen Brennstoff konnten bei dieser Messfahrt die gewünschten Aufwärm- und Stabilisierungszeiten nicht eingehalten werden. Die Dauer der Versuchsauswertung von 2 h konnte gewährleistet werden.

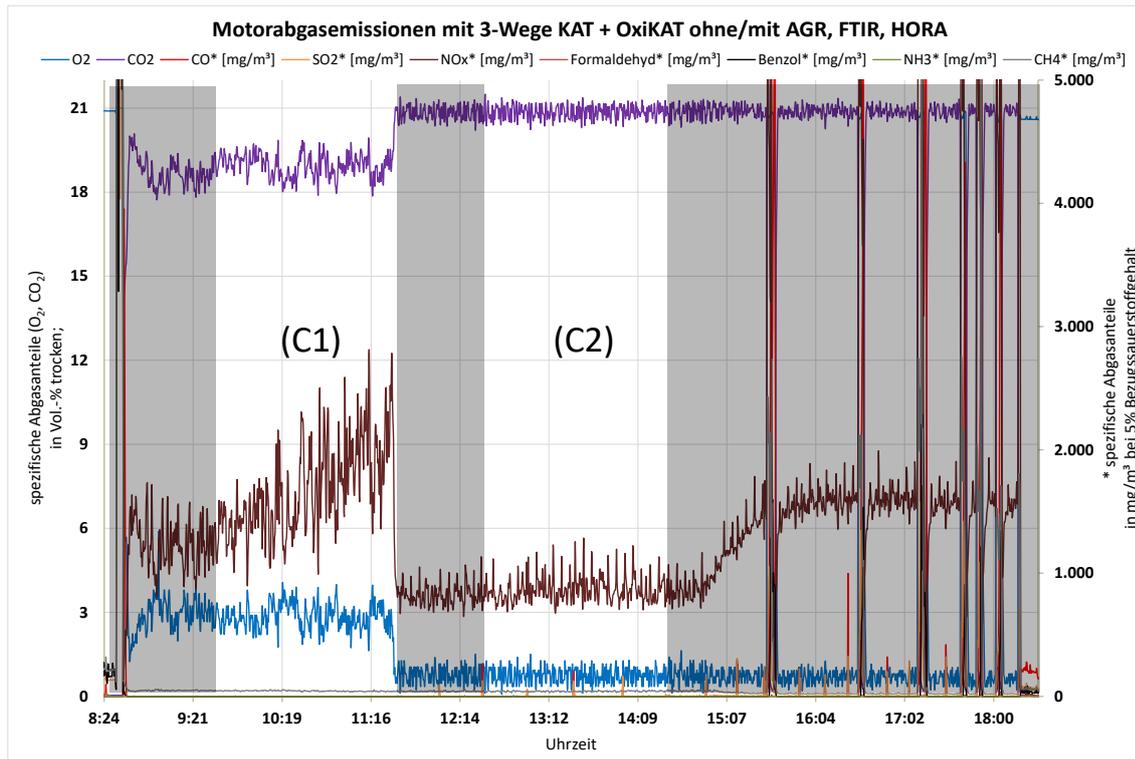


Abb. 1-90 Emissionen BHKW mit 3-Wege-Kat + Oxi-Kat ohne (C1) / mit (C2) AGR

Für die Versuchsauswertung wurden folgende Zeitintervalle gewählt (Tab. 1-38):

Tab. 1-38 Auswerteziträume mit 3-Wege-Kat + Oxi-Kat ohne (C1) / mit (C2) AGR

	(C1) ohne AGR	(C2) mit AGR
Startzeit [hh:mm:ss]	09:30:00	12:24:52
Endzeit [hh:mm:ss]	11:29:53	14:25:06
Auswertzeit [hh:mm:ss]	01:59:53	02:00:14

Die Bewertung der Emissionen und der elektrischen Leistung ergibt die Zahlenwerte in Tab. 1-39.

Tab. 1-39 Auswertung Emissionen BHKW mit 3-Wege-Kat + Oxi-Kat ohne (C1) / mit (C2) AGR

Bezeichnung	(C1) ohne AGR			(C2) mit AGR			Relative Veränderung		
	NOx	CO	PeI	NOx	CO	PeI	NOx	CO	PeI
Einheit	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW			
MIN	897	0	-32,9	676	0	-32,2	-24,7%	-	-1,9%
MAX	2813	0	-29,0	1285	261	-29,3	-54,3%	-	+0,9%
MITTELWERT	1648	0	-31,0	863	2	-30,7	-47,7%	-	-0,9%

Durch den Einsatz der AGR konnten erneut die die NOx Emissionen (ca. 48 %) reduziert werden. Durch den Einsatz zweier Katalysatoren konnten die CO-Emissionen unter die Nachweisgrenze des verwendeten Messgerätes verringert werden. Es zeigt sich allerdings auch, dass die NOx-Emissionen zwar deutlich gesenkt werden können, aber immer noch auf einem hohen Niveau - vergleichbar mit B2 - verharren. Die AGR ist in der Lage die NOx-Emissionen ggü. dem vorherigen Zustand in etwa zu halbieren. Für eine weitere Senkung der Emissionen sind weitere sekundäre Maßnahmen notwendig.

Allein der Einsatz eines 3-Wege-Kat genügt nicht, da wie anfangs beschrieben, nicht die Bedingungen im Abgas vorherrschen, bei denen eine Reduktionsreaktion stattfinden kann. Es zeigt sich des Weiteren eine kleine Reduzierung der elektrischen Leistung nach der Aktivierung der AGR, die jedoch im Rahmen der üblichen Schwankungen liegt. Es konnte zu jeder Zeit ein stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet werden.

- Messfahrt mit KAT-Strecke und Zwischenluftereindüsung ohne/mit AGR (E1 und E2)

In Abb. 1-91 sind die Emissionen des BHKW mit Kat-Strecke und Zwischenluftereindüsung ohne und mit AGR dargestellt. Aufgrund einer im Anschluss durchgeführten Messfahrt konnten bei dieser Messfahrt die gewünschten Aufwärm- und Stabilisierungszeiten nicht eingehalten werden. Die Dauer der Versuchsauswertung von 2 h konnte nur für den ersten Versuchsabschnitt gewährleistet werden. Im späteren Verlauf kam es zur geplanten Zumischung eines anderen Brennstoffes mit dann steigenden NOx-Emissionen. Eine negative Beeinflussung der Versuchsauswertung kann aufgrund der bisher gesammelten Erfahrungen im Anlagenbetrieb ausgeschlossen werden.

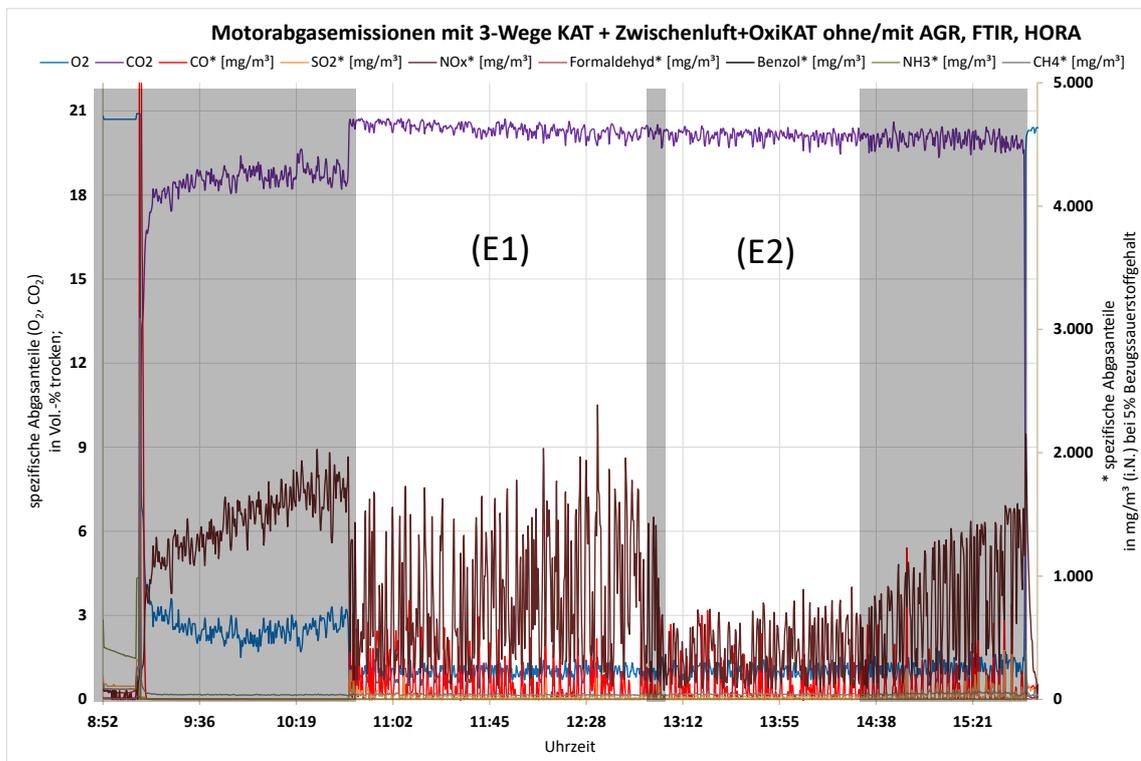


Abb. 1-91 Emissionen BHKW mit Kat-Strecke und Zwischenluftereindüsung ohne (E1) / mit (E2) AGR

Für die Versuchsauswertung wurden folgende Zeitintervalle gewählt (Tab. 1-40):

Tab. 1-40 Auswerteziträume mit Kat-Strecke und Zwischenluftereindüsung ohne (E1) / mit (E2) AGR

	(E1) ohne AGR	(E2) mit AGR
Startzeit [hh:mm:ss]	10:50:07	13:05:01
Endzeit [hh:mm:ss]	12:49:59	14:30:04
Auswertzeit [hh:mm:ss]	01:59:52	01:25:03

Die Bewertung der Emissionen und der elektrischen Leistung ergibt die Zahlenwerte in Tab. 1-41.

Tab. 1-41 Auswertung Emissionen BHKW mit Kat-Strecke und Zwischenlufteindüsung ohne (E1) / mit (E2) AGR

Bezeichnung	(E1) ohne AGR			(E2) mit AGR			Relative Veränderung		
	NOx	CO	PeI	NOx	CO	PeI	NOx	CO	PeI
Einheit	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW			
MIN	109	0	-31,0	64	0,5	-30,5	-41,0%	-	-1,4%
MAX	2388	800	-29,3	911	721	-28,7	-61,9%	-9,9%	-2,0%
MITTELWERT	792	129	-30,2	371	92	-29,4	-53,1%	-28,9%	-2,6%

In dieser Versuchsfahrt wird die Kombination aus Kat-Strecke mit Zwischenluft und AGR untersucht. Die werksseitig vorhandene Lambdasonde wird von vorn nach hinten, vor den Oxi-Kat und nach der Zwischenlufteindüsung, versetzt. Der mit der Verbrennungsluft eingebrachte Luftsauerstoff, geregelt durch die Aktorik des BHKW, sorgt aufgrund der vergleichsweise geringen Menge für Sauerstoffmangel vor dem 3-Wege-Kat, wodurch eine deutliche Reduktion der Stickoxide erreicht werden kann. Die durch den Sauerstoffmangel hohen CO-Emissionen nach dem 3-Wege-Kat werden durch die zusätzlich eingebrachte Zwischenluft und den anschließenden Oxi-Kat zuverlässig oxidiert. Die Wirkung der AGR zeigt auch in dieser Anlagenkonfiguration ein Minderungspotenzial von ca. 53 %. Die Einbußen bei der elektrischen Leistung fallen mit -2,66 % kaum ins Gewicht.

- Messfahrt mit KAT-Strecke, Zwischenlufteindüsung, AGR und zusätzlichem Oxidationskatalysator D

In Abb. 1-92 sind die Emissionen des BHKW ohne und mit AGR dargestellt. Diese Versuchsanordnung spiegelt nicht den werksseitigen Zustand wieder und dient nur zum Aufzeigen des möglichen Emissions-Minderungspotenzials.

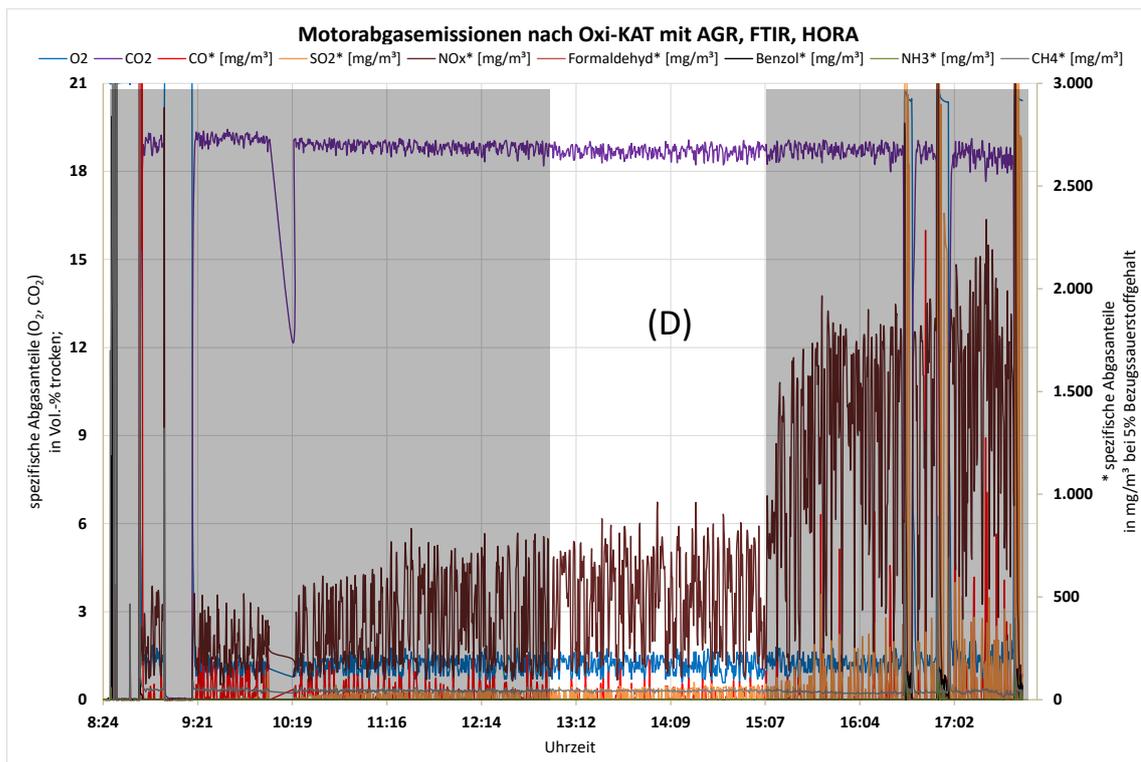


Abb. 1-92 Emissionen BHKW mit Kat-Strecke, Zwischenluftereindüsung und zusätzlichem Oxi-Kat mit AGR (D)

Für die Versuchsauswertung wurden folgende Zeitintervalle gewählt (Tab. 1-42):

Tab. 1-42 Auswerteziträume mit Kat-Strecke, Zwischenluftereindüsung und zusätzlichem Oxi-Kat mit AGR (D)

	(D) ohne AGR
Startzeit [hh:mm:ss]	12:59:55
Endzeit [hh:mm:ss]	14:59:59
Auswertzeit [hh:mm:ss]	02:00:04

Die Bewertung der Emissionen und der elektrischen Leistung ergibt die Zahlenwerte in Tab. 1-43.

Tab. 1-43 Auswertung Emissionen BHKW mit Kat-Strecke, Zwischenluftereindüsung und zusätzlichem Oxi-Kat mit Abgasrezirkulation (D)

	(D) mit AGR		
Bezeichnung	NOx	CO	Pel
Einheit	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	kW
MIN	97	0	-31,6
MAX	962	195	-29,6
MITTELWERT	501	13	-30,2

Der Versuch erfolgte mit einer teilweise installierten Anlagenkonfiguration. Installiert war wie in Versuchsreihe E die Kat-Strecke mit Zwischenluftereindüsung. Da der Bauraum vor dem 3-Wege-Kat noch nicht komplett ausgeschöpft ist, wurde ein weiterer Oxidationskatalysator als erste Reinigungsstufe installiert. Ziel war es, dass der

Restsauerstoff im Abgas vor dem 3-Wege-Kat zuverlässig gesenkt werden kann und hohe CO Peaks bereits am Anfang der Kat-Strecke gesenkt werden können. Der Versuch wurde nur mit Abgasrezirkulation durchgeführt. Die Auswertung erfolgt nur im Vergleich mit den anderen Versuchsreihen im folgenden Kapitel.

### Bewertung der Ergebnisse

#### - Bewertung der Ergebnisse über Konversionsgrad (Mittelwert)

Die Untersuchungen des Emissionsverhaltens des BHKW sind umfangreich erfolgt. Es wurde großer Wert auf vergleichbare Versuchsbedingungen gelegt. Bei einer derart komplexen Versuchsanlage sind systemische Schwankungen nicht ausgeschlossen. Die permanente Überwachung der Versuchsfahrten und genaue Protokollierung aller Anlagenparameter und möglicher Anlagenstörungen wurde ausgewertet. Daraus ergeben sich keine, die Auswertung signifikant verändernden, systemischen Einflüsse.

Die werksseitige Anlagenkonfiguration sorgt für geringe CO-Emissionen, ist aber nicht im Stande die NO<sub>x</sub>-Emissionen zu senken. Verglichen mit den Rohemissionen (gemessen vor dem Katalysator) stellt sich ein guter Konversionsgrad für CO-Emissionen, aber ein sehr schlechter für NO<sub>x</sub>-Emissionen ein. Für die Verwendung eines 3-Wege-Katalysators ist das Anlagenverhalten ungeeignet. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Versuchsaufbaues zahlreiche Eingriffe in die Hardware vorgenommen, um die CO-Emissionen niedrig zu halten, die NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich zu senken und die elektrische Leistung der Anlage auf gleichem Niveau zu halten.

Verwendet man die zuvor erstellte Versuchsmatrix aus Tab. 1-33 und trägt in diese die Mittelwerte der gemessenen Emissionen der einzelnen Versuchsfahrten ein, so wird eine Übersicht für die CO-Emissionen generiert, wie in Abb. 1-93 dargestellt. Die Veränderung der CO-Emissionen lässt sich (Abb. 1-94) in Prozent darstellen. Die Versuchsfahrten beginnen „oben links“ mit der Werkskonfiguration und enden „unten rechts“ mit Kat-Strecke, Zwischenluft und AGR, die letztendliche Vorzugsvariante für den zukünftigen Anlagenbetrieb.

CO* [mg/m <sup>3</sup> ]	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	Kat-Strecke	Kat-Strecke+ Oxi	Kat-Strecke-Luft
ohne Oxi-Kat							
mit Oxi-Kat							
ohne AGR	2127	121					
mit AGR	2603	154					
Kat-Strecke			0	2			
Kat-Strecke-Luft+Oxi				13			
Kat-Strecke-Luft			129	92			

Abb. 1-93 Auswertung CO-Emissionen

CO* Reduzierung auf [%]	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	Kat-Strecke	Kat-Strecke+ Oxi	Kat-Strecke-Luft
ohne Oxi-Kat							
mit Oxi-Kat							
ohne AGR	100%	6%					
mit AGR	122%	7%					
Kat-Strecke			0%	0%			
Kat-Strecke-Luft+Oxi				1%			
Kat-Strecke-Luft			6%	4%			

Abb. 1-94 Auswertung CO-Emissionen (in %)

Die CO-Rohemissionen betragen 2127 mg/m<sup>3</sup> und können durch den werksseitig verbauten Oxi-Kat auf 121 mg/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduzierung auf 6 % in Bezug auf die CO-Rohemission. Es ist bekannt, dass primäre Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Reduktion oft mit steigenden CO-Emissionen einhergehen. Dennoch konnten in der abschließenden Anlagenkonfiguration mit Kat-Strecke, Zwischenluft und AGR die CO-Emissionen nochmals, auf 92 mg/m<sup>3</sup> bzw. 4 % in Bezug auf die CO-Rohemissionen gesenkt werden. Dies entspricht einem Konversionsgrad von 96 %.

Für die NO<sub>x</sub>-Emissionen lässt sich eine vergleichbare Darstellung erstellen (Abb. 1-95 und Abb. 1-96).

NO <sub>x</sub> * [mg/m <sup>3</sup> ]	ohne Oxi-Kat		mit Oxi-Kat		ohne AGR		mit AGR		Kat- Strecke- Luft+Oxi	Kat- Strecke- Luft
	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	ohne AGR	mit AGR	ohne AGR	mit AGR		
ohne Oxi-Kat										
mit Oxi-Kat										
ohne AGR			2274	1616						
mit AGR			899	861						
Kat-Strecke					1648	863				
Kat-Strecke- Luft+Oxi						501				
Kat-Strecke-Luft					792	371				

Abb. 1-95 Auswertung NO<sub>x</sub>-Emissionen

NO <sub>x</sub> * Reduzierung auf [%]	ohne Oxi-Kat		mit Oxi-Kat		ohne AGR		mit AGR		Kat- Strecke- Luft+Oxi	Kat- Strecke- Luft
	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	ohne AGR	mit AGR	ohne AGR	mit AGR		
ohne Oxi-Kat										
mit Oxi-Kat										
ohne AGR			100%	71%						
mit AGR			40%	38%						
Kat-Strecke					72%	38%				
Kat-Strecke- Luft+Oxi						22%				
Kat-Strecke-Luft					35%	16%				

Abb. 1-96 Auswertung NO<sub>x</sub>-Emissionen (in %)

Die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen liegen bei 2274 mg/m<sup>3</sup> und können scheinbar durch den werksseitig verbauten Oxi-Kat auf 1616 mg/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Wie schon erwähnt, ist dies in der zu kurzen Einfahrzeit des BHKW begründet. Ein reiner Oxidationskatalysator ist nicht imstande NO<sub>x</sub> zu N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> zu reduzieren. Durch den Einsatz von primären und sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen konnten letztendlich NO<sub>x</sub>-Emissionen von 371 mg/m<sup>3</sup> erreicht werden. Dies entspricht einem Niveau von lediglich 16 % in Bezug auf die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen. Der NO<sub>x</sub>-Konversionsgrad liegt demnach bei 84 %.

Die Versuchsfahrt mit Kat-Strecke, Zwischenluftindüsung, AGR und zusätzlichem Oxidationskatalysator liefert in Bezug auf die CO-Emissionen minimal bessere Ergebnisse, kann aber in Bezug auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen lediglich einen Konversionsgrad von 78 % erreichen. Der Einsatz eines dritten Katalysators verspricht somit keine weitere Verbesserung und wird, auch aufgrund des immer weiter steigenden Druckverlustes, verworfen.

In Bezug auf die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen konnte durch die Installation der Kat-Strecke mit Zwischenluftindüsung eine signifikante Minderung dieser Schadstoffe erreicht werden. Weitere relevante Emissionen sind Formaldehyd und Benzol. Für die Versuchsreihe E sind die gemessenen Konzentrationen in Tab. 1-44 angegeben. Die Mittelwerte der gemessenen Emissionen unterschreiten die Grenzwerte in [13] wie auch die nach [10] erreichbaren Emissionen deutlich.

Tab. 1-44 Formaldehyd und Benzol-Emissionen der Vorzugsvariante E

	(1) ohne AGR		(2) mit AGR		Bezeichnung	Grenzwerte	
	Formaldehyd	Benzol	Formaldehyd	Benzol		Formaldehyd	Benzol
Einheit	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	Quelle	TA Luft 2002 [13]	
MIN	0	0	0	0,0	Wert	20 mg/m <sup>3</sup>	1 mg/m <sup>3</sup>
MAX	0,4	2,3	0,4	4,1	Quelle	VDI 3461 [10]	
MITTELWERT	0,1	0,2	0,1	0,1	Wert	10 mg/m <sup>3</sup>	1 mg/m <sup>3</sup>

Für den wirtschaftlichen Betrieb ist allerdings die elektrische Leistung des BHKW von entscheidender Bedeutung. In Abb. 1-97 und Abb. 1-98 sind die Ergebnisse der gemessenen mittleren elektrischen Leistung dargestellt. Die benötigte elektrische Leistung des Zwischenluftgebläses ist nicht in dieser Bilanzierung enthalten. Es handelt

sich um einen Becker G008414 Drehschieberverdichter mit einer Nennleistung von 1,1 kW.

Pel [kW]	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	Kat-Strecke	Kat-Strecke+Oxi	Kat-Strecke-Luft
ohne Oxi-Kat							
mit Oxi-Kat							
ohne AGR	-30,8	-29,8					
mit AGR	-29,9	-30,5					
Kat-Strecke			-31,0	-30,7			
Kat-Strecke-Luft+Oxi				-30,2			
Kat-Strecke-Luft			-30,2	-29,4			

Abb. 1-97 Auswertung elektrische Leistung BHKW

Pel Reduzierung auf [%]	ohne Oxi-Kat	mit Oxi-Kat	ohne AGR	mit AGR	Kat-Strecke	Kat-Strecke+Oxi	Kat-Strecke-Luft
ohne Oxi-Kat							
mit Oxi-Kat							
ohne AGR	100%	97%					
mit AGR	97%	99%					
Kat-Strecke			101%	100%			
Kat-Strecke-Luft+Oxi				98%			
Kat-Strecke-Luft			98%	95%			

Abb. 1-98 Auswertung elektrische Leistung BHKW (in %)

Über alle Versuchsreihen hinweg bleibt die elektrische Leistung des BHKW auf einem ähnlichen Niveau. Die Nennleistung des BHKW von 30 kW wurde somit auch mit der KAT-Strecke nahezu erreicht. In Bezug auf die Werkskonfiguration (hier als B1 bezeichnet), bei der 29,8 kW erreicht werden, sinkt die Leistung im emissionsoptimierten Betriebszustand auf 29,4 kW. Nicht mit einberechnet ist die zusätzlich benötigte Energie für den Drehschieberverdichter zur Zwischenlufterindung. Die elektrische Leistung unterliegt bei diesem Anlagentyp (Holzgas-BHKW) gewissen Schwankungen. Insbesondere die Brennstoffqualität ist hier entscheidend. Die Messungen zeigen, dass es zwar einen negativen Einfluss der Emissionsminderungsmaßnahmen auf die elektrische Leistung gibt, dieser aber akzeptabel ist.

#### - Bewertung der Ergebnisse über vergleichendes Kursdiagramm

Die Bewertung der Mittelwerte lässt Rückschlüsse auf den Vergleich der unterschiedlichen technischen Umsetzungen zu. Für die Bewertung der unterschiedlichen Betriebszustände und des Betriebsverhaltens sind neben der Mittelwertbetrachtung auch die Schwankungen während der Messfahrt von großem Interesse.

Die Darstellung erfolgt anhand von Kursdiagrammen, in denen neben den Mittelwerten auch die Minimal- und Maximalwerte dargestellt werden. Des Weiteren sind in den Darstellungen für die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen mögliche Grenzwerte angegeben. In Abb. 1-99 sind die CO Emissionen in Abhängigkeit der gewählten Emissionsminderungstechnologie dargestellt.

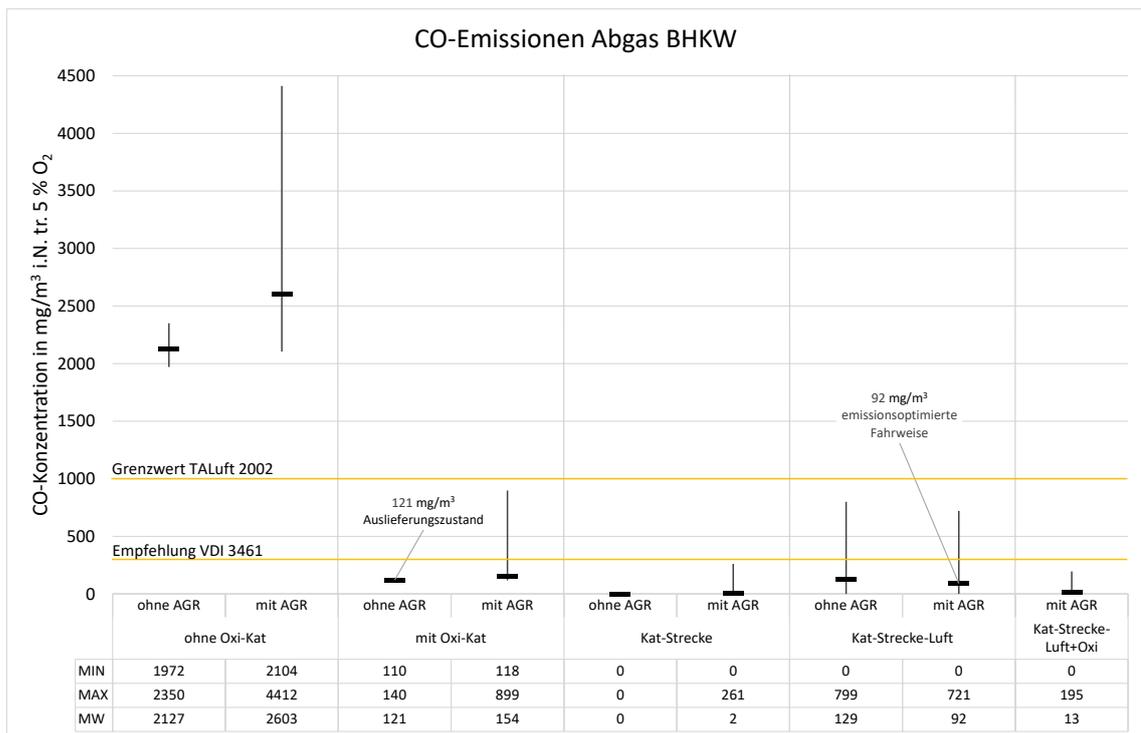


Abb. 1-99 Kursdiagramm CO-Emissionen BHKW

Es kann festgehalten werden, dass die mittleren CO-Emissionen in allen gewählten Konfigurationen sowohl unter dem Grenzwert der TALuft 2002 [13], als auch unter der Empfehlung der VDI 3461 [10] liegen. Der Versuch mit der AGR die NO<sub>x</sub>-Emissionen zu mindern, erzeugt bei den CO-Emissionen Peaks, die teilweise über den möglichen Grenzwerten liegen. Der ausschlaggebende Mittelwert wird dadurch nicht signifikant beeinflusst.

In Abb. 1-100 sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich schwieriger ist. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen sowohl im Auslieferungszustand als auch bei fast allen Anlagenkonfigurationen deutlich über den herangezogenen Grenz- bzw. Richtwerten. Auch die Schwankungen während der Betriebs sind deutlich auffälliger. Für die emissionsoptimierte Fahrweise mit Kat-Strecke und Zwischenlufterindüsung kann im Mittel der Grenzwert nach [13] und insbesondere die Empfehlung der [10] unterschritten werden.

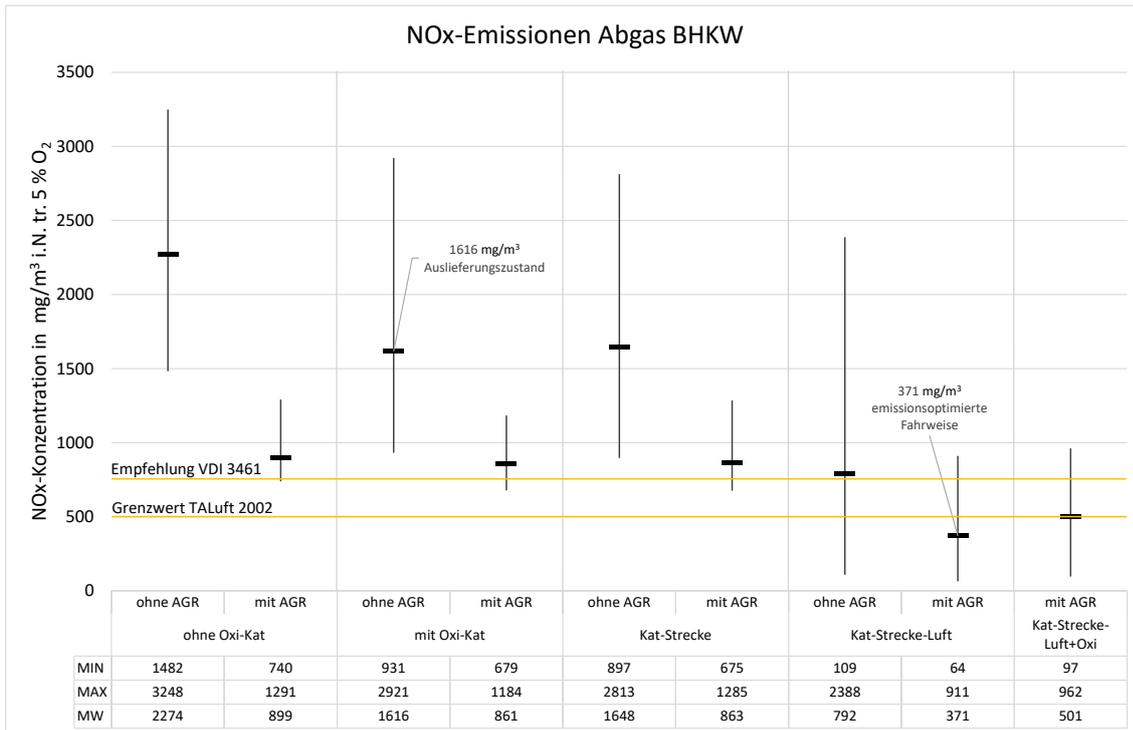


Abb. 1-100 Kursdiagramm NOx-Emissionen BHKW

In Abb. 1-101 werden die CO- und NOx-Emissionen in einem gemeinsamen Kursdiagramm dargestellt. Rot dargestellt ist der Auslieferungszustand, grün die emissionsoptimierte Fahrweise.

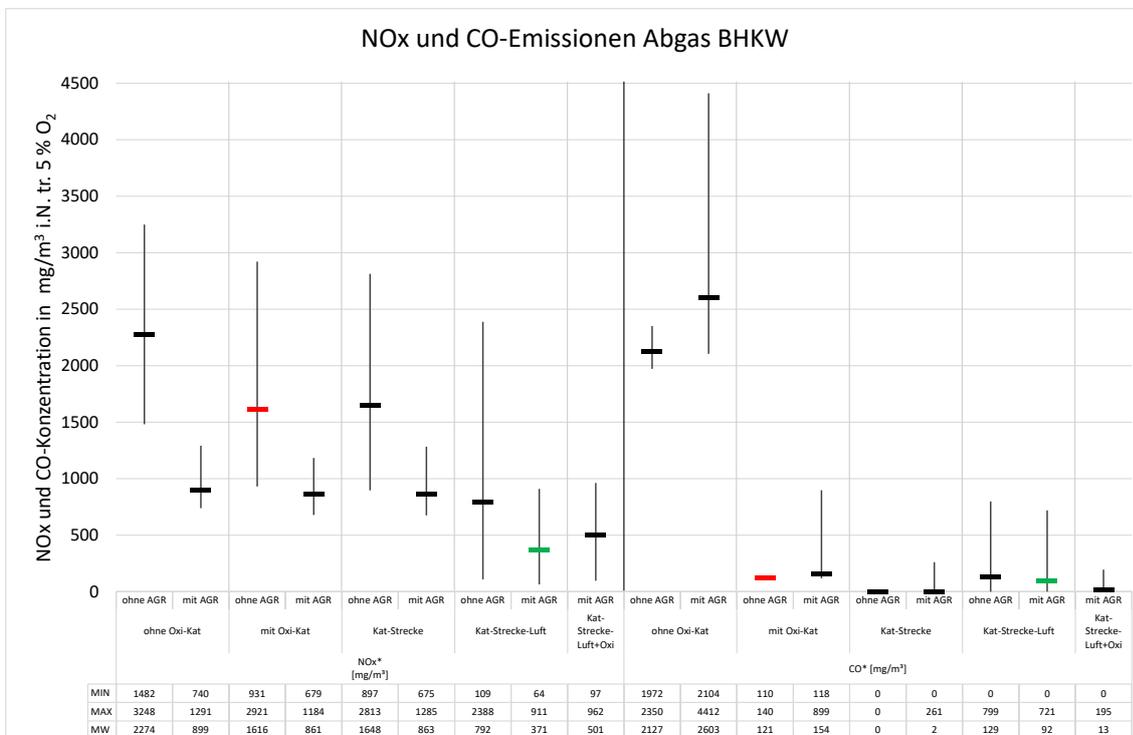


Abb. 1-101 Kursdiagramm CO- und NOx-Emissionen BHKW

Eine vergleichbare Darstellung lässt sich auch für die elektrische Leistung des BHKW aufzeigen (Abb. 1-102).

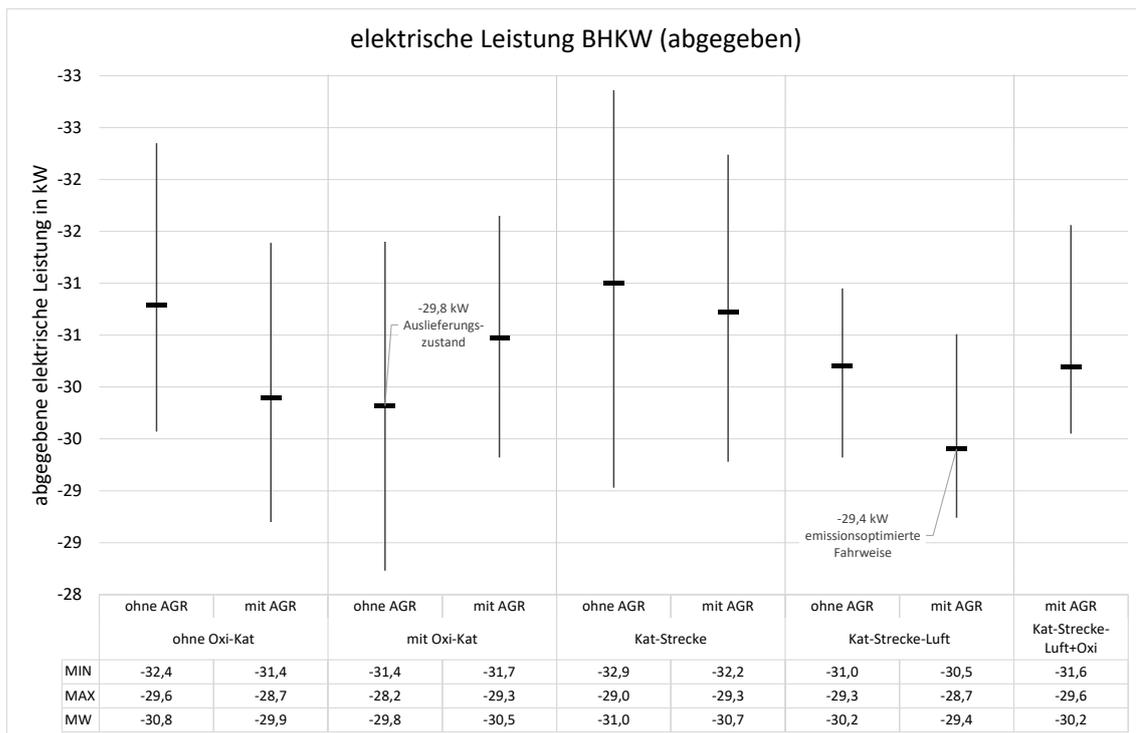


Abb. 1-102 Kursdiagramm elektrische Leistung BHKW

Wie bereits festgestellt, sinkt bei der emissionsoptimierten Fahrweise die elektrische Leistung minimal. Es ist aber auch festzuhalten, dass die Leistung gerade im Auslieferungszustand wesentlich stärker schwankt. Auch die im Auslieferungszustand minimal abgegebene elektrische Leistung von -28,2 kW liegt deutlich unter der minimal abgegebenen elektrischen Leistung in der emissionsoptimierten Fahrweise von -28,7 kW. Insgesamt wirkt sich die Installation der KAT-Strecke mit Zwischenlufterdündung dämpfend auf die elektrische Leistung aus, was auf einen gleichmäßigeren BHKW-Betrieb hindeutet.

#### Handlungsempfehlungen für den dauerhaften Betrieb

Die technischen Änderungen in Bezug auf die Installation einer AGR sind verhältnismäßig unkompliziert auch bei Bestandsanlagen umzusetzen. Hierfür ist das emissionsoptimierte Einmessen des BHKW mit entsprechender Messtechnik vor Ort notwendig. Die Installation der KAT-Strecke ist aufgrund der größeren Apparaturen Aufwands wesentlich komplizierter und bedingt größere Eingriffe in die Anlage selbst.

Die Auswirkungen beider Technologien auf einen dauerhaften, betriebssicheren und emissionsarmen Anlagenbetrieb werden durch weitere Versuchsfahrten im Laufe der weiteren Projektarbeit bewertet und sind Teil des Abschlussberichts.

## 2 Darstellung anderer wesentlicher Ereignisse

- regelmäßig (aller 2 Wochen) stattfindende Abstimmungen der unterschiedlichen Arbeitsgruppen (AG) in Form von AG-Verantwortlichen-Treffen
- Einstellung Herr Dipl.-Ing. Steffen Grusla zum 01.07.2019 mit 0,5 VZÄ bis 30.9.2020
- Laborführung im Zittauer Kraftwerkslabor (ZKWL) im Rahmen des CIO (Cleantech Initiative Ostdeutschland) - Arbeitskreistreffen Energiespeicher zum Thema "Thermische Energiespeicher - Erfahrungen, Herausforderungen & Ausblicke", 04.02.2020, Hr. Titze
- Laborführung im ZKWL im Rahmen des großen Absolvententreffens der Fak. Maschinenwesen + 50. Jahrestag Ingenieurshochschule Zittau, 05.-06.06.2019, Hr. Titze
- Laborführung im ZKWL im Rahmen eines Workshops zum IPM-Projekt HOTHES, 21.06.2019, Hr. Titze
- Laborführung im ZKWL mit Vertretern des Staatsbetriebes Sächs. Immobilien- und Baumanagement (SIB), 05.09.2019, Hr. Titze
- Laborführung im ZKWL im Rahmen der HSZG-Veranstaltung „Bürger trifft Wissenschaft“, 18.11.2019, Hr. Titze
- Laborführung im ZKWL mit Vertretern des DLR Stuttgart/Köln, 24.01.2020, Hr. Titze
- Onlinebasierte Durchführung der Nachwuchswissenschaftlerkonferenz „Young Academics Conference“, Veranstalter: HSZG, BTU Freiberg, TU Dresden, ATB Potsdam, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, 17.07.2020, Zittau, Prof. Zschunke, Hr. Schneider
- Gemeinsame Messfahrt mit Vertretern (Hr. Weinhold, Hr. Seyfarth) der Westsächsischen Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft (WEV) bei Einsatz einer Charge des holzigen Siebüberlaufs einer Deponie der WEV am 27.07.2020, Zittau, Hr. Schneider, Hr. Grusla
- Teilnahme am „Stapellauf“ des ersten serienmäßig produzierbaren mobilen Latentwärmespeicher der Fa. PECEM, Königswartha, 03.08.2020, Hr. Titze
- Teilnahme am 20. Fachkongress Holzenergie des Fachverbandes Holzenergie im BBE am 22.-30.9.20, Online, Hr. Schneider
- Onlinebasierte TCV-Anlagenbesichtigung mit Mitarbeitern der Naturamus GmbH und atmosfair gGmbH (Dr. Zeller, Dr. Hildermann, Fr. Schillinger) am 05.11.2020 im Rahmen einer Messfahrt, Zittau, Hr. Schneider

Weiterhin wurden im Rahmen der HORA-Projektarbeit folgende studentische Arbeiten betreut:

- Soufiane Anwar, Integration und Einsatzbewertung einer Messstrecke zur Minimierung von Motorabgasemissionen, Masterarbeit, 04/2019 bis 10/2019, Betreuer: Hr. Schneider
- Kay Doßmann, Unterstützung bei Rechercharbeiten zur Brennstoffvariation sowie bei der Datenauswertung, studentische Hilfskraft, 11/2019 bis 12/2019, Betreuer: Hr. Schneider

- Anas Bassir, Bewertung der Staubabscheidung in der Abluft einer Biomassetrocknungsanlage mit Hilfe eines Zyklons, Projektarbeit, 12/2019 bis 02/2020, Betreuer: Hr. Schneider
- Philipp Kutzner, Abschätzung zur Machbarkeit der energetischen Umsetzung von Klärschlamm in einer kleintechnischen Vergasungsanlage der Firma MFC Multifuel Conversion GmbH, Diplomarbeit, 07/2019 bis 02/2020, Betreuer: Hr. Schneider
- Robert Weinhold (HTWK Leipzig), Vergasungstests von Sieüberlauf-HHS, Masterarbeit, 08/2020 bis 02/2021, externe Betreuung durch HSZG: Hr. Schneider
- Lea Schillinger (Hochschule Albstadt-Sigmaringen), Anwendungsorientierte Untersuchung für die Verwertung von Macadamianusschalen zur dezentralen Energieerzeugung mit einem Holzvergasungs-Blockheizkraftwerk, Masterarbeit, externe Betreuung durch HSZG: Hr. Schneider

## 2.1 Veröffentlichungen

### 2.1.1 Angabe der bereits erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

#### Wissenschaftliche Artikel

- Schneider, R., Zschunke, T.: Brennstoffvariation bei der kleintechnischen Holzvergasung, In: Thrän, D., Pfeiffer, D. (Hrsg.): Bioenergie: Der X-Factor!, Tagungsband zur 8. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung, ISBN 978-3-946629-27-6, Leipzig, September 2019

#### Forschungsberichte

- Grusla, S.: CFK-Verbrennungsversuche, Forschungsbericht, Zittau, 20.01.2020
- Pohl, R., Schneider, R.: Summary and conclusion of the investigation of the use of tobacco stems as a fuel, Forschungsbericht für die United Tobacco Processing Ltd., Zittau, 13.03.2020
- Schneider, R., Grusla, S., Hofmeister, M., Pohl, R., Zschunke, T.: Strohvergasung, Forschungsbericht, Zittau, Veröffentlichung im März 2021
- Salomo, B., Pohl, R., Schneider, R.: Emissionsminderung am Holzgas-BHKW, Forschungsbericht, Zittau, noch nicht veröffentlicht
- Titze, E.: Einsatz von PCM-Speicherdemonstratoren bei Biomasse-Vergasungs-BHKW, Forschungsbericht, Zittau, noch nicht veröffentlicht
- Pohl, R.: Kalibrierung eines Karman-Vortex-Systems zur Volumenstrommessung, Forschungsbericht, Zittau, noch nicht veröffentlicht

#### Vorträge und Poster

- Titze, E.: Latentwärmespeicher in der Forschung, Pitch zur Eröffnung des Co-Creation Lab „Celsiuz“ der Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau, 21.11.2019
- Schneider, R.: Biomassevergasung in der Forschung, Pitch zur Eröffnung des Co-Creation Lab „Celsiuz“ der Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau, 21.11.2019
- Titze, E.: Phasenwechselmaterialien (PCM) in der Forschung, Vortrag CIO (Cleantech Initiative Ostdeutschland)-Arbeitskreistreffen Energiespeicher zum Thema "Thermische Energiespeicher - Erfahrungen, Herausforderungen & Ausblicke", Zittau, 04.02.2020

- Titze, E.: Integration von Latentwärmespeichern in ein Holzgas-BHKW, Vortrag zum Industrieworkshop Thermische Energiespeicher zur effizienten Abwärmenutzung des Fraunhofer IFAM, Dresden, 03.03.2020
- Zschunke, T.: Kälte aus Biomasse: Drei Thesen zu einer Gesamtsystembetrachtung, Vortrag zum Workshop "Kälte aus Biomasse. Perspektiven für die Biomasse-Verbrennung und -Vergasung" der FEE e.V., Berlin, 02.11.2020
- Salomo, B., Titze, E., Schneider, R.: Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA), Poster zur Projektinformation, Zittau, 09.11.2020
- IPM: Image-Film der IPM-Fachgruppen im Rahmen der SAENA-Veranstaltung „2. Informations- und Vernetzungsveranstaltung in den Bereichen Energieforschung und Energieinnovation – Chancen für sächsische Akteure“, 09.12.2020

Darüber hinaus werden alle Forschungsberichte und Zwischenberichte des Projektes HORA auf der Institutswebseite (<https://ipm.hszg.de/kompetenzen/kraftwerksdampferzeuger-und-feuerungstechnik/publikationen>) veröffentlicht.

#### Weitere geplante Veröffentlichungen

- Zschunke, T. et al.: Tagungsband zur Young Academics Conference 2020, Veranstalter: Hochschule Zittau/Görlitz, TU Dresden, TLLLR Thüringen, ATB Potsdam, TU Freiberg, LfULG Sachsen, Zittau, Einreichung bei SpringerLink in der Veröffentlichungsreihe „Fortschritte der Naturstofftechnik“
- Rothe, F., Schneider, R.: LDA-Einsatz bei Holzvergasern, Einreichung noch offen
- Zschunke, T. et al.: Strohvergasung, Einreichung bei Energy Research - Bioenergy and Biofuels

### 3 Vergleich des Standes des Vorhabens mit dem ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Finanzierungsplan

#### 3.1 Einschätzung des Finanzierungs- und Zeitplanes

Hinsichtlich des Projektbalkenplanes und der darin festgelegten zeitlichen Abfolge der Arbeitspunkte (AP) wurden im Berichtszeitraum Änderungen gemäß den Anschreiben vom 14.10.20 beantragt und genehmigt. Darauf bezugnehmend haben sich die Bearbeitungszeiträume der AP nach Abb. 3-1 und Tab. 3-1 geändert.

Jahr	2019												2020												2021							PM				
	Monat												Monat												Monat											
<b>AP1 Systemanalyse und Betriebsvariation</b>																																				<b>43</b>
AE1.1 Systemanalyse																																				<b>7,5</b>
Integration / Erneuerung Anlagentechnik und Sensorik																																				
Begleitende Tests und Versuchsfahrten																																				
Begleitende Modellierung und Simulation																																				
AE1.2 Variation Brennstoff und Vergasungsmittel																																				<b>35,5</b>
Umrüstung und Test																																				
Variation Brennstoffe und Erweiterung des Brennstoffspektrums durch neuartiges Anlagenkonzept																																				
Variation Vergasungsmittel																																				
Auswertung der Variationen und Handlungsempfehlung																																				
<b>AP2 Speichertechnologien</b>																																				<b>23</b>
AE2.1 Validierung der entwickelten und gefertigten prototypischen Speicher-Demonstratoren																																				<b>8,5</b>
Vermessung und Validierung LuVo-Speicher am Heißluftkanal																																				
Vermessung und Validierung Latentwärmespeicher an Wärmespeicher-Testanlage																																				
Vermessung und Validierung Pulsationsdämpfer mit Luft																																				
AE2.2 Technische Integration der Speicher in das Biomasse-Vergasungs-BHKW																																				<b>7</b>
Integration LuVo-Speicher in Biomasse-Vergasungs-BHKW																																				
Integration Latentwärmespeicher in Biomasse-Vergasungs-BHKW																																				
Integration Pulsationsdämpfer in Biomasse-Vergasungs-BHKW																																				
AE2.3 Abstimmung der Speicher auf den Anlagenbetrieb																																				<b>7,5</b>
Versuchsfahrten zur Erprobung der Speicher am Vergasungs-BHKW																																				
Versuchsfahrten zur Speicherabstimmung auf den Anlagenbetrieb																																				
<b>AP3 Emissionsverhalten und Emissionsminderung</b>																																				<b>29</b>
AE3.1 Emissionsverhalten																																				<b>6,5</b>
Versuchsfahrten zur Erfassung der Motorabgasemissionen in unterschiedl. Betriebszuständen																																				
Theoretische Untersuchungen und Ableitungen zur Emissionsminderung																																				
AE3.2 Emissionsminderung																																				<b>22,5</b>
Versuchsaufbau unterschiedlicher Maßnahmen zur Emissionsminderung																																				
Versuchsfahrten und Einsatztest verschiedener Emissionsminderungsmaßnahmen																																				
Versuchsauswertung und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Emissionsminderung																																				
<b>Summe</b>																																				<b>95,0</b>
<b>Legende</b>																																				
	rote Schrift und Zahlen betreffen Änderungen im Balkenplan																																			
	schraffierter Bereich kennzeichnet corona-bedingte Home-Office-Zeit (kein Laborbetrieb)																																			

Abb. 3-1 aktualisierter Balkenplan zum Projekt HORA gemäß Änderungsantrag vom 14.10.2020

Die Änderungen im Arbeitsplan wurden vor allem aufgrund umfangreicherer Brennstoffvariationen notwendig. Somit mussten Teile des AP1 Systemanalyse und Betriebsvariation (Arbeitseinheiten 1.2 Variation Brennstoff und Vergasungsmittel) hinsichtlich ihres zeitlichen und inhaltlichen Umfangs verändert werden. Die Variation des Vergasungsmittels wurde technisch vorbereitet, die praktische Umsetzung jedoch vorerst ausgesetzt. Dies war notwendig, um die Variation der Brennstoffe mit einem neuartigen Anlagenkonzept (Arbeitstitel „Strohvergaser“) zu erweitern und damit das einsetzbare Brennstoffspektrum der Rest- und Abfallstoffe maßgeblich zu erhöhen. Um dies zu gewährleisten, wurde die Entwicklung und der Einsatz des Pulsationsdämpfers aus dem Arbeitsplan des AP2 Speichertechnologien gestrichen. Die damit freiwerdenden Kapazitäten wurden für die Validierung des LuVo-Speichers und für den Ausbau der zuvor beschriebenen AE1.2 Variation Brennstoff genutzt.

Das zuvor erwähnte neuartige Anlagenkonzept „Strohvergaser“ bezieht sich auf die Vergasung von Rest- und Abfallstoffen im kleintechnischen Maßstab. Hierfür wurde ein bestehender Vergaserprototyp in das Projekt HORA aufgenommen. Dieser wurde und wird im Rahmen der Projektarbeit mit verschiedenen Brennstoffen getestet. Hervorzuheben ist, dass die Untersuchungen an einem außerplanmäßig neu entwickelten Vergasertyp unter Nutzung der Erfahrungen aus dem Projekt „Thermochemisches Versuchsfeld“ diskriminierungsfrei der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Besonderheit dieser Anlage „Strohvergaser“ ist die sich abzeichnende

Einsatzmöglichkeit von Brennstoffen, die zur Verschlackung neigen (Stroh, Klärschlamm etc.).

Im Balkenplan (vgl. Abb. 3-1) wurde außerdem der zeitliche Bereich gekennzeichnet, in dem aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie keine Labortätigkeit, sondern nur Home-Office möglich war. Dies betrifft den Zeitraum von März 2020 bis Anfang Mai 2020.

Zu Meilenstein 1 (M1 nach 9 Projektmonaten im Februar 2020) wurde eine Auswertung der AE2.1 und AE3.1 vorgenommen und der Validierungsabschluss der Speicher in AE2.1 erreicht. Wie zuvor beschrieben, wurde gemäß Änderungsantrag die Entwicklung und der Einsatz des Pulsationsdämpfers aus dem Arbeitsplan des AP2 Speichertechnologien gestrichen und der ebenfalls zu M1 ursprünglich anvisierte Beginn der Parametervariation des Vergasungsmittels vorerst ausgesetzt.

Der Termin des Meilensteins 2 (M2 nach 20 Monaten im Januar 2021) wird beibehalten. Aufgrund der genehmigten Ausweitung der AE1.2 kann jedoch entgegen der bisherigen Planung zu diesem Zeitpunkt noch kein Abschluss der Brennstoffvariation erfolgen. Der Abschluss der Speicherintegration innerhalb AE2.2 wird voraussichtlich zu diesem Termin erfolgen. Lediglich die Integration des LuVo-Speichers wird aufgrund eines nachträglichen Downscaling-Prozesses etwas später als ursprünglich geplant realisiert.

Tab. 3-1 Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung nach Änderungsbescheid

AP/MS	Zeitplan	Aktueller Stand
AE1.1	05/19 bis 05/21	In Bearbeitung
AE1.2	05/19 bis 04/21*	In Bearbeitung
AE2.1	05/19 bis 11/20*	Abgeschlossen
AE2.2	12/19 bis 10/20*	Teilweise abgeschlossen
AE2.3	03/21 bis 07/21	In Vorbereitung
AE3.1	05/19 bis 12/19	Abgeschlossen
AE3.2	10/19 bis 07/21	In Bearbeitung
Meilensteine		
M 1	02/2020	Erfolgt
M 2	01/2021	offen

\* aufgrund Änderung des AP-Inhaltes entspr. Antrag und Genehmigung

Darüber hinaus ist es angedacht, beim Projektträger eine kostenneutrale Verlängerung des Bewilligungszeitraumes zu beantragen. Hierfür werden aktuell die finanziellen Möglichkeiten im Projekt geprüft.

#### 4 Darstellung evtl. notwendiger Änderungen in der Zielsetzung

Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig (Begründung)?

- Nein

#### 5 Ergebnisse von dritter Seite oder Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind

- Nein

#### 6 Angabe von gemachten Erfindungen, vorgenommenen Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechten

- Keine

## 7 Anwendungsmöglichkeiten und Darstellung der geplanten Verwertung der Projektergebnisse

Das Forschungsvorhaben lässt sich in vieler Hinsicht in die Innovationsstrategie des Freistaates Sachsen einordnen. Das betrifft insbesondere die Bereiche outputstarke Wissenschaft und effiziente Kooperation, Mensch und Gesellschaft sowie die Zukunftsfelder Umwelt und Ressourcen, Energie und Rohstoffe.

Die Bearbeitung eines derart komplexen und für die Energieversorgung der Zukunft bedeutsamen Projektes – wie des hier beantragten – führt in einem hohen Maße zur Stärkung der Strukturen und Kompetenzen in der Wissenschaftslandschaft des Freistaates Sachsen, und dies in einer strukturschwachen Region. Im engen fachlichen Austausch mit der regionalen Wirtschaft sowie (außer-) universitären Forschungseinrichtungen wird ein hohes Maß an lokaler Vernetzung zur Organisation eines effektiven Wissens- und Technologietransfers erzeugt. Die HSZG stärkt damit ihren Ruf als Energiehochschule nicht nur auf dem Gebiet der Nutzung konventioneller, sondern gerade auch erneuerbarer Energieträger. Die Einbindung von Studierenden in anspruchsvolle Forschungsvorhaben im Rahmen studentischer Arbeiten und die Nutzung der Ergebnisse in qualitativ hochwertigen Lehrveranstaltungen führen zur Ausbildung von Spitzenkräften für die regionale und überregionale Wirtschaft. Besonders auch die postgraduale Qualifikation der jungen Wissenschaftler ist von persönlicher und gesellschaftlicher Bedeutung.

Selbstverständlich sichert das Projekt während der Laufzeit unmittelbar und durch Generierung von Anschlussprojekten vor allem auch zukünftig die Bündelung der personellen Kompetenzen im Bereich energieeffizienter und umweltschonender Technologien am Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Zittau.

Die HSZG schärft im Verlaufe des Projektes das Profil als kompetenter Partner bei der Weiterentwicklung energietechnischer Komponenten – speziell dezentraler thermochemischer Biomasse-Vergasungsanlagen sowie thermischer und stofflicher Speicher, zugehöriger Wandlungsanlagen – und zuverlässiger Mess- und Regelsysteme. Die HSZG genießt bereits einen Ruf als exzellenter Ausbildungs- und Forschungsstandort im Bereich der konventionellen und regenerativen Energietechnik, unter anderem bei Großunternehmen, aber auch bei zahlreichen (über-) regionalen mittelständischen Unternehmen (Hersteller und Betreiber von Energieanlagen), der im Verlaufe des Projektes weiter gestärkt und ausgebaut wird.

Das Projekt bietet durch die anwendungsorientierten Forschungsinhalte beste Voraussetzungen sowohl für einen anschließenden direkten Wissenstransfer in die Wirtschaft im Rahmen industriefinanzierter Anschlussprojekte als auch für die Akquise öffentlich finanzierter Projekte zur weiteren Verbesserung der Anlagenflexibilität (z.B. Brennstoffspektrum). Aspekte der Arbeitsplatzsicherung und Nachwuchsqualifizierung in der strukturschwachen Region Oberlausitz sind dabei natürlich von besonderer Bedeutung.

Der Wissenstransfer in die Wirtschaft und aus der Wirtschaft bekommt einen kräftigen Impuls, weil mit dem im Projekt tätigen wissenschaftlichen Personal eine intensive Kommunikation mit den interessierten Firmen geführt werden kann. Der Wissenstransfer über Köpfe erhält dadurch eine maßgebliche Erweiterung seiner Möglichkeiten.

Potenzielle Anwendungsbereiche sind die Erweiterung der Wärmeversorgung von kommunalen und gewerblichen Wärmeversorgungsanlagen (bisher ohne Stromerzeugung) zu Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Der KWK-Betrieb ist bei Betrachtung der Energiebilanzen ein sehr wertvoller Beitrag zur Energieversorgung. Es

ist damit zu rechnen, dass sich angesichts der Anforderungen der Transformation des Energiesystems die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so weiterentwickeln werden, dass sie dieser technischen Eigenschaft gerecht werden. Dies kann durch Weiterentwicklung der Marktbedingungen geschehen, die selbst wiederum durch politische Steuerinstrumente angeregt werden. Die Nachfrage nach dezentraler, wärmegekoppelter Stromerzeugung mit hoher Eigenerzeugungskomponente wird steigen (müssen). Damit wird sich ein wirtschaftliches Nachfrageumfeld für die Erkenntnisse des Vorhabens ergeben. Es liegt in der Logik der deutschen „Energiewende“, dass vom Erreichen einer Vorbildwirkung für andere europäische Regionen ausgegangen werden darf, wo sich erfolversprechende Marktsituationen für solche dezentrale Technik herausbilden werden.

Mit dem Vorhaben wird die Basis dafür verbessert, Drittmittel aus Quellen der EU, des Bundes und der Wirtschaft einzuwerben. Die mit dem Vorhaben fokussierten Themen sind von weltweiter Bedeutung, weshalb die Chancen für eine nachhaltige Entwicklung im Drittmittelbereich sehr groß sind. Außerdem werden für einen begrenzten Zeitraum Arbeitsplätze in der anwendungs- und praxisorientierten Wissenschaft geschaffen.

Durch die Kooperationen mit innovativen Unternehmen aus der Region in den Bereichen der Umwelt- und Lufttechnik (ULT AG, Löbau), der Elektrotechnik und Automatisierung (ecu.de, Zittau) sowie einem Recyclingunternehmen (SRW metalfloat GmbH, Rötha) werden Innovationen in den jeweiligen Technologiefeldern der Unternehmen ermöglicht. Darüber hinaus wurden Kooperationen mit Einrichtungen aus dem Bereich der Abfallwirtschaft (Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH (EGS), Merseburg und Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (WEV), Großpösna) geschlossen. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit können neue Lösungsansätze für die Bearbeitung der Forschungsthemen sowie für die Entwicklung der beteiligten sächsischen Unternehmen generiert werden. Neben den Kooperationsvereinbarungen mit den genannten regionalen Partnern sind weitere sächsische Unternehmen an dem Forschungsvorhaben interessiert. So bekunden die AEL Apparatebau GmbH aus Leisnig und die WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH ihr Interesse am Forschungsvorhaben. Dieses Interesse bezieht sich speziell auf die Anwendungsmöglichkeiten von Wärmeübertragungstechnologien in Wärmespeichern für dezentrale Energieversorgungsanlagen. Die Interessensbekundungen liegen in Form von LOI (Letter Of Intent) vor.

Jegliche Ergebnisse des Forschungsvorhabens liegen diskriminierungsfrei allen interessierten Wirtschaftsakteuren vor. Über die Online-Medien und Veröffentlichungen wird über die vorliegenden Informationen berichtet.

## Literaturverzeichnis

- [1] KEYENCE CORPORATION. Chapter 2: Flow Meter Types & Principles – Karman Vortex Flow Meter. <https://www.keyence.com/ss/products/process/flowknowledge/types/karuman.jsp>, abgerufen am 22.02.2021
- [2] DEACADEMIC.COM. Prandtl'sches Staurohr. <https://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1128005>, abgerufen am 22.02.2021
- [3] VDI/VDE- RICHTLINIE 2640: Netzmessung in Strömungsquerschnitten. Blatt 1: Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen. Juni 1993
- [4] VDI/VDE- RICHTLINIE 2640: Netzmessung in Strömungsquerschnitten. Blatt 3: Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring-, oder Rechteckquerschnitt. November 1983
- [5] 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
- [6] 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](http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/IPM_Abschlussbericht_TCV-GESAMT_final.pdf)
- [7] HOFMEISTER, M.: R&I-Schema X5, MFC GmbH, Dresden, 2021
- [8] THRÄN, D. / PFEIFFER, D.: Methodenhandbuch, Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte, Methoden zur Bestimmung von Technologiekennwerten, Gesteungskosten und Klimagaseffekten, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 4, DBFZ Leipzig, 2013, ISSN 2192-1806
- [9] VDI 4661: 2014-08 Energiekenngrößen - Grundlagen - Methodik (Energetic characteristics - Fundamentals - Methodology). Berlin: Beuth Verlag
- [10] 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
- [11] SCHNEIDER, R. / TITZE, E. / SÉNÉCHAL, U. / SALOMO, B. / GRUSLA, S. / POHL, R. / SCHNEIDER, M. / SYNOWZIK, S. / HAASER, F. / SILBERMANN, S. / MEINERT, J. / ZSCHUNKE, T.: Sachbericht - Thermochemisches Versuchsfeld III - (Thermodynamische und fluid-dynamische Optimierung einer Biomasse- Festbettvergasung mit BHKW), Zittau, 2019
- [12] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV) vom 31. Mai 2017 (BGBl I, 2017, Nr. 33, S. 1440-1467)
- [13] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002 (GMBI, 2002, Nr. 25-29, S. 511-605)
- [14] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl I, 2013, Nr. 25, S. 1274 -1311), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl I, S. 2771) geändert worden ist
- [15] SCHNEIDER, R. / GRUSLA, S.: Brennstoffvariation am Holzvergaser-BHKW des TCV, Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2019