



Institut für Prozeßtechnik,
Prozeßautomatisierung
und Meßtechnik

Fachgebiet Messtechnik / Prozessautomatisierung



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.

EFRE

Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



1. Zwischenbericht

THERMOCHEMISCHES VERSUCHSFELD III

Thermochemische und fluiddynamische Optimierung einer Biomasse-Festbettvergasung mit BHKW

Kurztitel: TCV III

Projektnummer: 100231464
(HS-intern 61007308)

Zuwendungsempfänger: Hochschule Zittau/Görlitz
Institut für Prozeßtechnik,
Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke

Autoren: Dipl.-Ing. (FH) Mareike Weidner
Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider
Dr.-Ing. Ulf Sénéchal
Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2015 – 28.02.2019

Berichtszeitraum/Datum: 01.12.2015 – 30.06.2016

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0 Seite 2 von 58
---------	--

Änderungen:

<i>Änderung</i>	<i>Datum</i>	<i>Status</i>
Erstellt	07.07.2016	Rev. 0
Änderungen AP 2	08.08.2016	Rev. 1
Änderungen AE3.1	26.08.2016	Rev. 2

Abstract:

Der vorliegende Zwischenbericht zum Vorhaben TCV III beinhaltet die Darstellung aller zwischen dem 01.12.2015 und dem 30.06.2016 durchgeführten Arbeiten.

Freigabe:

Autor(en)

Geprüft

Freigegeben

58 Seiten

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 3 von 58

Inhaltsverzeichnis:

Inhaltsverzeichnis:3

Abbildungsverzeichnis:4

Tabellenverzeichnis:5

1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse.....6

1.1 Zusammenfassung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse6

1.2 Darstellung nach Arbeitseinheiten.....6

2 Andere wesentliche Ereignisse55

3 Stand des Vorhabens56

4 Notwendige Änderungen der Zielsetzung56

5 Ergebnisse und Schutzrechte von dritter Seite57

6 Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte57

7 Anwendungen und geplante Verwertung der Projektergebnisse57

Literatur-/Quellenverzeichnis (ausgewählte)58

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 4 von 58

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Veranschaulichung des Modells einer Schüttung von Holzhackschnitzeln ..	19
Abbildung 2: Vergleich der simulierten und experimentell ermittelten Masseabnahme einer TGA	21
Abbildung 4: Temperatur über Reformertiefe (zeitlich konstant)	23
Abbildung 3: Anordnung der Volumenelemente bei räumlich eindimensionaler Simulation	22
Abbildung 5: Stoffmengenanteile in der Gasphase über Reformertiefe nach 300 s	23
Abbildung 6: Massenanteile im Feststoffe über Reformertiefe nach 300 s	24
Abbildung 7: Speicherrelevantes R&I-Fließschema der Holzvergaser-BHKW-Anlage	25
Abbildung 8: Benutzeroberfläche des Pufferspeicher-Simulations-Tools	28
Abbildung 9: Simulierte (blau) und gemessenes (rot) Temperatur-Zeit-Verhalten beim Beladen des Pufferspeichers bis zu einer Endtemperatur von 75 °C	29
Abbildung 10: Schwankungsbreiten des Produktgasvolumenstromes im stationären Bereich einer Messfahrt	31
Abbildung 11: Prinzipskizze eines möglichen Teilproduktgas-Speichers	32
Abbildung 12: Prinzipskizze eines möglichen Gaspuffer-Versuchsstandes	33
Abbildung 13: Prinzipskizze eines möglichen Gaskompressions-Versuchsstandes	33
Abbildung 14: Benutzeroberfläche des Gasspeicher-Simulation-Tools	34
Abbildung 15: Veranschaulichung der Pufferwirkung für eine Simulation (Aufbaus der Anlage nach Abbildung 12) blau ... eintretender (schwankender) PGVS, rot ... austretenden (deutlich gedämpfter) PGVS	35
Abbildung 16: Darstellung des Temperatur- und Druckverlauf für eine Simulation nach Parameter in Abbildung 12	35
Abbildung 1-1: Beziehungen zwischen Kohlenstoff-dominierten Parametern	45
Abbildung 1-2: Fließbild zur Analysenmethodik im Labor „Brennstoffanalytik“	48

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 5 von 58

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Übersicht einiger der erfassten Versuchsparameter bei den Versuchen zur katalytischen Vergasung	10
Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten mit KUP-HHS	13
Tabelle 3: Zusammenstellung von Art und Anzahl der während der MF aufgetretenen Störungen	14
Tabelle 4: Abschätzung des durch die Störungen zusätzlichen Betreiberaufwandes	14
Tabelle 5: Berücksichtigte Reaktionen im Modell	17
Tabelle 6: Bilanzierung des Schichten-Pufferspeichers im stationären Zustand.....	26
Tabelle 7: Schwankungsbreiten des Produktgasvolumenstromes und deren zeitliche Häufigkeit bei stationärem Betrieb der Anlage während der Messfahrt am 13.04.2016	30
Tabelle 1-1: relative Abweichungen der Auswertemethoden.....	38
Tabelle 1-2: Brennstoffspezifische Analysedaten von Reststoffen	39
Tabelle 1-3: Brennstoffspezifische Analysedaten von Filterstäuben	40
Tabelle 1-4: durchschnittliche absolute Abweichung (in Ma.-%) der Analysedaten von Reststoff und Filterstaub von ihrem Mittelwert.....	41
Tabelle 1-5: Reststoffproben von Anlagen im Feld im Vergleich zur Versuchsanlage des TCV 3	42
Tabelle 3-1: Soll-Ist-Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung	56

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 6 von 58

1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

1.1 Zusammenfassung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

In der Vorhabensbeschreibung des TCV III wurden zur Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete und Arbeitseinheiten Meilensteine zeitlich festgelegt. Nach 6 Monaten Projektbearbeitung und damit zum Ende des Berichtszeitraumes wurde Meilenstein 1 (M1) erreicht. Diesbezüglich liegen die Ergebnisse der ersten Stufe der Verfahrensentwicklung zur direkten katalytischen Vergasung vor. Außerdem wurde festgelegt, welche ersten konkreten Schritte zum Einsatz von stofflichen und thermischen Speichertechnologien und neuen messtechnischen Konzepten umgesetzt werden sollen. Darüber hinaus wurde eine detaillierte Analyse des derzeitigen Standes der vorhandenen Biomassevergasungsanlage vorgenommen. Dies beinhaltet eine Analyse und Überarbeitung der vorhandenen Anlagen- sowie Mess- und Regelungstechnik. Die festgestellten systeminternen Schwachstellen bilden die Voraussetzung zur Bearbeitung der AE1.2.

1.2 Darstellung nach Arbeitseinheiten

AP1 - Verfahrensentwicklung, Systemanalyse, Modellierung und Regelung

AE1.1 - Gesamtsystem- und Sensitivitätsanalyse, instationäres Verhalten und Katalyse

Im Rahmen des Berichtszeitraumes wurden zur detaillierten Analyse des derzeitigen Standes der Biomassevergasungsanlage 15 Versuchsfahrten durchgeführt. Bei 13 dieser Versuche wurden die Messdaten einer Auswertung zugeführt. Dies beinhaltete z.B. die Versuche zum Einsatz von KUP-HHS und die Versuche zur katalytischen Vergasung. Die restlichen Messfahrten dienten dem Test der vorhandenen bzw. neu installierten Mess- und Anlagentechnik.

Messtechnische Analyse des Gesamtsystems

Die gesamte Gasanalysetechnik des Versuchsfeldes (stationäre Produktgasanalyse, mobile Produktgasanalyse, mobile Abgasanalyse) wurde einer Wartung durch den jeweiligen

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 7 von 58

Hersteller unterzogen. Außerdem konnte eine mobile Analysetechnik zur Bestimmung des Wassergehaltes in den Prozessabgasen beschafft werden. Diese soll zukünftig sowohl im Motorabgas als auch in der Abluft des Biomassetrockners eingesetzt werden.

Als ein weiteres Ergebnis der messtechnischen Analyse des Gesamtsystems wurden die bisherigen Thermoelemente (Typ K; Messbereich bis 1.100 °C; Messunsicherheit $\pm 2,5$ K) zur Erfassung der Wassertemperaturen beim Vergaser-Kühlkreis durch neue Thermoelemente des Typs T ersetzt. Grund hierfür waren zum einen der in Bezug auf die Messaufgabe zu große Messbereich des verbauten Typ K und zum anderen die damit verbundene hohe Messunsicherheit. Da jedoch die Temperaturen des Kühlwassers im Betriebsfall nur maximal 85 °C erreichen und dabei i.d.R. Temperaturdifferenzen von ca. 5 K zwischen Ein- und Austritt auftreten, wurde der Einsatz geeigneterer Sensoren geprüft. Unter Beachtung der Messaufgabe und der Einbaumöglichkeiten wurden Thermoelemente des Typs T (Messbereich bis 125 °C; Messunsicherheit $\pm 0,5$ K) ausgewählt, installiert und in die Leittechnik integriert.

Um die reale Produktgastemperatur direkt am Reformeraustritt zu messen, wurde ein neuer Flansch inkl. Messstutzen in die Produktgasleitung integriert und ein geeignetes Thermoelement installiert. Die reale Reformeraustrittstemperatur des Produktgases war bisher nicht bekannt und konnte jetzt im stationären Betriebsfall mit ca. 830 °C erfasst werden. Diese Information war notwendig, um die Prozessbedingungen für die katalytischen Vergasungsversuche zu beschreiben. Darüber hinaus ist es nun möglich die Absenkung der Produktgastemperatur bei Einsatz des Prozesskatalysators zu erfassen (siehe Ausführungen im AE1.1 - Instationäres Verhalten und Katalyse).

Anlagentechnische Analyse des Gesamtsystems

Bisher war die Probenahme des Filterstaubes nach dem Gewebefilter nur bei Anlagenstillstand und somit nur nach der jeweiligen Messfahrt möglich. Um die Erfassung und Probenahme des Filterstaubes am Gewebefilteraustritt zu ermöglichen, wurde eine zusätzliche Feststoffschleuse vor dem Nachreformer integriert. Somit kann nun die Erfassung der anfallenden Filterstaubmasse, die entsprechende Probenahme und ein Anlagenbetrieb ohne Nachreformer gewährleistet werden.

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 8 von 58

Außerdem wurde eine Änderung der Abführung des Nachreformer-Verbrennungsabgases konzeptioniert. Die bisherige Zuführung des Abgases zum Vergasungsmittel vor dem Reformer wurde durch eine Zumischung des Abgases mit der Motorluft ersetzt. Dieser Umbau soll die Rückwirkungen auf den Vergasungsprozess durch die zyklische Zuführung des Nachreformerabgases verhindern und die bisherigen Störungen der stationären Betriebsweise sowie Leistungseinbußen vermeiden.

Des Weiteren wurde mit der Planung zum Umbau der Abgastrecke nach dem BHKW begonnen. Dies beinhaltet z.B. den Einbau eines zweiten Abgaskatalysators um das Ziel der weiteren Emissionsminderung hinsichtlich der Stickoxide zu erreichen.

Instationäres Verhalten und Katalyse

Am Versuchsstand der HSZG zur Biomassevergasung (Thermochemisches Versuchsfeld (TCV)) werden üblicherweise Nadelholz-Hackschnitzel (HHS) aus Stamm- und Waldrestholz gemäß G30/G50 nach ÖNORM M 7133 (Norm veraltet, gemäß P31S/P45S nach DIN EN ISO 17225-4) als Brennstoff eingesetzt. Mit dem Ziel die Vergasungsreaktionen zu beschleunigen und somit den thermochemischen Umsetzungsprozess zu verbessern, wurden über die Fa. GNS¹ zwei verschiedene Prozesskatalysatoren auf Basis karbonatischer bzw. sauerstoffhaltiger Verbindungen erworben. Im Rahmen der Messfahrten (MF) wurden die auftretenden Prozessänderungen bei Zumischung dieser Katalysatoren zu den HHS mit der vorhandenen Messtechnik erfasst und dargestellt, um anschließend diese mit den Referenzfahrten bei Verwendung des Standardbrennstoffes zu vergleichen. Dabei bezog sich die Auswertung ausschließlich auf den Vergasungsprozess und die entsprechenden Stoffströme (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Filterstaub), um anschließend die Wirkung des Katalysatoreinsatzes zu bewerten. Für die nachfolgende Auswertung wird die Mischung aus HHS und Katalysator mit KAT-HHS bezeichnet.

Das Holzvergaser-BHKW wurde während der gesamten Versuche mit identischen Anlageneinstellungen betrieben um die Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten. Hinsichtlich der Konditionierung der HHS wurden diese in der Trocknungsanlage bis auf einen Wassergehalt von ca. 7 bis 10 Ma.-% getrocknet (annähernd vergleichbar für alle

¹ <http://www.gns-halle.de>

Messfahrten) und außerdem die Feinanteilabtrennung nach dem Tagesbehälter blockiert, sodass alle HHS (Standard-HHS, KAT-HHS) ungesiebt dem Vergasungsprozess zugeführt wurden. Grobanteile wurden nicht entfernt.

Als Referenz wurden zu Beginn der jeweiligen MF Standard-HHS als Brennstoff eingesetzt. Für den Vergleich zwischen den Standard- und KAT-HHS wurde die jeweilige MF immer an einem Tag durchgeführt, sodass im Rahmen der MF im ersten Teil die Standard-HHS und im zweiten Teil die KAT-HHS eingesetzt wurden. Um eine Entmischung der HHS und des Katalysators zu verhindern, wurde die vorhandene Feinanteilabsiebung in der Hackschnitzelzufuhr blockiert und dies für alle MF beibehalten. Der zeitliche Bereich der Versuchsauswertung wurde erst nach dem Erreichen des jeweiligen stationären Zustandes ausgewählt und nahm bei allen MF zwei Stunden ein. Die Bestimmung des stationären Zustandes erfolgte durch die Temperatur des Vergasungsmittels direkt am Eintritt des Reformers. Nach Umstellung auf die Fahrweise mit Zugabe der Katalysatoren wurde ca. 2 bis 3 h abgewartet und dann die Versuchsauswertung wieder über zwei Stunden durchgeführt. Im Rahmen der zwei MF kamen zwei verschiedene Katalysatormaterialien (KAT1 und KAT2) zum Einsatz. Die Zugabeintensität der Katalysatoren betrug nach Absprache mit der Fa. GNS bei beiden MF 2 Ma.-% bezogen auf den Brennstoffinput. Hinsichtlich der Anlageneinstellungen wurde diese bei allen MF unverändert beibehalten. Die Mischung der getrockneten HHS und des Katalysators erfolgte manuell in Mischbehältern, die dann wieder dem Tagesbehälter zugegeben wurden. Die HHS wurden zuvor dem Tagesbehälter entnommen, abgewogen und die entsprechende Masse Katalysator wie beschrieben zugegeben. Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung der Produktgaszusammensetzung (CO, CO₂, H₂, CH₄, HC, O₂, H₂O) und des Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Filterstaubanfall, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Leistung, Störungen). Außerdem wurde während der ersten MF die PAK²-Beladung des Produktgases an drei verschiedenen Messstellen erfasst. Die Probenahmen und anschließende Analysen wurde durch die RWTH Aachen (Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER)) vorgenommen.

Darüber hinaus wurden Proben des eingesetzten Brennstoffes und des entsprechend anfallenden Filterstaubes genommen und im Labor hinsichtlich ihrer Zusammensetzung

² Polyzyklische aromatische Kohlenstoffe

etc. analysiert. Die Anlage wurde während der MF ohne Nachreformer betrieben, sodass nur der Filterstaub direkt aus dem Gewebefilter erfasst und analysiert wurde. Dies erfolgte über eine am Gewebefilteraustrag zusätzlich installierte Feststoffschleuse, die das standardmäßig verbaute System ersetzte und somit den Nachreformer überbrückte.

Hinsichtlich des Vergleiches der Produktgasqualität bei der Vergasung der Standard-HHS und der KAT-HHS konnten v.a. signifikante Unterschiede bei den höheren Kohlenwasserstoffverbindungen (Ethen bis Propan) und beim Wasserstoff festgestellt werden. Hier stiegen die Anteile um ca. 1,5 bzw. 1,7 Vol.-% und führten somit zu einer deutlichen Erhöhung des Produktgasheizwertes, da CO und CH₄ bei den Vergleichsmessfahrten keine signifikanten Änderungen ihres Volumenanteils aufwiesen. Der bei Einsatz der KAT-HHS deutlich gesunkene Wassergehalt im Produktgas wurde der chemischen Wirkung des Katalysators zugeschrieben. Nach Aussage des Herstellers katalysiert das Material auch die Wassergasreaktion, wodurch Wasser umgesetzt wird und der Wassergehalt im Produktgas entsprechend sinkt.

Tabelle 1: Übersicht einiger der erfassten Versuchsparameter bei den Versuchen zur katalytischen Vergasung

Fahrweise	Einheit	Messfahrten			
		Standard	KAT	Standard	KAT
Auswertungszeitraum	h	2,0	2,0	2,0	2,0
Brennstoffbedarf	kg/h	29,2	28,9	29,6	29,4
Produktgastemperatur Reformeraustritt	°C	823	762	814	764
PAK-Konzentration im Produktgas, Reformeraustritt	mg/m ³	140	111	k.A.	k.A.
Volumenstrom Vergasungsmittel Luft	m ³ /h (i.N.)	38,1	37,8	38,1	37,7
Volumenstrom Produktgas	m ³ /h (i.N.)	73,4	69,8	73,2	69,6
Heizwert Produktgas	MJ/m ³ (i.N.)	6,4	7,6	6,6	7,7
	MJ/kg	5,8	7,0	6,1	7,1
elektrische BHKW-Leistung	kW	31,1	32,0	31,9	32,3
Luftzahl		0,36	0,36	0,36	0,36

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, wurde allg. ein Brennstoffbedarf von ca. 28,6 bis 29,6 kg/h für den jeweiligen Auswertungszeitraum erfasst. Werden die MF Standard und KAT miteinander verglichen, ist erkennbar, dass tendenziell ein geringfügig geringerer Brennstoffbedarf bei KAT-Fahrweise auftrat. Durch die geringen Unterschiede muss der evtl. niedrigere Brennstoffbedarf durch längere Versuchsfahrten bestätigt bzw. nachgewiesen werden.

Die Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motoreintritt wurden ebenfalls erfasst. Dabei ist in Tabelle 1 ersichtlich, dass die Gastemperaturen bei KAT-Einsatz direkt nach dem Reformier ggü. Standard deutlich abfielen (um ca. 50 bis 60 K) und dieser Temperaturabfall sich bei den folgenden Messstellen bis hin zum Motor immer weiter abschwächte. Dies ist u.a. mit der Temperaturspeicherwirkung der Bauteile und sich verändernden Wärmeströmen zu erklären. Somit sollten bei nachfolgenden MF ein zeitlich längerer Betrieb der jeweiligen Versuchsphasen erreicht werden. Der Temperaturabfall des austretenden Gases aus dem Reformier ist mit der chemischen Wirkung des Katalysatormaterials zu erklären, wodurch endotherme Reaktionen verstärkt werden.

Wie zuvor beschrieben, führte die RWTH Aachen im Rahmen der ersten MF an drei verschiedenen Messstellen jeweils zwei Probenahmen des Produktgases durch, die zeitgleich erfolgten und analysierte diese im Labor auf die 16 PAK nach EPA³. Dabei waren die Massenkonzentrationen der PAK direkt nach dem Reformier am höchsten und im gereinigten Produktgas vor dem Motor nur noch marginal. Den größten Anteil im Produktgas direkt nach dem Reformier nahm Naphthalin ein. Im Vergleich der Fahrweise mit Standard- und KAT-HHS ist eine Reduzierung der PAK-Konzentration beim Einsatz der KAT-HHS am Reformeraustritt um absolut ca. 29 mg/m³ bzw. relativ ca. 20 % festzustellen. Im gereinigten Produktgas konnten keine Unterschiede hinsichtlich der PAK-Konzentrationen detektiert werden.

Die Volumenströme des Produktgases und des zugeführten Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Im Vergleich zwischen Standard- und KAT-HHS im Rahmen der ersten MF sanken nach Tabelle 1 die Volumenströme des Produktgases um absolut 3,6 m³/h (i.N.) (relativ 4,6 %) und der Luft um 0,3 m³/h (i.N.) (relativ 0,8 %). Der Vergleich der Daten aus der zweiten MF ergab ein Absinken der Volumenströme des Produktgases um absolut 3,6 m³/h (i.N.) (relativ 4,9 %) und der Luft um 0,4 m³/h (i.N.) (relativ 1,1 %).

Durch die Erfassung der Zusammensetzung und des Volumenstromes des Produktgases konnte der chemische Produktgasenergiestrom berechnet und für die jeweiligen Versuchsphasen miteinander verglichen werden. Da der Heizwert des Produktgases beim Einsatz der KAT-HHS ggü. dem Einsatz der Standard-HHS stieg, ergab sich ein deutlich

³ US-Environmental Protection Agency

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 12 von 58

höherer chemischer Energiestrom. Die diesbezügliche Steigerung betrug absolut ca. 16 bis 17 kW (relativ ca. 12 bis 13 %). Im Vergleich der elektrischen BHKW-Leistungen stieg diese beim Einsatz der KAT-HHS absolut um 0,4 bis 0,9 kW.

Anhand der erfassten Zusammensetzung und Volumenströme des Vergasungsmittels Luft und des Brennstoffes wurde die Luftzahl der Vergasung berechnet. Dabei war kein Unterschied der Luftzahl im Vergleich Standard- und KAT-HHS festzustellen. Sowohl bei beiden MF als auch bei beiden Versuchsphasen lag dieser bei 0,36.

Die Vergasungsversuche mit der Mischung aus Standard-HHS und den zwei Katalysatoren haben im Vergleich mit dem Einsatz von ausschließlich Standard-HHS eine positive Wirkung hinsichtlich des Brennstoffumsatzes zum Produktgas bestätigt. Während der Vergasungsversuche mit Zumischung der Katalysatoren konnten signifikante Unterschiede der Stoff- und Energieströme im Vergleich zur Vergasung der Standard-HHS festgestellt werden. Die wesentlichen Auswirkungen des Katalysatoreinsatzes bei identischen Anlageneinstellungen waren die Steigerung des Produktgasheizwertes und der Anstieg des Ascheanteils im Filterstaub. Hinsichtlich des Brennstoffbedarfs ergab sich tendenziell ein geringfügig geringerer Brennstoffbedarf bei KAT-Fahrweise, der jedoch durch weitere, möglichst längere Versuche zu belegen ist. Dabei wurden Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Katalysatoren festgestellt. So waren die aufgeführten Auswirkungen bei Einsatz des KAT1 deutlicher ausgeprägt als bei KAT2.

Hinweis: Die zuvor dargestellten Ergebnisse stellen eine Zusammenfassung eines ausführlichen internen Forschungsberichtes zur Beschreibung von Durchführung und Auswertung der Versuche dar. Dieser Bericht kann bei Bedarf der SAB vorgelegt werden.

Vergasung von Holzhackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Da die energetische Nutzung von HHS aus Stamm- und Waldrestholz zukünftig nicht mehr präferiert werden könnte, ist diesbezüglich die Verwendung von HHS aus Agrarholz eine Alternative. Daher wurde auch unter dem Aspekt der Brennstoffbanderweiterung bei der Holzvergasung der umfangreiche Test von Holzhackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen (KUP-HHS) als Brennstoff des Thermochemischen Versuchsfeldes vorgenommen. Dieser diente vordergründig dazu, im Vergleich zu den Standard-HHS eventuelle Änderungen des

Vergasungsprozesses, des Anlagenverhaltens und entsprechend des Betreiberaufwandes zu detektieren.

Die KUP-HHS wurden in diversen Messkampagnen im TCV der HSZG als Brennstoff eingesetzt. Dabei wurden alle relevanten Versuchsparameter aufgenommen und das Anlagenverhalten hinsichtlich des Betreiberaufwandes dokumentiert. Zuvor erfolgte die finale Trocknung der KUP-HHS in der Biomassetrocknungsanlage des TCV. Auch hierbei wurde das Anlagenverhalten und die Störanfälligkeit in Verbindung mit dem Transport des Trocknungsgutes beobachtet und dokumentiert. In Summe wurden in den sieben Messfahrten knapp 900 kg KUP-HHS thermochemisch umgesetzt.

Zur Übersicht sind in folgender Tabelle 2 die durchgeführten Versuchsfahrten mit den KUP-HHS dargestellt. Vor allem die ersten MF dienten als Test und als Grundlage zu Veränderungen der Anlageneinstellungen.

Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten mit KUP-HHS

Datum	Einheit	Messfahrten						
		19.2.16	22.2.16	26.2.16	9.3.16	16.3.16	24.3.16	8.4.16
Versuchsdauer Gesamt	h	5,33	5,50	5,82	6,18	7,88	7,58	4,78
Störungsintensität	pro h	1,44	0,36	0,52	1,13	0,38	1,45	0,63
Versuchsdauer Auswertung	h	2,08	3,00	3,15	5,38	6,47	5,81	2,90
Anlagenleistung elektr.	kW	32,34	32,63	32,91	33,43	33,53	32,61	31,53
Anlagenleistung therm.	kW	69,77	67,17	71,07	70,22	69,77	67,02	70,80
Durchsatz KUP-HHS im Auswertungszeitraum	kg	ca. 57	ca. 84	89,03	158,86	192,12	190,44	94,93
	kg/h	ca. 27,5	ca. 28	28,26	29,53	29,69	32,78	32,73
Reststoffanfall im Auswertungszeitraum (außer MF 16.3.16)	g	k.A.	454,8	130,5	1421,1	2402,6	2535,2	2398,4
	g/h	k.A.	151,60	41,40	264,14	304,90	436,35	827,03
	Ma.-%	k.A.	0,58	0,15	0,89	1,03	1,33	2,53

Im Folgenden werden die während der Messfahrten aufgetretenen Störungen dargestellt und zusätzlich im internen Forschungsbericht deren Beseitigung beschrieben. Dies bezieht sich nur auf den Holzvergaser, da sowohl beim Betrieb des Biomassetrockners als auch hinsichtlich des BHKW keine Störungen auftraten. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die aufgetretenen Störungen geordnet nach Datum der MF sowohl hinsichtlich Art und Anzahl als auch als Summenwert dargestellt.

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 14 von 58

Tabelle 3: Zusammenstellung von Art und Anzahl der während der MF aufgetretenen Störungen

Störungsart	MF 19.2.16	MF 22.2.16	MF 26.2.16	MF 9.3.16	MF 16.3.16	MF 24.3.16	MF 8.4.16	Summe
Verblockung Waagentrichter	1x					1x		2x
Überfüllungsreduktion Vergaser	2x		1x	4x		1x	1x	9x
Motorschutz Materialzuführung		2x	2x	1x	3x	3x	2x	13x
Schleusenfüllstand zu niedrig				2x		3x		5x
Reformer leer						1x		1x

Üblicherweise wird für den Betrieb eines Holzvergaser-BHKW eine ungefähre Angabe von ca. 0,5 h/d als Betreiberaufwand angegeben (Spanner Re² GmbH 2016). Werden jedoch die aufgetretenen Störungen innerhalb der MF bei Verwendung der KUP-HHS und der damit in Verbindung stehende zusätzliche Betreiberaufwand berücksichtigt, ergibt sich ein abgeschätzter Gesamtaufwand von 7,1 h/d (Angabe Normalbetrieb 0,5 h/d + Abschätzung zusätzlicher Aufwand 6,6 h/d). Dabei sind nur die manuell zu behebenden Störungen wie „Motorschutz Materialzuführung“ oder „Schleusenfüllstand zu niedrig“ berücksichtigt. Für diese wurde, wie zuvor erläutert und in Tabelle 4 dargestellt, ein Zeitaufwand für die Störungsbehebung abgeschätzt und dieser sowohl auf die Versuchsdauer als auch auf den Dauerbetrieb bezogen. Daraus ergibt sich ein zusätzlicher Betreiberaufwand für die jeweilige Messfahrt mit den KUP-HHS.

Tabelle 4: Abschätzung des durch die Störungen zusätzlichen Betreiberaufwandes

Datum	Einheit	Messfahrten							MW
		19.2.16 *	22.2.16	26.2.16	9.3.16	16.3.16	24.3.16	8.4.16	
Versuchsdauer Gesamt	h	5,33	5,50	5,82	6,18	7,88	7,58	4,78	
Störung „Motorschutz Materialzuführung“ á 45 min	Anzahl		2x	2x	1x	3x	3x	2x	
Störung „Schleusenfüllstand zu niedrig“ á 8 min	Anzahl	2x			2x		3x		
zusätzlicher Betreiberaufwand	h/MF	0,3*	1,5	1,5	1,0	2,3	2,7	1,5	1,8
	h/d	1,4*	6,6	6,2	3,9	7,0	8,5	7,5	6,6

* keine Berücksichtigung des zusätzlichen Betreiberaufwandes, da Testfahrt

Nach dem Einsatz von knapp 900 kg KUP-HHS im Rahmen der Messfahrten konnte deren prinzipielle Eignung als Brennstoff für das Holzvergaser-BHKW im TCV nachgewiesen

werden. Der Vergasungsprozess, dementsprechend die Produktgaszusammensetzung und darauffolgend auch die BHKW-Leistung waren vergleichbar mit dem Anlagenbetrieb bei Verwendung von Standard-HHS.

Der Brennstoffbedarf kann aufgrund der Vielzahl an Störungen in der Hackschnitzelzufuhr nur eingeschränkt bewertet werden. Tendenziell lässt sich schlussfolgern, dass der Bedarf an KUP-HHS im Vergleich zur Vergasung von Standard-HHS bei gleicher Anlagenleistung absolut um etwa 1 bis 2 kg/h größer ist. Durch die große Spannweite der erfassten Reststoffmenge bei den jeweiligen MF ist ein Vergleich mit der Standardbetriebsweise nicht möglich.

Hinsichtlich der Brennstofflogistik sind vor allem in der Vergaserzuführung der Hackschnitzel wiederholt Störungen aufgetreten, die nur durch manuellen Einsatz behoben werden konnten. Dies resultiert in einem intensiven Betreiberaufwand von ca. 7 h/d ggü. dem vom Hersteller angegebenen Betreiberaufwand von etwa 0,5 h/d. Daher müssen Anlagenanpassungen im Hinblick auf die Verwendung von KUP-HHS durchgeführt werden. Dies betrifft vor allem diverse Engstellen in der Hackschnitzelzufuhr (Übergang Hackschnitzelschnecke zu Schleusenschacht). Hier traten die meisten Störungen hinsichtlich Verblockungen bzw. Verstopfungen, aufgrund der Inhomogenität der KUP-HHS und vor allem durch die enthaltenen Grobanteile, auf. Mit einer geeigneten Hackschnitzelzufuhr (z.B. eine ausschließlich vertikaler HHS-Transport) oder mit einer entsprechenden Konditionierung des Brennstoffs (Abtrennen von Grobanteilen und Feinanteil) können diese Störungen verhindert werden.

Die Anlagenanpassungen in der Vergasersteuerung (z.B. Hackschnitzelzufuhrintensität, Füllstandseinstellung Reformer, Einstellung Seitenkanalverdichter) sind zwingend erforderlich, müssen jedoch immer bei sich verändernden Brennstoffeigenschaften vorgenommen werden und führen somit nicht automatisch zu einer nachteiligen Bewertung der KUP-HHS.

Wie zuvor erwähnt kann abschließend die Eignung von KUP-HHS als Brennstoff für das Holzvergaser-BHKW nachgewiesen werden. Dafür notwendig sind jedoch eine geometrische Anpassung der Hackschnitzelzufuhr oder/und eine geeignete Konditionierung des Brennstoffes vor allem bezüglich der Grobanteile.

Hinweis: Die zuvor dargestellten Ergebnisse stellen eine Zusammenfassung eines ausführlichen internen Forschungsberichtes zur Beschreibung von Durchführung und Auswertung der Versuche dar. Dieser Bericht kann bei Bedarf der SAB vorgelegt werden.

AE1.2 - Konzeption und Integration Messtechnik

Konzept zum Austausch der vorhandenen Volumenstrommessung

Zum Einsatz einer berührungslosen Messung der Geschwindigkeitsverteilung in der Produktgasleitung mit Hilfe eines Laser-Doppler-Anemometers (LDA) wurden Voruntersuchungen zu Eigenschaften des Produktgases durchgeführt und durch Einbau eines optischen Fensters die Verschmutzungsneigung mit Hilfe von Testszenerarien (An- und Abfahrvorgang, stationärer Betriebsfall) überprüft. Dabei konnte keine störende Verschmutzung der Sichtscheibe festgestellt werden, die einen Einsatz des LDA erschweren würde. Um die vorhandene Volumenstromerfassung weiterhin verwenden zu können, wurde ein Konzept für eine geeignete Messstrecke zum Einsatz des LDA an alternativer Stelle erarbeitet und eine Durchfluss-Schauglas-Armatur beschafft. Die ausgewählte Messstelle soll so in die bestehende Produktgasleitung integriert werden, dass sowohl ein einfacher Ausbau dieser (zu Reinigungszwecken u.ä.) als auch ein Betrieb ohne die Messstrecke möglich ist. Dies erfordert das Anschweißen neuer zusätzlicher Flansche und das Abstützen der Produktgasleitung im Bereich der Messstreckenapparatur. Die entsprechenden Installationen sind für das zweite Halbjahr 2016 geplant.

Die öffentliche Ausschreibung zur Beschaffung eines LDA wurde vorbereitet (Leistungsbeschreibung, Wertungsmatrix) und schließlich am 09.06.2016 vorgenommen. Die Vergabe ist demnach für den Zeitraum August 2016 definiert.

Konzept für Online-Messung des Brennstoff-Wassergehaltes

In Bezug auf diese Fragestellung wurde eine Recherche zur Eignung der verschiedenen Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes in Feststoffen durchgeführt. Als Ergebnis dieser wurden die kapazitiven und Infrarotreflektionsverfahren favorisiert. Diese Recherche wird weitergeführt und in diesem Zusammenhang auch die Eignung des schon vorhandenen kapazitiven Füllstandssensor in der Brennstoffschleuse untersucht.

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 17 von 58

AE1.3 - Gesamtsystemische instationäre Simulation und Verfahrensentwicklung

Anders als in der ursprünglichen Projektplanung vorgesehen, wurde der Beginn der Arbeiten zur Modellierung und Simulation des gesamten Systems auf den Projektstart vorgezogen. Grund dafür war, dass in den ersten Projektmonaten viele Messfahrten mit hohem Personalaufwand geplant waren, die so durch die Umbauten der Anlage nicht realisierbar waren und dadurch Arbeitskapazitäten frei wurden.

Um das gesamte System in seinem zeitlichen Verhalten simulieren zu können, wurde mit der Entwicklung eines räumlich null- und eindimensionalen Modells für den Reformer begonnen. Abweichend von der ursprünglichen Planung kommt dabei in der jetzigen Arbeitsphase die Software OpenModelica zum Einsatz. Begründung dafür ist die einfache und flexible Beschreibung transienter physikalischer Modelle und der automatischen Umwandlung und Lösung des sich daraus ergebenden mathematischen Problems.

Das Modell wurde von Grund auf neu entwickelt und basiert hinsichtlich der stattfinden Reaktionen auf der Arbeit [1]. Es werden drei nichtgasförmige Stoffe (trockenes Holz, Wasserflüssigkeit und Koks (C)) und 8 Gase (CO₂, CO, CH₄, O₂, H₂, H₂O, N₂, Teer) verwendet. In Tabelle 5 sind die verwendeten Reaktionen aufgelistet.

Tabelle 5: Berücksichtigte Reaktionen im Modell

Nr.	Beschreibung	Reaktionsgleichung
1	Trocknung	Wasserflüssigkeit → H ₂ O
2	Pyrolyse	tr. Holz → 4 C+0.25 CO + 0.25 CO ₂ + 1.25 H ₂ O +0.5 CH ₄ +Teer
3	Teer crackung	Teer → 0.25 CO + 0.25 CO ₂ + 1.25 H ₂ O+ 0.5 CH ₄
4	heterogene Oxidation	C + O ₂ → CO ₂
5	heterogene	C + CO ₂ ↔ 2 CO
6	Gleichgewichte	C + H ₂ O ↔ CO + H ₂
7	homogene Oxidationen	CO + 0.5 O ₂ → CO ₂
8		2 H ₂ + O ₂ → 2 H ₂ O
9		CH ₄ + 2 O ₂ → CO ₂ + 2 H ₂ O

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0 Seite 18 von 58
---------	---

10	homogene	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
11	Gleichgewichte	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$

Die Modellierung der Prozesse im Reformier erfolgte unter besonderer Beachtung der thermischen Zustandsgleichung der festen Stoffe, da diese porös sind und dadurch verschiedene Möglichkeiten der Dichteformulierung existieren. Nach [2] lassen sich für ein System wie in

Abbildung 1-1 dargestellt zwei Dichten formulieren: die absolute Dichte (auch Reindichte oder Skelettdichte genannt)

$$\tilde{\rho} = \frac{\text{Masse Feststoff}}{\text{Volumen Feststoff ohne Poren}} \quad (1)$$

sowie die scheinbare Dichte eines porösen Stoffes

$$\rho = \frac{\text{Masse Feststoff}}{\text{Volumen Feststoff mit Poren}} \quad (2)$$

. Zusätzlich zur Dichte wird ein Parameter zur Definition des freien Gasvolumens des porösen Feststoffes und, im Falle einer Schüttung poröser Körper, ein Parameter zur Definition des freien Gasvolumens der Schüttung oder des gesamten freien Gasvolumens (inklusive der Poren) benötigt. Üblicherweise sind diese Parameter die Porosität

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen Poren}}{\text{Volumen Feststoff mit Poren}} = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Poren}} + V_{\text{Holzfasern}}} \quad (3)$$

und der Leerraumanteil (engl. *void fraction* „ vf' “) der Schüttung

$$\begin{aligned} v_{f_{\text{Schüttung}}} &= \frac{\text{freies Volumen zwischen porösen Körpern}}{\text{Volumen Schüttung}} \\ &= \frac{V_{\text{Gas}}}{V_{\text{Gas}} + V_{\text{Poren}} + V_{\text{Holzfasern}}} \end{aligned} \quad (4)$$

oder des gesamten Leerraumanteils

$$v_{f_{gesamt}} = \frac{\text{Porenvolumen} + \text{freies Volumen zwischen porösen Körpern}}{\text{Volumen Schüttung}} \quad (5)$$

$$= \frac{V_{Gas} + V_{Poren}}{V_{Gas} + V_{Poren} + V_{Holzfasern}}$$

. Für die Massenanteile in dem porösen Stoff kann die Formulierung

$$y_{s,i} = \frac{\text{Masse Komponente i}}{\text{Masse Feststoff ohne Poren}} \quad (6)$$

verwendet werden.

Ausgehend von diesen Definitionen und der Annahme von konstanten Reindichten können die absolute und scheinbare Dichte des Feststoffes bestehend aus N festen Komponenten nach Gleichung (7) berechnet werden.

$$\tilde{\rho}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{y_{s,i}}{\tilde{\rho}_i}} \quad \rho_s = (1 - v_{f_{gesamt}}) \cdot \tilde{\rho}_s \quad (7)$$

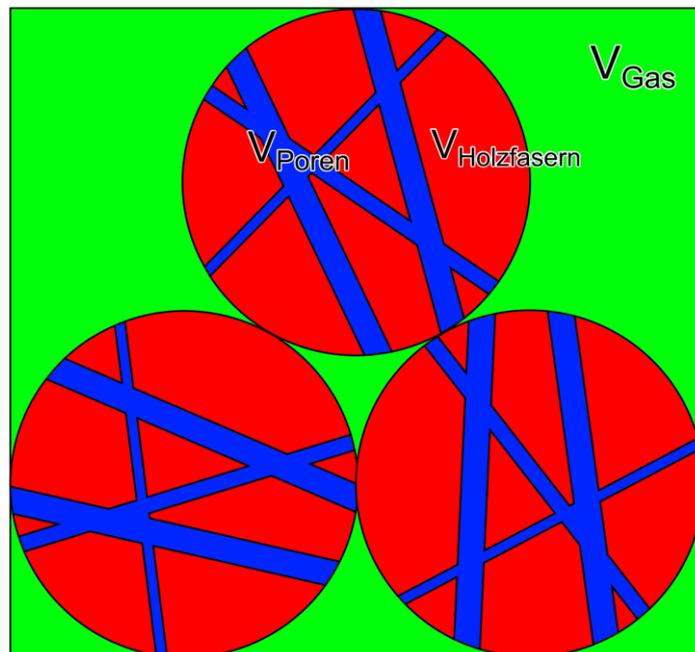


Abbildung 1-1: Veranschaulichung des Modells einer Schüttung von Holzhackschnitzeln

Im bisher verwendeten Modell kommen für die Feststoffe die absoluten Dichten $\tilde{\rho}_{Holzfasern} = 1480 \frac{kg}{m^3}$, $\tilde{\rho}_{Koks} = 1957 \frac{kg}{m^3}$ und für das flüssige Wasser $\tilde{\rho}_{Wasser} = 1000 \frac{kg}{m^3}$ zum Einsatz. Für die scheinbare Dichte von Kiefernholz wird bei einem Wassergehalt von ca. 12-15 Ma.-% ein Wert von $\rho = 520 \frac{kg}{m^3}$ angegeben, so dass sich eine Porosität von ca. $\varepsilon = 0,625$ ergibt. Daraus, zusammen mit der experimentell bestimmten Schüttdichte mit Werten von ca. $\rho_{Schüttung} = 161 \frac{kg}{m^3}$, lassen sich der Leerraumanteil der Schüttung mit $v_{f_{Schüttung}} = 0,692$ und der Gesamt-Leerraumanteil mit $v_{f_{gesamt}} = 0,885$ bestimmen.

Die zu lösenden Bilanzgleichungen für die Gesamtmasse, die Gasmasse sowie die Feststoffmasse sind in den Gleichungen (8), (9) und (10) angegeben.

$$\frac{d(\rho)}{dt} = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{V} \quad (8)$$

$$\frac{d(\rho_g \cdot y_{g,i})}{dt} = M_i \cdot \dot{\omega}_i + \frac{\dot{m}_{g,in,i} - \dot{m}_{g,out,i}}{V} \quad (9)$$

$$\frac{d(\rho_s \cdot y_{s,i})}{dt} = M_i \cdot \dot{\omega}_i + \frac{\dot{m}_{s,in,i} - \dot{m}_{s,out,i}}{V} \quad (10)$$

Die molaren Reaktionsraten $\dot{\omega}_i$ sind entsprechend den Angaben von [1] modelliert worden. Für die Dichte der Gasphase kommt die thermische Zustandsgleichung idealer Gase zum Einsatz. Die energetische Zustandsgleichung basiert auf cp-Polynomen mit Zusatzthermen für die Bildungsenthalpie und Bildungsentropie (NASA-Format) und wurde den Daten des Reaktionsmechanismus [3] entnommen und ermöglicht die Berechnung der Gleichgewichtskonstanten für die Gleichgewichtsreaktionen der Tabelle 5.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde aus einer Kombination der Wärmeleitfähigkeiten der Gas- und Feststoffe berechnet. Für den Wärmeübergang zwischen gasförmiger und fester Phase kam ein Nußelt-Ansatz für durchströmte Schüttungen zur Anwendung. Die Massenströme der Gasphase $\dot{m}_{g,in,i}$ und $\dot{m}_{g,out,i}$ werden aus der Druckdifferenz zwischen zwei benachbarten Volumenelementen (bzw. zwischen Druck und Auslassdruck im Falle des stromabwärts letzten Volumenelementes) berechnet. Die Konstante wurde dabei so groß

gewählt, dass keine nennenswerten Überdrücke entstehen und sich dadurch ein annähernd isobares Verhalten einstellt.

Die Feststoff-Massenströme $\dot{m}_{s,in,i}$ und $\dot{m}_{s,out,i}$ werden im Falle einer räumlich nulldimensionalen Simulation vorgegeben oder, bei räumlich eindimensionalen Simulationen, ergeben sich indirekt aus der Annahme eines zeitlich konstanten Gesamt-Leerraumanteils ($\frac{d(vf_{gesamt})}{dt} = 0$). Durch diesen Ansatz wird das Nachrutschen von Feststoff simuliert. Das stromabwärts letzte Volumenelement weist immer einen Feststoff-Massenstrom von null auf.

Wie schon erwähnt, sind mit dem erstellten Modell des Reformers zwei Simulationen möglich: räumlich nulldimensional sowie räumlich eindimensional. Bei der nulldimensionalen Simulation gibt es nur ein Volumenelement und es kann zum direkten Vergleich mit Experimenten der thermogravimetrischen Analyse (TGA) genutzt werden, bei der die Masseabnahme einer kleinen Probemasse Holz (ca. 0,5 g) unter Stickstoffatmosphäre bei kontinuierlicher Erwärmung ermittelt wird. Durch Optimierungsrechnungen können auch Modellparameter ermittelt werden, die eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von TGA-Experimenten und der Simulation darstellen. In Abbildung 1-2 ist das Ergebnis einer solchen Optimierungsrechnung im Vergleich zum TGA-Experiment [4] dargestellt.

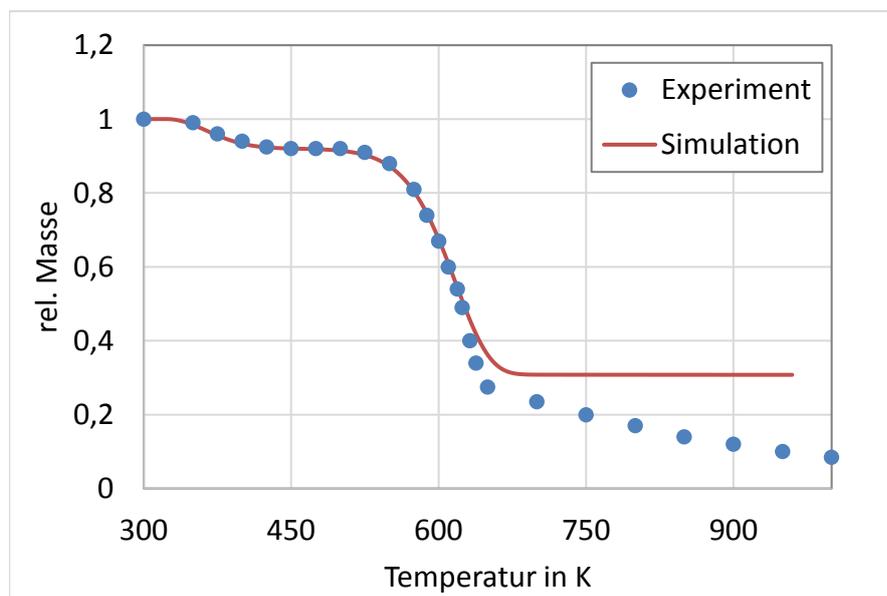


Abbildung 1-2: Vergleich der simulierten und experimentell ermittelten Masseabnahme einer TGA

Deutlich sichtbar wird, dass die Trocknung und zumindest der erste Schritt der Pyrolyse sehr gut mit Hilfe der Simulation wiedergegeben werden können. Das bisher verwendete Modell nach [1] enthält allerdings eine ein-Schritt-Umsetzung von festem Holz zur gasförmigen Bestandteilen und fixem Koks und kann den experimentell beobachteten zweiten Schritt der Pyrolyse prinzipiell nicht abbilden. Daher ergibt sich der Unterschied zwischen Experiment und Simulation ab ca. 600 K. Ein weiterer Unterschied besteht in dem Verhältnis von Holz zu fixem Koks, welches im Modell nach [1] bei 1:0,3 liegt, in den bisher ausgewerteten Literaturangaben zu TGA-Experimenten bei 1:0,1. Die relativen Massen bei Temperaturen von 950 K und darüber hinaus laufen in Experiment und Simulation nicht auf den gleichen Endwert hinaus.

Im Fall der räumlich eindimensionalen Simulationen werden eine bestimmte Anzahl von Volumenelementen übereinander angeordnet und miteinander gekoppelt (siehe Abbildung 1-3). Ergebnis ist dann eine Verteilung bzw. das Profil aller Variablen zu jedem Zeitpunkt ausgehend von den zeitlichen und räumlichen Startwerten. Bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wurde von einer Füllung des Reaktors mit frischem Holz und Luft ausgegangen und 50 Volumenelemente verwendet. Da nach momentanem Arbeitsstand keine Energiebilanzgleichung gelöst wird, wurde das in Abbildung 1-5 gezeigte Temperaturprofil vorgegeben, das auf eigenen experimentellen Daten beruht.

Nach ca. 200 Sekunden nähert sich Simulation dem stationären Zustand und im weiteren Verlauf der Berechnung ändern sich die Profile nicht mehr. Zwecks weiter Abschätzung der zeitlichen Abhängigkeit wurden die Simulationen bis 300 s fortgeführt.

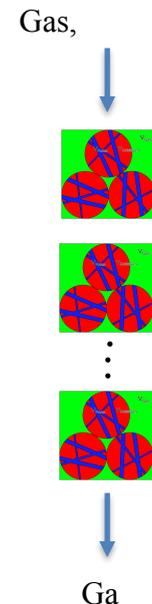


Abbildung 1-3: Anordnung der Volumenelemente bei räumlich eindimensionaler Simulation

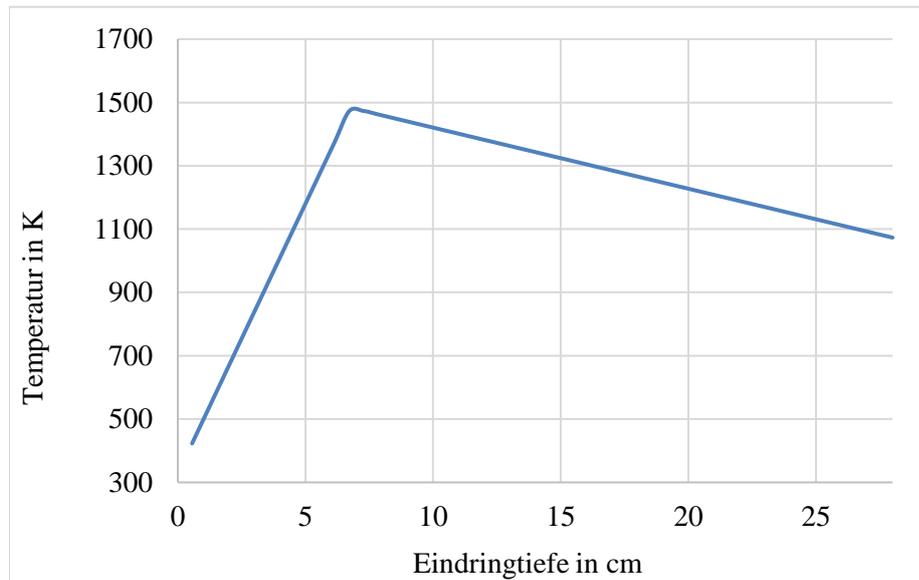


Abbildung 1-5: Temperatur über Reformertiefe (zeitlich konstant)

Anhand der in Abbildung 1-4 dargestellten Ergebnisse der Simulationen wird erkennbar, dass der Anteil Wasser in der Gasphase gleich in den ersten Volumenelementen nach dem Einlass zu- und der Sauerstoffanteil abnimmt. Ebenfalls wird deutlich, dass sich für Wasser und Kohlendioxid ein Maximum ausbildet, während die Anteile von Methan, Kohlenmonoxid und Wasserstoff stetig ansteigen.

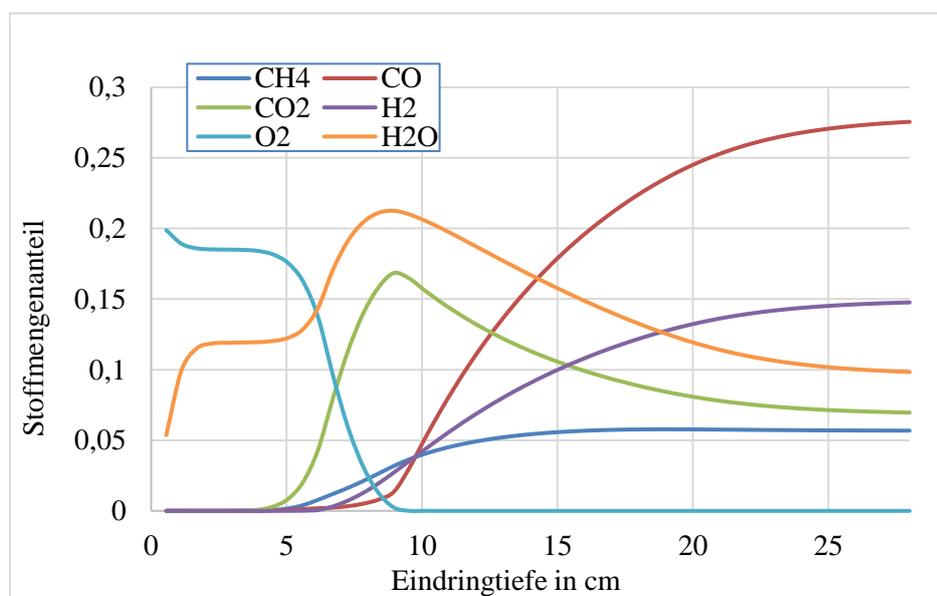


Abbildung 1-4: Stoffmengenanteile in der Gasphase über Reformertiefe nach 300 s

Sichtbar wird, dass alle Anteile am Ende des Reformers keine oder geringe räumliche Gradienten aufweisen, was auf den Abschluss der Reaktionen bzw. das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes schließen lässt. Es sei darauf hingewiesen, dass sich dieser Gleichgewichtszustand von einem rein thermodynamischen Gleichgewicht unterscheidet, da hier die Stoffströme berücksichtigt werden.

Die Betrachtung der Anteile in der Feststoffphase (siehe Abbildung 1-6) zeigt einen erwarteten Verlauf, der kontinuierlichen Abnahme der Masseanteile von flüssigem Wasser und Holzfasern während sich der Anteil Koks erhöht. Die sehr schnelle Abnahme des Wasseranteils lässt auf eine sehr schnelle Trocknung schließen und scheint durch die Temperaturvorgabe bedingt.

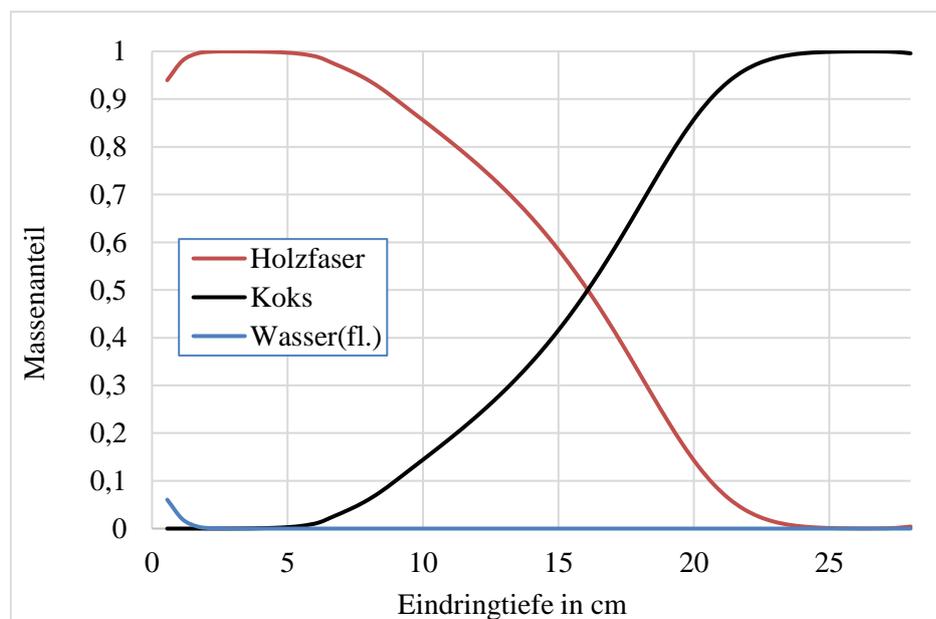


Abbildung 1-6: Massenanteile im Feststoffe über Reformertiefe nach 300 s

AP2 - Speichertechnologien

AE2.1 – Erstellen der Anforderungsprofile für thermische und stoffliche Speicher

Der Verantwortliche der in der Projektgruppe TCVIII eingerichteten Arbeitsgruppe Speicher hat seine Arbeit mit Beginn des Beschäftigungsverhältnisses am 01.03.2016 aufgenommen und damit die Bearbeitung von AP2 begonnen. Aus diesem Grund bezieht

sich der in diesem Abschnitt erläuterte Arbeitsstand auf den Zeitraum vom 01.03. bis 30.06.2016.

Thermische Speicher

Im Berichtszeitraum innerhalb der ersten Phase des AP2, welche sich mit der Analyse der Holzvergaser-BHKW-Anlage hinsichtlich des Einsatzes thermischer Speicher beschäftigt, konnten wichtige Daten über zeitliche Verläufe und Quantität der Abwärmepotenziale bzw. Wärmebedarfe gesammelt werden.

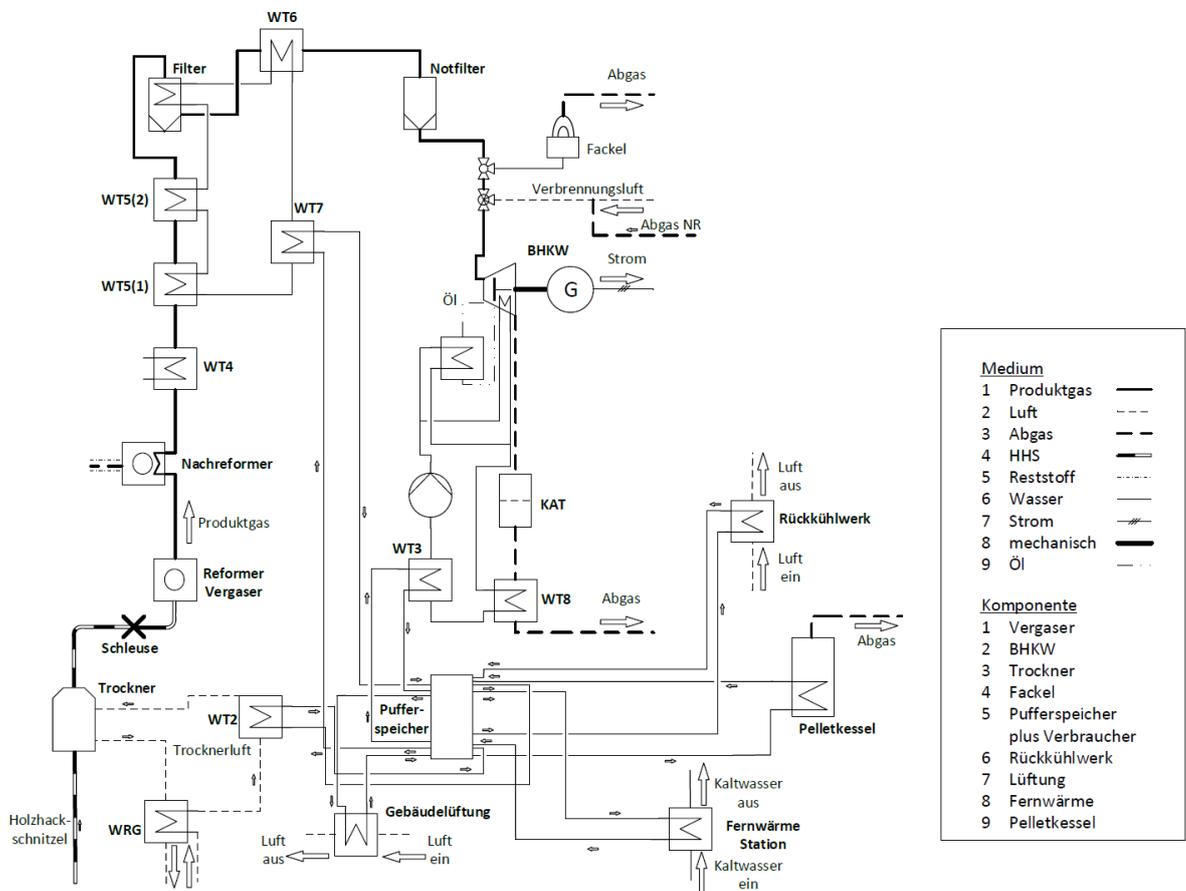


Abbildung 1-7: Speicherrelevantes R&I-Fließschema der Holzvergaser-BHKW-Anlage

Diese umfassen die im Gesamtsystem anfallenden und benötigten Wärmemengen (in kWh), deren zeitliche Bezüge (Wärmeleistungen, in kW), die relevanten Temperaturniveaus (in °C), die Art der Wärmeträger- (bei stoffgebundenem Wärmetransport) bzw. Wärmespeicherfluide (im bereits vorhandenen thermischen Pufferspeicher) sowie die Zuordnung zu den Anlagenkomponenten. Hierbei wurde zwischen Winter- und Sommerbetrieb unterschieden, da im Winter verschiedene

Wärmesenken wie z. B. die Fernwärmeinspeisung in das Netz der Stadtwerke Zittau eine Wärmeabnahme gewährleisten, während im Sommer bisher viel Wärme an die Umgebung abgegeben werden muss. Daraus kann ein Optimum hinsichtlich der Betriebsparameter in die Anlage zu integrierender Speichertechnologien für einen ganzjährigen Betrieb ermittelt werden.

Abbildung 1-7 zeigt das für Speichertechnologien relevante und vereinfachte R&I-Fließschema der Holzvergaser-BHKW-Anlage. Mit dem vereinfachten Fließschema kann übersichtlich dargestellt werden, welche Komponenten bzw. Teilkreisläufe eine übergeordnete Rolle bei der Einbindung eines geeigneten thermischen (oder stofflichen) Speichers spielen.

In Tabelle 6 ist die wärmetechnische Bilanzierung des Schichten-Pufferspeichers, welcher bisher als zentrale Sammelschiene für wasserseitige Wärmeströme dient, tabellarisch dargestellt. Die Werte entsprechen dem Zustand des Holzvergaser-BHKW im stationären Betrieb einer Messfahrt, wobei einzelne Wärmeströme als Mittelwert einer Versuchsfahrt aufgeführt sind, da diese nur im Minutenbereich periodisch auftreten.

Tabelle 6: Bilanzierung des Schichten-Pufferspeichers im stationären Zustand

	Komponente/Kreisl.	TVL [°C]	TRL [°C]	\dot{V} [m³/h]	\dot{Q} [kW]	Kommentar
Sommerfahrt 02.09.2015	WT7	81,52	67,34	0,49	10,17	Von Gaskühlung.
	WT3	82,02	62,17	2,10	61,70	Von KK & WRG
	WT2 (Trockner)	79,70	70,39	1,70	- 23,37	H2O/Luft - WÜ
	Gebäudelüftung	26,37	23,24	0,00	0,00	Nur Winterbetrieb
	Fernwärmestation	46,98	45,70	0,23	- 0,68	Nur Winterbetrieb
	Rückkühlwerk	80,22	46,99	1,02	- 51,46	Nur Sommerbetrieb
	Summe			5,54	- 3,64	\dot{Q} - Bilanzfehler
Winterfahrt 19.02.2016	WT7	80,95	67,22	0,54	11,00	Von Gaskühlung.
	WT3	78,61	59,12	2,10	60,60	Von KK & WRG
	WT2 (Trockner)	75,30	66,42	1,70	- 22,79	H2O/Luft - WÜ
	Gebäudelüftung	33,60	26,87	1,12	- 11,35	Nur Winterbetrieb

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0 Seite 27 von 58
----------------	---

	Fernwärmestation	67,22	50,11	1,82	- 46,26	Nur Winterbetrieb
	Rückkühlwerk	66,41	42,32	0,00	0,00	Nur Sommerbetrieb
	Summe			7,28	- 8,80	Q̇ - Bilanzfehler
Mittelwert	WT7	81,24	67,28	0,52	10,56	Von Gaskühlung.
	WT3	80,32	60,65	2,10	61,45	Von KK & WRG
	WT2 (Trockner)	77,50	68,41	1,70	- 23,08	H2O/Luft - WÜ
	Gebäudelüftung	29,99	25,01	0,56	- 5,86	Nur Winterbetrieb
	Fernwärmestation	57,10	47,91	1,03	- 23,47	Nur Winterbetrieb
	Rückkühlwerk	73,32	44,66	0,51	- 25,73	Nur Sommerbetrieb
	Summe			6,42	- 6,13	Q̇ - Bilanzfehler

Der rot hinterlegte Bereich stellt keine Jahresmittelwerte (gemittelt aus Sommer- und Winterbetrieb) der Parameter dar, da einige Komponenten nur saisonal in Betrieb sind. Diese Werte sind nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Zur Simulation des bilanzierten Pufferspeichers (PS) wurde ein Excel-Tool erstellt, welches das zeitliche und quantitative Auftreten von ein- bzw. ausgespeisten Wärmeströmen realistisch abbildet. Dabei kann und muss ebenfalls zwischen Sommer- und Winterbetrieb auf Grund der oben genannten saisonalen Abhängigkeiten des Auftretens verschiedener Wärmeströme unterschieden werden. Mit diesem Tool kann das Be- und Entladeverhalten des vorhandenen Schichten-Pufferspeichers (Speichermedium Wasser) simuliert werden.

In Abbildung 1-8 ist die Benutzeroberfläche des Simulationstools und in Abbildung 1-9 der Verlauf einer simulierten und einer realen Speicherbeladung bis zu oberen Betriebstemperatur dargestellt.

Pufferspeicher

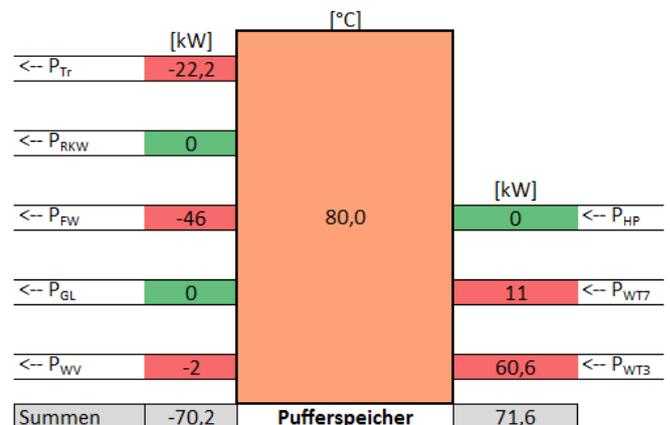
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Volumen	V_{PS}	2,2	m ³
Dichte	ρ	988,05	kg/m ³
Masse	m	2173,70	kg
spez. Wärmekapazität	c_p	4,18	kJ/(kg K)
ges. Wärmekapazität	Q	545107	kJ
Anfangstemperatur	ϑ_1	25	°C
untere Betriebstemperatur	ϑ_{B1}	75	°C
obere Betriebstemperatur	ϑ_{B2}	85	°C
Betriebsdruck	p	0,1	Mpa
aktuell gespeicherte Wärme	Q	502031	kJ
aktuelle Speichertemperatur	ϑ	80,0	°C
Zeit bis Speicher geladen	t	152	min

Jahreszeit	Winter
------------	--------

iter start (1)/stop (0)	1
Iterationszähler	500

Farblegende
Eingabezelle
Auswahlzelle
Ergebniszelle
Anzeigezelle

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit	P_m [kW]	Betriebsjahreszeit	$P_{instationär}$	$P_{stationär}$
Leistung Heizpatronen	P_{HP}	0	kW	30	Sommer/Winter		
Leistung WT7 (Vergaser)	P_{WT7}	11	kW	11	Sommer/Winter	28,7411	11
Leistung WT3 (BHKW)	P_{WT3}	60,6	kW	60,6	Sommer/Winter	318,1727	60,6
Leistung Pelletkessel	P_P	0	kW	0	Sommer/Winter	0	0
Leistung Trockner	P_{Tr}	-22,2	kW	-22,2	Sommer/Winter	-30,579581	-22,2
Leistung Rückkühlwerk	P_{RKW}	0	kW	0	Sommer/Winter		
Leistung Fernwärme	P_{FW}	-46	kW	-46	Winter		
Leistung Gebäudelüftung	P_{GL}	0	kW	-11,35	Winter		
Leistung Wärmeverluste	P_{WV}	-2	kW	-2	Sommer/Winter		

**Abbildung 1-8: Benutzeroberfläche des Pufferspeicher-Simulations-Tools**

Auf der Grundlage dieser Simulationen soll in den folgenden Arbeitsschritten beispielweise untersucht werden, ob dieser Wasser-Pufferspeicher durch einen Latentwärmespeicher mit einer signifikant höheren volumenbezogenen Speicherkapazität substituiert werden kann, so dass bei gleichem Bauraum mehr Wärme ein- und ausgespeichert werden kann. Entsprechende Technologien sind über kurz oder lang marktverfügbar, hier kommt es insbesondere auf die Erreichung der thermischen Leistungen im Latentwärmespeicher an.

Weitere Potentiale für den Einsatz thermischer Speicher werden im Teilkreislauf der Holzhackschnitzel-Trocknungsanlage und des Rückkühlwerks gesehen, da insbesondere beim Anfahren der Anlage Wärme zur Holzhackschnitzeltrocknung benötigt wird, die derzeit zumindest teilweise durch eine elektrische Beheizung bereitgestellt werden muss. Weitere diesbezügliche Untersuchungen in Verbindung mit den zu erstellenden Anforderungsprofilen werden diesen Ansatz konkretisieren.

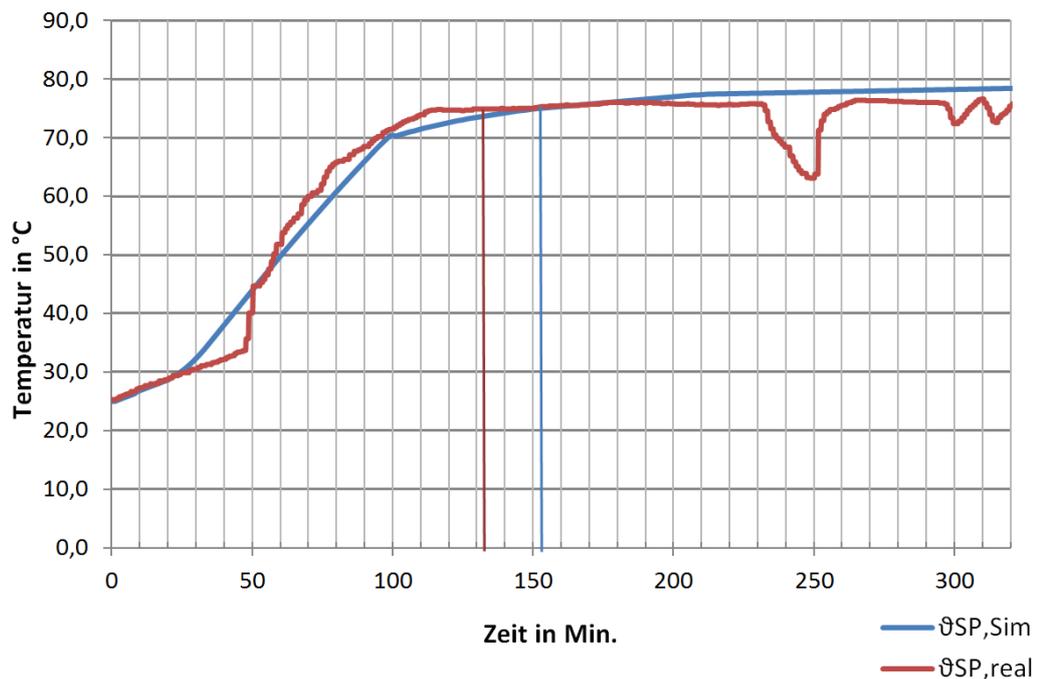


Abbildung 1-9: Simulierte (blau) und gemessenes (rot) Temperatur-Zeit-Verhalten beim Beladen des Pufferspeichers bis zu einer Endtemperatur von 75 °C

Stofflicher Speicher

Ein Produktgas-Pufferspeicher (Produktgas = Holzgas aus Vergasungsprozess) hat einerseits die Aufgabe minderwertiges Produktgas während des Anfahrprozesses der Anlage über einen gewissen Zeitraum zu speichern und dem Produktgas im Verlauf des Betriebes nach und nach beizumischen. Andererseits soll der stark fluktuierende Volumenstrom des Produktgases (siehe Abbildung 1-10) durch eine Pufferwirkung des Speichers vergleichmäßigt werden und so einen energetisch effizienteren und vor allem schadstoffärmeren Betrieb des Gasmotors gewährleisten (bessere Funktion der Lambda-Regelung).

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 30 von 58

Im Mittel besitzt der Volumenstrom einen Wert von 96,52 m³/h. Die Schwankungsbreite liegt zwischen -7,86 m³/h im negativen und 15,26 m³/h im positiven Bereich, wobei diese Werte Extremwerte darstellen, welche nur selten und kurzzeitig auftreten. Die Mittelwerte der positiven und negativen Schwankung befinden jeweils bei einem Betrag von (±) 2,35 m³/h. Tabelle 7 zeigt am Beispiel einer stationären Messfahrt vom 13.4.2016, dass etwa während der Hälfte der Messfahrt zu hohe negative bzw. positive Volumenstromschwankungen auftraten, die hinsichtlich des Ausschlages (+/-) relativ ausgeglichen sind.

Tabelle 7: Schwankungsbreiten des Produktgasvolumenstromes und deren zeitliche Häufigkeit bei stationärem Betrieb der Anlage während der Messfahrt am 13.04.2016

Messfahrt insgesamt 136 min	Unzulässige negative Schwankung	Zulässige negative Schwankung	Mittelwert	Zulässige positive Schwankung	Unzulässige positive Schwankung
Volumenstrom [m ³ /h]	-(7,86...2,0)	> -2,0	96,52	< +2,0	+ (2,0...15,26)
Zeitliches Auftreten (Gesamtzeit) [min]	35,7	68,2		32,3	

Die bisherigen Messwerte des Produktgasvolumenstromes (PGVS) unterliegen evtl. größeren Messfehlern. Mit der Beseitigung dieser Unsicherheiten beschäftigt sich in diesem Projekt die AG Systemanalyse durch Implementierung einer LDA-basierten PGVS-Messung (Laser-Doppler-Anemometer). Aufbauend auf diese genaueren Messwerte kann die Implementierung eines Produktgasspeichers konkretisiert werden.

Untersucht werden zwei mögliche Produktgasspeichervarianten, von welchen eine später in einem Laborversuchsstand umgesetzt werden soll (AE2).

Ein **Teilgasspeicher** bevorratet ein Überangebot an Produktgas (im Vergleich zu einem definierten mittleren Produktgasvolumenstrom) mittels Verdichter in einem Druckbehälter und speist dieses beim Unterschreiten des mittleren PGVS über ein Expansionsventil in die PG-Leitung zurück. Zur technologischen Umsetzung wären eine sehr dynamische Volumenstrommessung und ein ebenso dynamischer Verdichter notwendig.

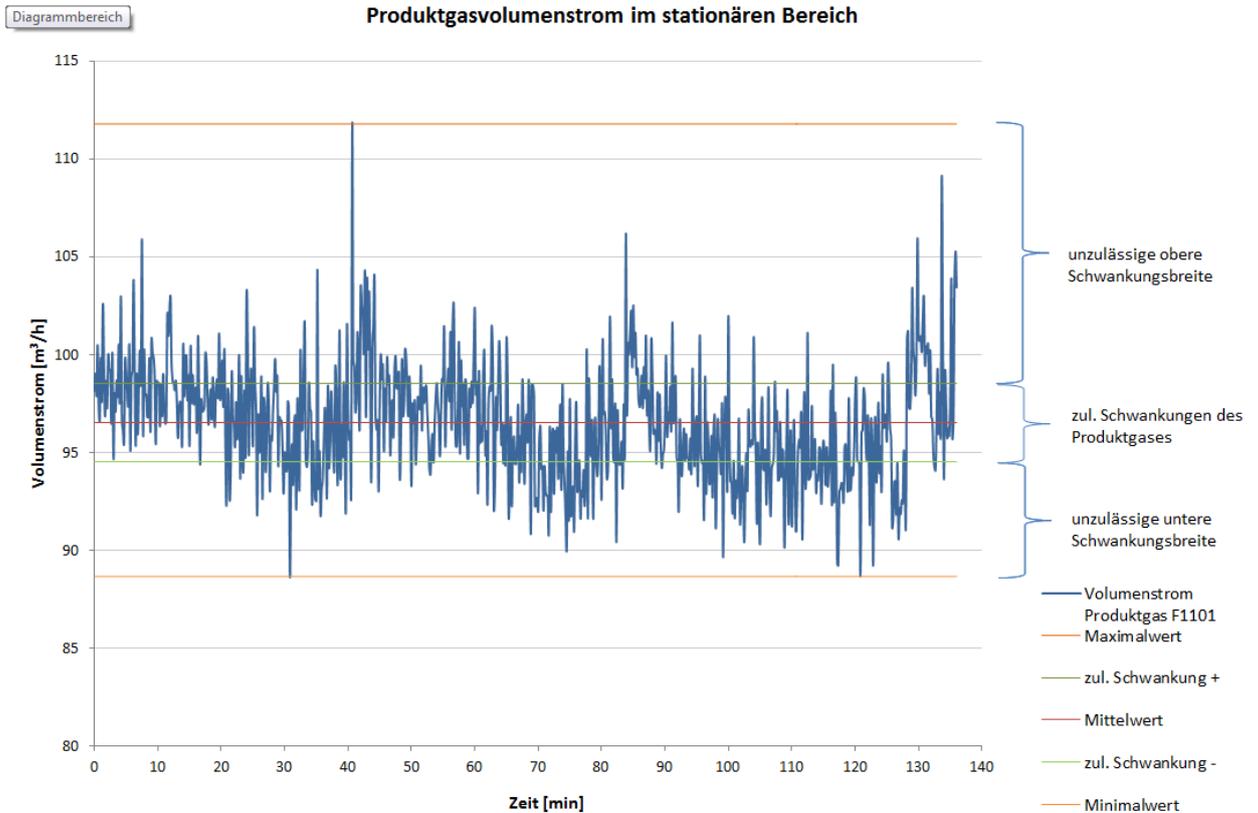


Abbildung 1-10: Schwankungsbreiten des Produktgasvolumenstromes im stationären Bereich einer Messfahrt

Um die Taktfrequenz des Verdichters und des Expansionsventils zu begrenzen wird eine gewisse Schwankung des PGVS akzeptiert. In Abbildung 1-10 ist der Verlauf des PGVS im stationären Zustand während einer Messfahrt am 13.04.2016 dargestellt.

Die große Herausforderung bei der Einbindung eines Teilgas-Stoffspeichers besteht in der hochdynamischen Regelungstechnik (Verknüpfung von Volumenstrom-Messtechnik, Verdichter und Expansionsventil). Dazu wird derzeit ein Simulationsmodell erstellt, welches die relevanten Stoffströme sowie die Speicherwirkung bei einer möglichen Umsetzung eines solchen Teilproduktgas-Speichers simuliert. In Abbildung 1-11 ist eine Prinzipskizze einer möglichen Variante eines Teilproduktgas-Speichers aufgezeigt.

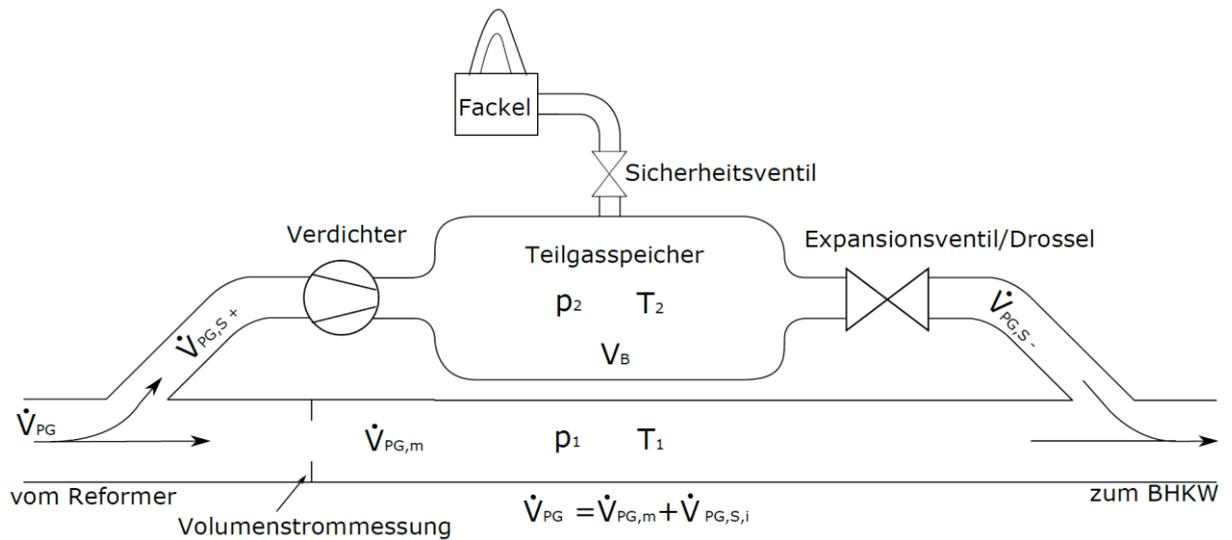


Abbildung 1-11: Prinzipskizze eines möglichen Teilproduktgas-Speichers

Dabei wird ein Teilvolumenstrom in der Größenordnung der mittleren Schwankungsbreite aus der Produktgasleitung entnommen, zur Einspeicherung in den Behälter komprimiert und bei Bedarf über ein Expansionsventil wieder zurückgespeist.

Aber auch die **Pufferspeicherung** des gesamten Volumenstromes durch einen Pufferspeicher ist denkbar. Erfahrungsgemäß werden in großen, als offene Systeme arbeitenden Gasbehältern, gewisse Volumenstromfluktuationen durch Druckschwankungen abgepuffert und ein Volumenstrom mit geringeren Schwankungsamplituden kann ausströmen. Dieser Sachverhalt wird weitergehend untersucht. Der Vorteil liegt in diesem Fall bei einer wesentlich komfortableren Regelbarkeit. Ein Nachteil ist jedoch das größer ausfallende Behältervolumen im Vergleich zum Teilgasspeicher.

Mit dem in Abbildung 1-12 dargestellten Versuchsaufbau lässt sich eine Pufferwirkung bei fluktuierendem Volumenstrom simulieren und untersuchen. Ebenso muss das Produktgas auf seine Komprimierbarkeit und den damit einhergehenden Effekten der Auskondensierung von langkettigen Kohlenwasserstoffen (Teeren) sowie der Entzündung durch Verdichtung untersucht werden. In Abbildung 1-13 sind die Prinzipskizzen einer derartigen Versuchsanlage dargestellt wobei der Grundaufbau (Behälter) in beiden Fällen derselbe ist und mit wenigen Handgriffen umgerüstet werden kann.

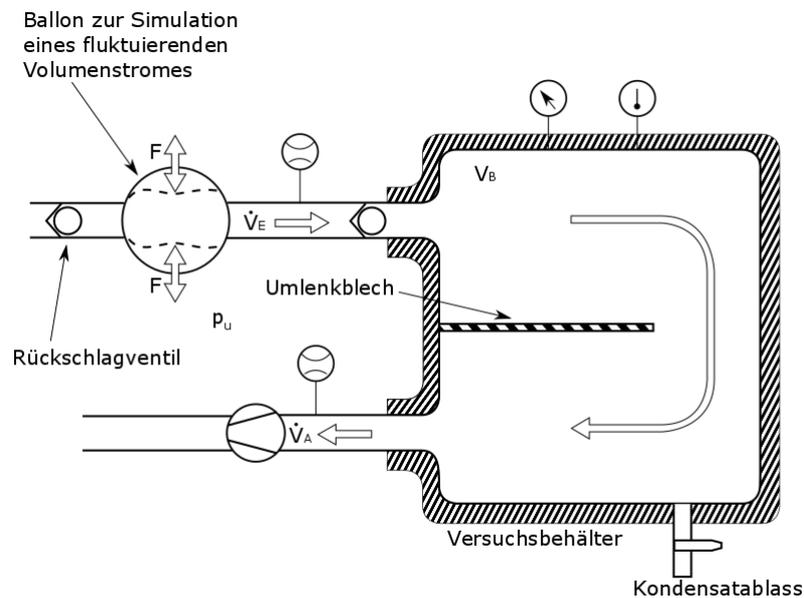


Abbildung 1-12: Prinzipskizze eines möglichen Gaspuffer-Versuchsstandes

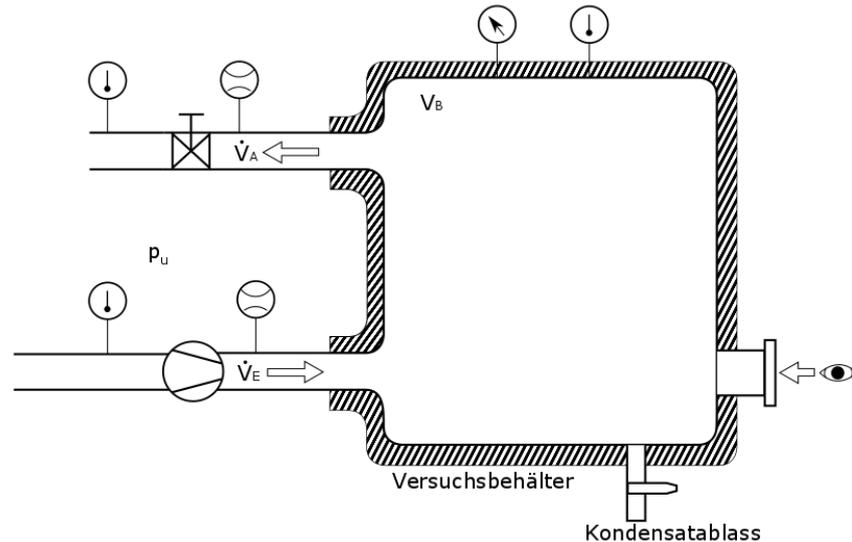


Abbildung 1-13: Prinzipskizze eines möglichen Gaskompressions-Versuchsstandes

Bei der Bestimmung etwaiger Parameter eines Produktgasspeichers zur Vergleichmäßigung des Volumenstromes ist es notwendig, Informationen über das Systemverhalten eines Gaspuffers zu erhalten. Aus diesem Grund ist ein Excel-Simulations-Tool zur Modellierung des Pufferverhaltens eines als offenes System betrachteten Behälters erstellt worden.

In den folgenden drei Abbildungen ist die Benutzeroberfläche (Abbildung 1-14), die Pufferwirkung des Behälters anhand des Ein- und Austrittsmassestromes (Abbildung 1-15) und in Abbildung 1-16 die Druck- und Temperaturentwicklung im Behälter veranschaulicht. Für die Berechnungen wird zunächst ein vom Behälterinnendruck unabhängiger, fluktuierender Eintrittsvolumenstrom vorausgesetzt.

	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
allgemeine Daten	Zeitschrittweite	Δt	0,1	s
	Behältervariante (siehe Abbildung unten)	BV	1	-
	Ventil-/Auslasskonstante	K_v	155,3	$\text{m}^3/(\text{h bar})$
	Universelle Gaskonstante	R_{quer}	8,314472	$\text{kJ}/(\text{kmol K})$
	Molare Masse	M	24	kg/kmol
	Umgebungsdruck/Austrittsdruck	p_u	1,01325	bar
	Anfangsdruck im Behälter	$p_{s,0}$	1,01325	bar
	Eintrittsvolumenstrom Mittelwert	$V_{\text{dot ein m}}$	100	m^3/h
	Untere Schwankungsbreite $V_{\text{dot ein}}$	$V_{\text{dot ein min.}}$	-12	m^3/h
	Obere Schwankungsbreite $V_{\text{dot ein}}$	$V_{\text{dot ein max.}}$	12	m^3/h
	Temp. des Gases in der Eintrittsleitung	ϑ_{ein}	68	$^{\circ}\text{C}$
	Druck in der Eintrittsleitung	p_{ein}	1,01325	bar
	Dichte des Gases in der Eintrittsleitung	ρ_{ein}	0,85732957	kg/m^3
	Anfangstemperatur im Behälter	$\vartheta_{s,A}$	20	$^{\circ}\text{C}$
	spezifische Gaskonstante	R	0,34644	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
	Gasdichte im Normzustand	ρ_N	1,07076	kg/m^3
Isentropenexponent am Eintritt	K_{ein}	1,363	-	
Behältergeometrie	Breite	b	1	m
	Länge	l	1	m
	Höhe	h	1	m
	Durchmesser Eintrittsstutzen	$d_{s,\text{ein}}$	0,05	m
	Durchmesser Austrittsstutzen	$d_{s,\text{aus}}$	0,05	m
	Behältervolumen	V_B	1	m^3
	Behälterquerschnittsfläche	$A_{Q,B}$	1	m^2
	Stutzen Querschnittsfläche am Eintritt	$A_{Q,\text{ein}}$	0,0020	m^2
	Stutzen Querschnittsfläche am Austritt	$A_{Q,\text{aus}}$	0,0020	m^2
	Kontraktionsfläche am Austritt	$A_{Q,\text{aus,2}}$	0,001195	m^2
	Querkontaktionszahl am Austritt	μ_{aus}	0,60840	-
	Durchflussbeiwert am Austritt	ζ_{aus}	0,4143	-
	Durchflussbeiwert am Eintritt	ζ_{ein}	0,9961	-

Farblegende
Eingabefeld
Dropdown - Auswahlfeld
Zwischenwerte
Ergebnisfeld

Abbildung 1-14: Benutzeroberfläche des Gasspeicher-Simulation-Tools

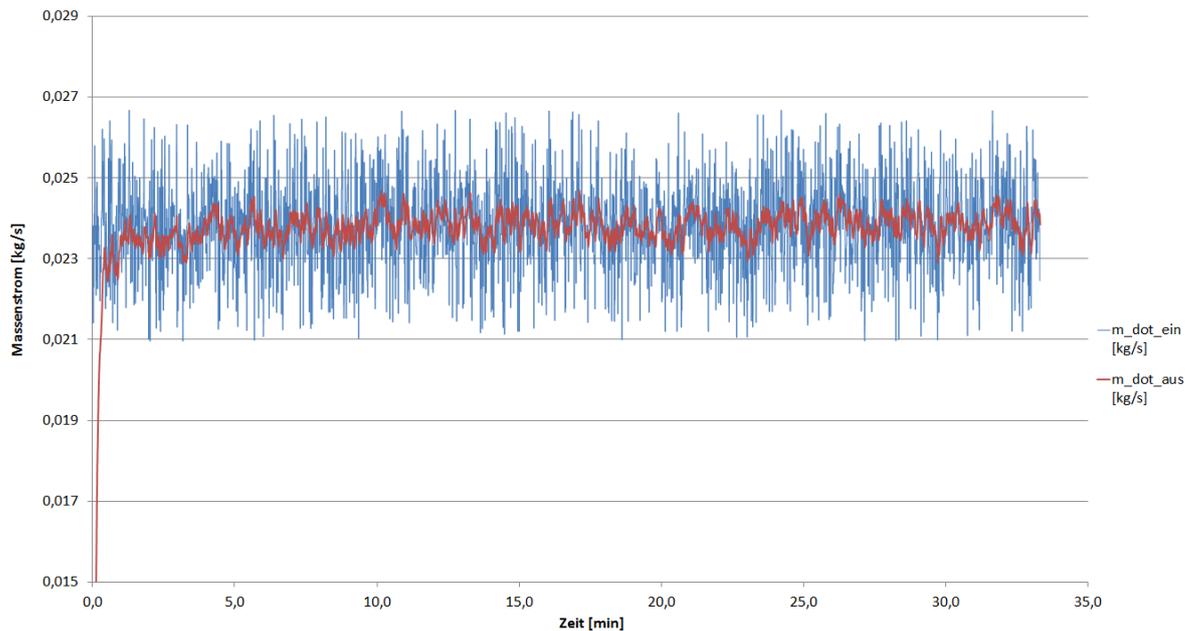


Abbildung 1-15: Veranschaulichung der Pufferwirkung für eine Simulation (Aufbaus der Anlage nach Abbildung 1-12) blau ... eintretender (schwankender) PGVS, rot ... austretenden (deutlich gedämpfter) PGVS

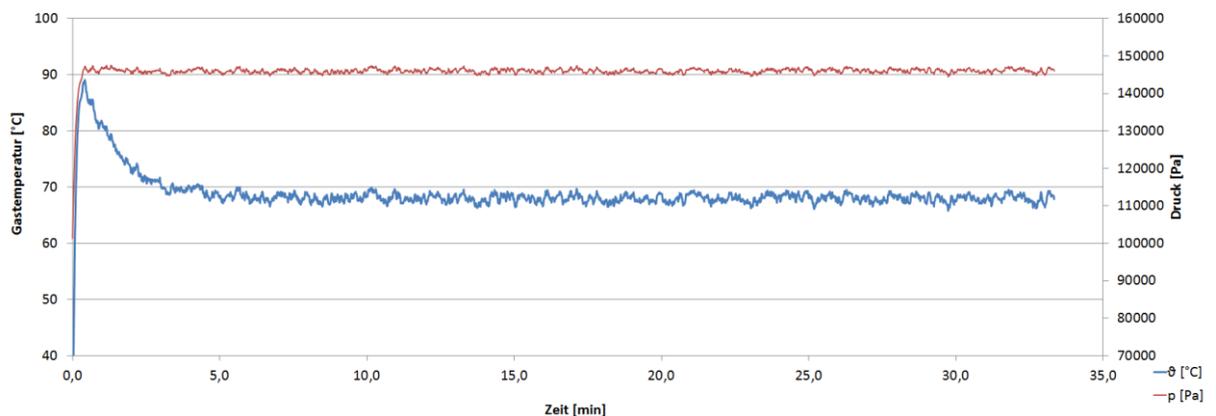


Abbildung 1-16: Darstellung des Temperatur- und Druckverlauf für eine Simulation nach Parameter in Abbildung 1-12

Wie in Abbildung 1-15 zu sehen ist, besitzt ein nur 1 m³ großer Behälter, dessen Ein- und Austrittsleitung den gleichen Querschnitt wie die bisherige Produktgasleitung besitzt, schon einen nicht zu vernachlässigenden Dämpfungseffekt.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen lassen sich die Größenverhältnisse einer derartigen Laboranlage, wie sie für die Arbeitsetappe 2 vorgesehen ist, abschätzen.

Anforderungsprofile

Die Lastenhefte für die jeweiligen Speichertypen sind in Bearbeitung. Die Ziele und Anforderungen, die diese Speichertypen erfüllen müssen, werden zusammengefasst und konkretisiert. Ziel bei der Einbindung eines thermischen Speichers in die Gesamtanlage ist eine Erprobung und Validierung der Eignung derartiger Speichertypen in eine Holzvergaser-BHKW-Anlage.

Da konkrete Versuchsaufbauten erst Teil der AE2 sind können die Anforderungsprofile nur auf Basis von Messwerten an der Holzvergaser-BHKW-Anlage erstellt werden. Diese enthalten somit keine Kenntnisse über das Produktgasverhalten bei Kompression. Eine Simulation dieser Vorgänge ist schwierig.

Ebenso benötigt es weitere Versuchsfahrten an der Anlage um genauere Aussagen treffen zu können, da manche speicherrelevanten und aussagekräftigen Messwerte bisher nicht in die Datenbank aufgenommen worden sind.

AP3 - Reststoffverwertung und Emissionsverhalten

AE3.1 – Potenziale und (Nach-) Behandlungsmöglichkeiten

Das Endprodukt der Holzvergaseranlage kann entweder sogenannter Filterstaub oder thermisch nachreformierter Reststoff sein. Beide Endprodukte weisen einen Restgehalt an Kohlenstoff auf, der durch die thermische Nachbehandlung beim Reststoff kleiner ist. Gleichzeitig erhöht sich der Ascheanteil im Reststoff.

Am Beginn der Arbeitseinheit AE3.1 steht die Ist-Analyse der Stoffströme im Rahmen von Versuchsfahrten (stationärer/instationärer Betriebszustand) an unterschiedlichen Anlagenkonzepten. Dazu gehört auch die Charakterisierung des gewonnenen Probenmaterials im Labor „Brennstoffanalytik“.

Im ersten Projektabschnitt war es durch die Einarbeitung des Projektmitarbeiters für Reststoffe und Emissionen möglich - neben der vorhandenen Thermogravimetrischen Analyse und der Brennwertbestimmung - auch die Elementaranalyse und die Bestimmung des Glühverlustes bzw. des Glührückstandes in das Forschungsprojekt zu implementieren. Darüber hinaus wurde das Labor für Brennstoffanalytik für das Forschungsprojekt weiter qualifiziert. Jede der oben angegebenen Analysenmethode wurde auf den Prüfstand gestellt, sodass die Laborergebnisse nun der jeweiligen DIN inklusive der geforderten Präzisionsdaten entsprechen.

Dazu wurden auf Excel basierende Auswerteprotokolle angefertigt. Die Gewinnung der Elementaranalyse für das Projekt stellt nicht nur für die Charakterisierung der Brennstoff-/Reststoffproben einen großen Nutzen dar, sondern ist auch entscheidend für die Bilanzierung und Modellierung (vgl. vorherige Kapitel).

So können jetzt zu jeder Zeit Einzelproben z.B. vom Brennstoff-Input auf ihre elementare Zusammensetzung hin geprüft werden und das Reformer-Modell dahingehend angepasst werden.

Die relativen Abweichungen von der bisherigen Auswertemethode zur aktuellen (unter Einhaltung der nach DIN geforderten Präzisionsdaten) sind teilweise erheblich (vgl. Tabelle 1-8), sodass von einer Qualifizierung der Laborergebnisse gesprochen werden kann. Angegeben sind die minimale und maximale relative Abweichung in % sowie die Probenanzahl n als Fußnote.

Tabelle 1-8: relative Abweichungen der Auswertemethoden

Analysenschritt	Filterstaub	Reststoff
Analysenfeuchtigkeit	-10 % 2 % ₂₃	-33 % 33 % ₂₇
Flüchtige Bestandteile	-11 % 6 % ₂₃	-5 % 5 % ₂₇
Fixer Kohlenstoff	-7 % 6 % ₂₃	-21 % 38 % ₂₇
Aschegehalt	-5 % 6 % ₂₃	-9 % 2 % ₂₇
Gesamtkohlenstoff C	-4 % 6 % ₂₃	-12 % 36 % ₂₇
Wasserstoff H	-24 % 14 % ₂₃	-35 % 227 % ₂₇
Stickstoff N	-8 % 19 % ₂₃	-16 % 40 % ₂₇
Schwefel S	-72 % 1584 % ₂₃	-4 % 35 % ₂₇

Die negativen Werte bedeuten dabei, dass die neue Auswertemethode die Laborergebnisse im Vergleich zur bisherigen Ausgabe nach oben korrigiert, die positiven, dass nach der bisherigen Methode zu viel angegeben wurde, die Laborwerte nun also nach unten korrigiert werden. Bei Filterstäuben und Reststoffen, die hauptsächlich aus einem Restgehalt aus Kohlenstoff und Asche bestehen und nur Spuren von Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel enthalten, führen diese Abweichungen zumeist nur zu Änderungen in der ersten Nachkommastelle, können aber auch im einstelligen Bereich liegen. In dem Fall kann die neue und genauere Auswertemethode entscheidend für die Bilanzierung und Modellierung von Teilprozessen oder dem Gesamtprozess sein.

Während der bisher stattgefundenen Messfahrten konnten die in Tabelle 1-9 und Tabelle 1-10 aufgeführten brennstoffspezifischen Analysedaten für Reststoffe und Filterstäube generiert werden.

Tabelle 1-9: Brennstoffspezifische Analysedaten von Reststoffen (Angaben in Ma.-%, H_s und H_i in kJ/kg | alle Angaben auf Bezugszustand wasserfrei umgerechnet | Mittelwert (Min | Max) Probenanzahl n)

Parameter	Brennstoff	
	Holz hackschnitzel	KUP
Flüchtige Bestandteile	23,5 (22,4 24,5) ₂	23,2 (22 24,6) ₄
Fixer Kohlenstoff	38,6 (35,9 41,3) ₂	2,9 (1,6 4,1) ₄
Aschegehalt	38,1 (36,4 39,7) ₂	74,0 (72,6 76,4) ₄
Gesamtkohlenstoff C	48,3 (47,3 49,3) ₂	16,9 (15,2 18,4) ₄
Wasserstoff H	0,2 (0 0,4) ₂	0,26 (0,19 0,39) ₄
Stickstoff N	0,1 (0,1 0,1) ₂	0,15 (0,1 0,18) ₄
Schwefel S	0,16 (0,13 0,18) ₂	nicht messbar
Sauerstoff O	13,3 (10,8 15,7) ₂	8,7 (7,8 9,5) ₄
Glühverlust	45 (43,7 46,2) ₂	13,5 (11,2 15,9) ₄
Glührückstand	55 (53,8 56,3) ₂	86,5 (84,1 88,8) ₄
Brennwert H _s	16547 (15763 17332) ₂	4030 (3497 4564) ₂
Heizwert H _i	16402 (15612 17192) ₂	3946 (3392 4499) ₂

Tabelle 1-10: Brennstoffspezifische Analysedaten von Filterstäuben (Angaben in Ma-%, H_s und H_i in kJ/kg | alle Angaben auf Bezugszustand wasserfrei umgerechnet | Mittelwert (Min | Max) Probenanzahl n)

Parameter	Brennstoff			
	HHS	KUP	HHS mit Katalysator 1	HHS mit Katalysator 2
Flüchtige Bestandteile	14,7	23,4 (22 26,3) ₅	16,2 (12 21,9) ₇	17,1 (14,9 21,3) ₆
Fixer Kohlenstoff	66,1	18,6 (10,9 32,7) ₅	53,7 (35,1 65) ₇	56,2 (43,3 63,5) ₆
Aschegehalt	19,14	58 (45,2 65,8) ₅	30,2 (21,8 47,1) ₇	26,7 (21,6 35,3) ₆
Gesamtkohlenstoff C	76,8	29,9 (25,3 33,8) ₄	64,9 (46,5 74,5) ₇	68,2 (58,1 73,6) ₆
Wasserstoff H	0,63	0,29 (0,12 0,49) ₄	0,7 (0,6 0,84) ₇	0,78 (0,66 0,86) ₆
Stickstoff N	0,13	0,34 (0,31 0,38) ₄	0,2 (0,14 0,33) ₇	0,16 (0,14 0,18) ₆
Schwefel S	0,14	nicht messbar	0,005 (0 0,01) ₄	0,01 (0 0,02) ₂
Sauerstoff O	3,2	8,3 (6,5 9,3) ₄	4,1 (1,6 6,3) ₇	4,0 (2,2 6,9) ₆
Glühverlust	76,8	27,3 (20,8 31,4) ₄		66,9 (56,6 72,9) ₆
Glührückstand	23,2	72,7 (68,6 79,2) ₄		33,1 (27,1 43,4) ₆
Brennwert H _s	25231	8764 (7826 9702) ₂	20085 (15186 24983) ₂	21727 (19465 23989) ₂
Heizwert H _i	25110	8645 (7707 9583) ₂	20012 (15095 24930) ₂	21471 (19194 23748) ₂

Wie die vorangestellten Tabellen zeigen ist der beprobte Filterstaub inhomogener als der Reststoff (vgl. Tabelle 1-11). Das ist verfahrenstechnisch begründet, da der Filterstaub durch das Abreinigen des Filters „gewonnen“ wird. Am Filter haften grobe wie auch feine Partikel an, die anschließend sofort ausgeschleust werden. Filterstaubproben kann man ferner aufgrund ihrer staubähnlichen Eigenschaften nicht mit den vorhandenen Schneidmühlen mahlen, sodass dieser auf < 1 mm gemörsert und anschließend gesiebt wird. Nur so lassen sich die nach der DIN geforderten Präzisionsdaten für Vergleich- und Wiederholbarkeit einhalten. Die analysierten Reststoffproben sind hingegen nicht wegen ihrer Beschaffenheit kritisch, sondern – je nach Umsetzungsgrad der Kohlenstoffverbindungen – wegen ihres hohen Aschegehalts. Ab einem Aschegehalt von

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 41 von 58

40 Ma.-% kommt es bei der Messung der Elementarzusammensetzung zu erhöhtem Wartungsaufwand am Analysegerät und zur fehlerhaften Detektion von Schwefel (Schwefelgehalt wird zu hoch gemessen).

Tabelle 1-11: durchschnittliche absolute Abweichung (in Ma.-%) der Analysedaten von Reststoff und Filterstaub von ihrem Mittelwert

Parameter	Art des Rückstands	
	Reststoff	Filterstaub
Flüchtige Bestandteile	0,7	1,5 ... 2,2
Fixer Kohlenstoff	0,7	5,8 ... 8,9
Aschegehalt	1,2	4,1 ... 6,8
Gesamtkohlenstoff C	1,2	3,6 ... 7,1
Wasserstoff H	0,1	0,1
Stickstoff N	0	0
Schwefel S	0	0
Sauerstoff O	0,7	1,0 ... 1,5
Glühverlust	1,7	4,1 ... 4,9
Glührückstand	1,7	4,1 ... 4,9

Während der absolvierten Messfahrten wurden auch die produzierten Filterstaub- bzw. Reststoffmengen erfasst. Wie bereits in AE1.1 „Gesamtsystem- und Sensitivitätsanalyse, instationäres Verhalten und Katalyse“ erläutert, fluktuieren die erfassten Mengen jedoch zu stark als dass sich derzeit eine aussagekräftige Prognose dazu treffen lässt.

Mit Unterstützung des Netzwerks FEE e.V. im Speziellen der Arbeitsgruppe „Vergasung von Biomasse“ konnten weitere charakteristische Reststoffproben von Vergleichsanlagen im Feld mit z.T. alternativen Anlagenkonzepten für das Forschungsprojekt gewonnen werden. Die Auswertung der Analysen läuft im Berichtszeitraum z.T. noch, weshalb noch nicht alle Ergebnisse in Tabelle 1-12 dargestellt werden können. Aufgeführt sind die Analyseergebnisse als Mittelwerte in Ma.-% umgerechnet auf den Bezugszustand „wasserfrei“. In der rechten Spalte sind noch einmal die Mittelwerte aus Tabelle 1-9 für den Reststoff aus Standard-Hackschnitzeln ⁽¹⁾ und aus KUP-Material ⁽²⁾ als Vergleich aufgeführt.

Tabelle 1-12: Reststoffproben von Anlagen im Feld im Vergleich zur Versuchsanlage des TCV 3 (NR ... Nachreformer | CR ... C-Reformer | K ... Konverter | * in Bearbeitung)

Anlage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TCV 3
Art der therm. Nachbehandlung	NR	NR	NR	NR	CR	K	NR	NR	NR	NR
Parameter										
Flüchtige Bestandteile	14,6	18,9	24,7	22,2	19,8	20,9	22,4	14,5	22,1	23,5 ¹ 23,2 ²
Fixer Kohlenstoff	3,5	3,2	4	7,9	45,5	5,9	3,5	3,9	2,4	38,6 ¹ 2,9 ²
Aschegehalt	81,9	78	71,5	70	34,8	73,2	74,1	81,7	75,5	38,1 ¹ 74,0 ²
Gesamt-kohlenstoff C	5,7	8,1	15	22,2	47,7	7,4	*	*	*	48,3 ¹ 16,9 ²
Wasserstoff H	0,0	0,12	0,05	0,04	0,5	0,0	*	*	*	0,2 ¹ 0,26 ²
Stickstoff N	0,01	0,03	0,08	0,1	0,23	0,16	*	*	*	0,1 ¹ 0,15 ²
Schwefel S	0	0	0	0	0	0	*	*	*	0,16 ¹
Sauerstoff O	12,4	13,7	13,5	7,7	13,3	11	*	*	*	13,3 ¹ 8,7 ²
Glühverlust	1,3	8,4	11,3	15,8	71,4	11	3,8	2,3	1,9	45 ¹ 13,5 ²
Glührückstand	98,7	91,6	88,7	84,2	28,6	89	96,2	97,7	98,1	55 ¹ 86,5 ²

Aus den Vergleichswerten der Versuchsanlage (rechte Spalte) geht hervor, dass schon ein Wechsel beim Brennstoffeinsatz und die damit verbundenen spezifischen Anlageneinstellungen – unabhängig von der Art der thermischen Nachbehandlung – einen vollkommenen neuen Reststoff hervorrufen. Gerade hinsichtlich des noch enthaltenen Kohlenstoffs und der Asche ist auch die Bandbreite zwischen den einzelnen Anlagen

enorm. Die Gründe hierfür sollen nun an ausgewählten Anlagen im Detail geprüft werden, indem in den nächsten Schritten bspw. die Art und der Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffs, das Alter der jeweiligen Anlage und damit der Generation der integrierten Nachreformereinheit sowie weitere spezifische Anlageneinstellungen abgefragt werden. Durch dieses Herangehen werden sich ein vertiefender Erkenntnisprozess sowie das Ableiten von weiteren Abhängigkeiten parallel zu den Messungen und Forschungsarbeiten an der eigenen Versuchsanlage versprochen.

Im Berichtszeitraum wurde auch damit begonnen, regionale Kompetenzen zur „Charakterisierung kohlenstoffhaltiger Rückstände aus Holzvergaseranlagen“ zu bündeln, um Reststoffe analytisch so zu erfassen, dass Lösungen möglich werden, Reststoffe:

- im Vergasungsprozess zu reduzieren und/oder
- von den Stoffen zu befreien, die ihre Entsorgungskosten beeinflussen.

Ziel des Workshops ist es, aus der Summe der notwendigen Parameter die entscheidenden auszuwählen und die Dichte ihrer Bestimmung festzulegen, um zu repräsentativen Aussagen zu kommen. Dazu wurden bisher zwei Workshops abgehalten (02. und 31. Mai 2016 | 3. Workshop voraussichtlich im August 2016). Namhaft nehmen daran Vertreter der organischen und physikalischen Chemie der Hochschule Zittau/Görlitz, das Internationale Hochschulinstitut (IHI) Zittau als Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung der TU Dresden, Mathematiker/Statistiker, ein Vertreter des Anlagenherstellers sowie der Projektleiter und Projektmitarbeiter dieses Forschungsprojektes teil.

Bei der Bewertung von Reststoffen wurden bisher folgende Hauptkriterien zur Charakterisierung identifiziert:

- a) Wassergehalt
- b) Kohlenstoff-dominierte Parameter wie:
 - Glühverlust | Glührückstand | org. Anteile des Trockenrückstands an der Originalsubstanz
 - Gesamtkohlenstoff C (total carbon, TC), der sich aus der Summe von total organic carbon (TOC) und total inorganic carbon (TIC) ergibt
 - C-H-N-S
 - fixer Kohlenstoff, flüchtige Bestandteile und Aschegehalt
 - Brennwert | Heizwert

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0
	Seite 44 von 58

- Asche-Schmelzverhalten
- c) aromatische Verbindungen
 - PAK16 (nach EPA)
 - BTX (Benzol)
- d) Gehalte gelöster Feststoffe im Eluat

As | Pb | Cr | Cu | Ni | Hg | Zn | Gesamtgehalt gelöster Feststoffe

- e) Gehalt an Nährstoffen

Die Beziehungen zwischen einzelnen Werten sind allerdings nicht immer plausibel bzw. messen verschiedene Labore unabhängig voneinander an ein und derselben Teilprobe unterschiedliche Werte. Für die Entsorgungs- und Verwertungswege gelten aber klare Vorgaben wie bspw. der Glühverlust (GV), der die Deponierfähigkeit (DK II, III oder bis $GV < 12$ zum Versatz) bestimmt oder der Gehalt an PAK 16 und Benzol, der ab 1000 mg/kg in gefährlich oder ungefährlichen Abfall entscheidet.

Diese Nicht-Plausibilität trifft man z.B. bei den Beziehungen zwischen den TC, TIC, TOC-Werten und dem GV an. Bei der Bestimmung der 16 EPA-PAK und Benzol sind unterschiedliche Analysenmethoden in Gebrauch, deren Ergebnisse um Größenordnungen abweichen (Kaltextraktion mit Aceton = „seichte“ Methode, Extraktion mit Soxhlet/Toluol = „scharfe“ Methode).

Für die Teilnehmer des Workshops gibt es also vorrangigen Klärungsbedarf zu den Hauptschwerpunkten der Analysenmethodik, zur Probenahme und Probenvorbereitung und zur Versuchsstatistik. Die offenen Fragen, die sich dabei ableiten lassen, sind bspw.:

- a) Analysenmethodik:

Welche Analysenverfahren sind zur Bestimmung der festen kohlenstoffhaltigen Rückstände charakterisierender Parameter bevorzugt anzuwenden?

Welche dieser Analysenverfahren kann die Hochschule Zittau/Görlitz und das IHI Zittau selbst leisten? Welche davon müssen extern beauftragt werden?

Werden Methoden benutzt, die durch die Hinweise des Umweltbundesamtes zur Handhabung der AVV (Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis) Deponieverordnung, Düngemittelverordnung oder Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vorgegeben oder zugelassen sind?

b) Versuchsstatistik:

Festlegung der Anzahl, Häufigkeit und Menge der Proben je angestrebter Aussage und zur Bildung von Durchschnitts-, Median- und 80 Perzentil-Werten.

c) Versuchsvorbereitende Maßnahmen:

Vorgaben zur Probenahme, Probenvorbereitung und Homogenisierung, Lagerung (Alterung)

Als bisherige Ergebnisse zur Problematik „Analysenmethodik“ konnte den Workshop-Teilnehmern durch den Projektmitarbeiter für „Reststoffe und Emissionen“ ein Fließschema zu den Analysenmethoden im Labor „Brennstoffanalytik“ zur Verfügung gestellt werden. Dies zeigt im Detail wie die Probenvorbereitung, die Durchführung der einzelnen Analysen und die Ergebnisauswertung vonstattengeht (vgl. Abbildung 1-18).

Zudem wurde zu dem Hauptkriterium der Kohlenstoff-dominierte Parameter die nachfolgende Grafik (Abbildung 1-17) vorgestellt und die aufgeführten Schlussfolgerungen daraus diskutiert.

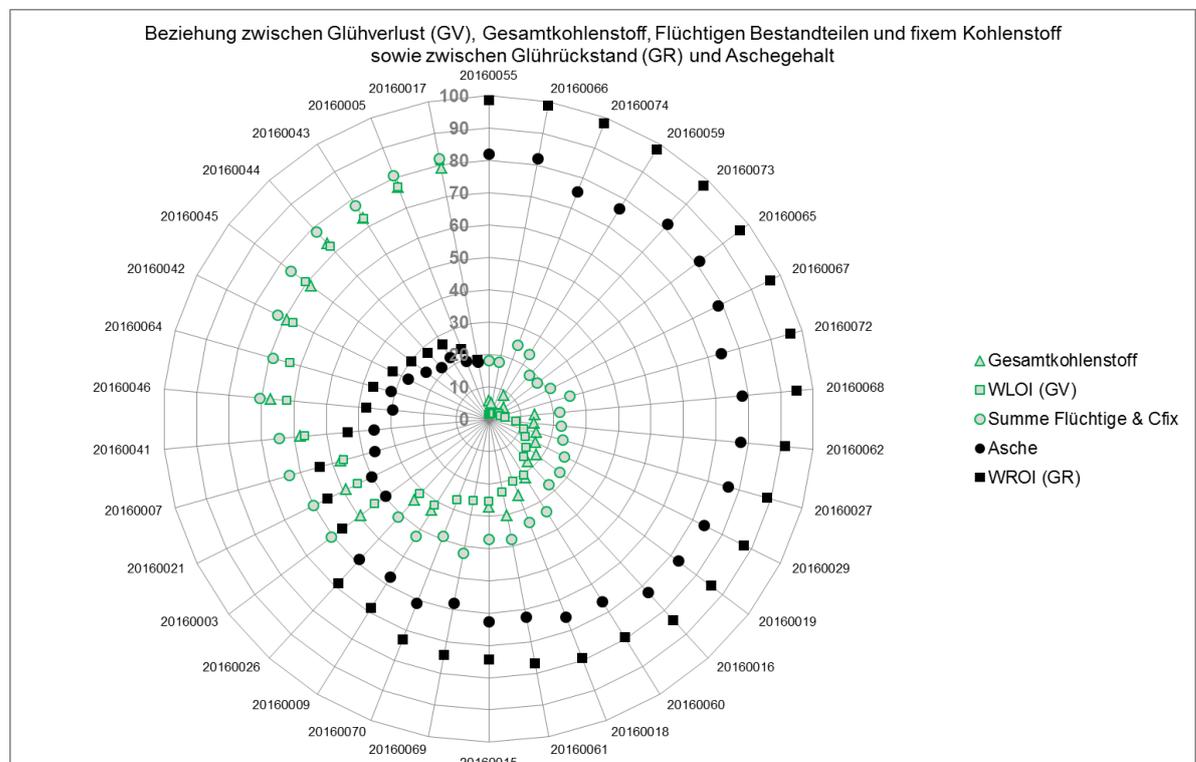


Abbildung 1-17: Beziehungen zwischen Kohlenstoff-dominierten Parametern

Die Abbildung 1-17 zeigt, dass:

- a) Glührückstand (WROI) > Aschegehalt
- bis zu einem Glühverlust (WLOI) von 5 Ma.-% liegt der gemessene Aschegehalt etwa 20 Ma.-% unter dem analysierten Glührückstand
 - bis zu einem Glühverlust (WLOI) von etwa 50 Ma.-% liegt der analysierte Aschegehalt etwa 15 Ma.-% unter dem Glührückstand
 - oberhalb eines Glühverlustes (WLOI) von 50 Ma.-% liegt der messbare Aschegehalt ca. 10 Ma.-% unterhalb des Glührückstandes, wobei sich mit steigendem Glühverlust Aschegehalt und Glührückstand immer mehr annähern
- b) Summe von fixem Kohlenstoff und Flüchtigen Bestandteilen > Gesamtkohlenstoff (TC oder C)
- bis zu einem Glühverlust (WLOI) von 5 Ma.-% liegt die Summe aus Flüchtigen Bestandteilen und fixem Kohlenstoff etwa 15 Ma.-% über dem analysierten Gesamtkohlenstoff
 - ab einem Glühverlust (WLOI) von ca. 5 Ma.-% bis zu einem Glühverlust von etwa 50 Ma.-% liegt die Summe aus Flüchtigen Bestandteilen und fixem Kohlenstoff etwa 10 Ma.-% über dem gemessenen Gesamtkohlenstoff
 - oberhalb eines Glühverlustes (WLOI) von 50 Ma.-% liegt die Summe aus Flüchtigen Bestandteilen und fixem Kohlenstoff etwa 5 Ma.-% über dem gemessenen Gesamtkohlenstoff, wobei sich mit weiter steigendem Glühverlust die Summe aus Flüchtigen Bestandteilen und fixem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff immer mehr annähern
- c) Gesamtkohlenstoff (TC oder C) > Glühverlust
- der Glühverlust (WLOI) unterscheidet sich nur marginal vom Gesamtkohlenstoff
 - bis zu 5 Ma.-% liegt dieser im Mittel 5 Ma.-% unterhalb des analysierten Gesamtkohlenstoffs
 - oberhalb eines Glühverlust von 5 Ma.-% kann der Glühverlust mit guter Näherung dem Gesamtkohlenstoff gleichgesetzt werden

Diese Abhängigkeiten sollen im weiteren Projektverlauf durch weitere Analysedaten untersetzt und verifiziert werden. Bewahrheiten sie sich, könnte man durch die einfache

Bestimmung des Glühverlustes und Glührückstandes (nach DIN 15169) die kosten- und zeitintensivere Analytik der thermogravimetrischen Analyse und Elementaranalyse für die routinemäßige Beprobung seiner Rückstände aus der Holzvergaseranlage einsparen.

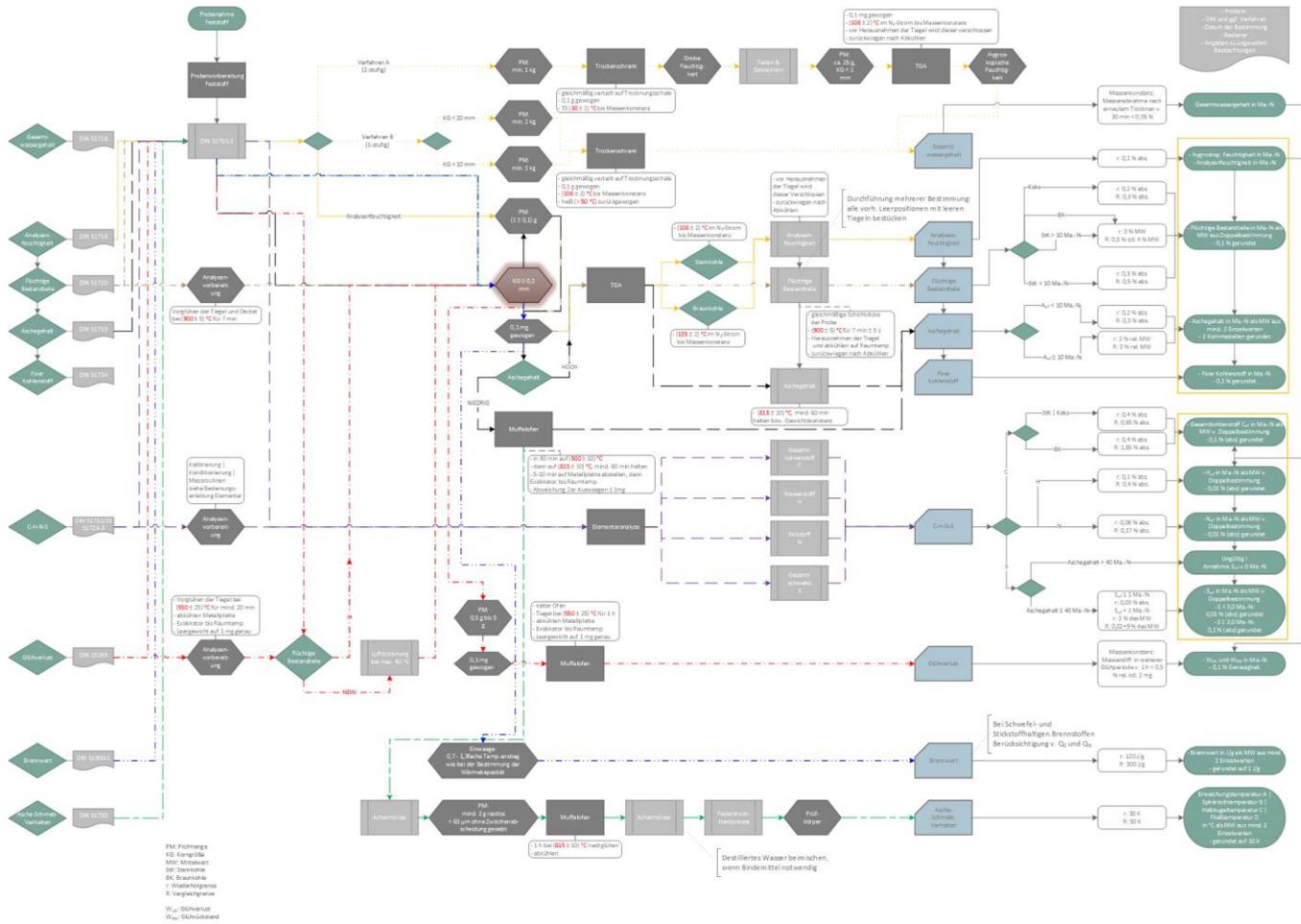


Abbildung 1-18: Fließbild zur Analysenmethodik im Labor „Brennstoffanalytik“

mentes ist verpflichtet, die hierin enthaltenen Informationen gemäß den vertraglich geregelten Geheimhaltungsbestimmungen zu behandeln.

Darstellung von Verwertungswegen der Rückstände

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) sind die festen kohlenstoffhaltigen Rückstände der Holzvergaseranlage zunächst Abfall, da die Anlage zum Zwecke der Energieerzeugung betrieben wird. Nach dem KrWG gilt ferner die Hierarchie, dass es Abfälle zuerst zu vermeiden gibt, unvermeidliche Abfälle möglichst vollständig zu verwerten sind und nicht verwertbare Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden müssen.

Derzeit werden die kohlenstoffhaltigen Rückstände der Versuchsanlage über eine Entsorgungsfirma als Abfall extern entsorgt.

Nach dem KrWG ist der Anfall der Rückstände als Erstes zu vermeiden. Dies ließe sich durch einen vollständigen Umsatz der C-H-O-Verbindung der eingesetzten Biomasse realisieren, sodass am Ende (analog der Verbrennung) nur noch die Holzasche anfällt. Bei einem typischen Aschegehalt von ca. 2 Ma.-% und einem stündlichen Brennstoffbedarf von 30 kg (Wassergehalt 10 Ma.-%) wären das etwa 550 g/h oder 13 kg/d reine Holzasche. Aktuell, durch den unvollständigen Kohlenstoffumsatz, liegt die Anlage rund 1/3 über dem theoretisch möglichen, vollständigen Umsatz.

Ein denkbarer Ansatz zur Verwertung wäre aus Sicht des Bearbeiters aber auch die kohlenstoffhaltigen Rückstände partiell in den Vergasungsprozess zurückzuführen. Auch hier sind die verfahrenstechnischen Detailfragen noch offen und die Möglichkeiten bezüglich der vorhandenen Anlagentechnik zu prüfen.

Ferner wäre es, unter Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte und Vorschriften, auch möglich, die kohlenstoffhaltigen Rückstände in die Garten-, Land- oder Forstwirtschaft einzubinden. Dies könnte bspw.

- zur eigenen Bodenverbesserung,
- zur Bodenaufbereitung mit Kompostierung,
- zu Biogasanlagenbetreibern,
- zu Düngemittelherstellern /oder Zulieferern,
- zur Forstwirtschaft bzw. deren Dienstleistern

geschehen. Auch um diesen Verwertungsweg zu prüfen, wurde damit begonnen, ausgewählte Reststoffproben hinsichtlich ihrer Schwermetall-, Nährstoff- und PAK-Gehalte zu analysieren und die Ergebnisse den Grenzwerten gegenüberzustellen.

Ein weiterer vorstellbarer Verwertungsweg der kohlenstoffhaltigen Rückstände wäre die stoffliche bzw. physikochemische Nutzung in der Industrie, z.B.

- zur Metallurgie (bspw. in Stahlwerke),
- zu Bindemittelherstellern (bspw. für den Wegebau),
- im Bergbau zum Versatz zu Sicherungszwecken,
- als Zuschlagstoff in der Zementindustrie,
- als Füllstoff bei der Kunststoffherstellung.

Schlussendlich ist auch das breite Feld der energetischen Nutzung zu identifizieren. Hier wären nachfolgende Lösungsansätze zur Verwertung denkbar:

- zur eigenen o. benachbarten Biomasseheizung (Geltungsbereich: 1.BImSchV)
- zu benachbarten Biomasse Heiz(kraft-)Werken (Geltungsbereich: 4.BImSchV)
- zur quasi-zentrale stationären Wirbelschichtfeuerung (Geltungsbereich: 17.BImSchV)
- zur Mitverbrennung in Kohle-(Heiz-)Kraft-Werken,
- zu Ersatzbrennstoff-Heiz-(Kraft-)Werken,
- zu Müllverbrennungs-Heiz-(Kraft-)Werken.

Hierzu sind gerade die energetischen Analysewerte aus dem Labor „Brennstoffanalytik“ entscheidend.

Für nicht zu verwertende Rückstände bleibt nur die fachgerechte Entsorgung. Hier bleibt noch im Detail zu prüfen, wie gefährlich oder ungefährlich die anfallenden Rückstände sind, damit die Entsorgung:

- durch Entsorger in Richtung Deponieklasse II,
- durch Entsorger in Richtung Deponieklasse III,
- durch Sonderentsorger in Richtung Deponieklasse IV,
- durch Entsorger mit eigenen Verwertungsmöglichkeiten bzw. –wegen

vonstattengehen kann.

Vergleich mit Grenzwerten der Emissionen (in Anlehnung an TA Luft), Schad- und Nährstoffe (z.B. DüMV)

Um das Projektziel im Arbeitsbereich Emissionen und Reststoffe zu erreichen und damit verbunden eine signifikante Verbesserung der BHKW-Abgasemissionen zu gewährleisten, muss zunächst untersucht werden, inwieweit die aktuell auftretenden Emissionen vom Brennstoff abhängig sind. Nur durch die Kenntnis der natürlichen Schwankungsbreite in der Brennstoffqualität können regelungstechnische Abläufe so robust ausgelegt werden, dass die sichere Einhaltung der strengen Zielvorgaben stets gewährleistet ist. Hierzu wurden parallel zu anderen Messfahrten die BHKW-Abgasemissionen, zunächst technisch unbeeinflusst, erfasst. Ein aktives Eingreifen, zur Reduzierung dieser, fand ausdrücklich nicht statt. Als Beispiel werden in Abbildung 1-20 die Emissionen bei der Verwendung von KUP-HHS, denen von Standard-HHS (Abbildung 1-21) gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass bei den CO-Emissionen bei beiden Brennstoffen der verwendete Oxidationskatalysator aufgrund des ausreichenden Sauerstoffangebotes im Abgas gut arbeitet und es zu keinen messbaren CO-Emissionen während der Versuchsfahrt kommt. Problematischer sieht es hingegen bei den Stickoxidemissionen aus. Aufgrund des hohen Sauerstoffangebotes für den Katalysator werden zwar die CO-Emissionen minimiert, ein Umsatz von Stickoxiden findet in dieser Atmosphäre jedoch nicht statt. Besser verdeutlicht wird dies in Abbildung 1-19.

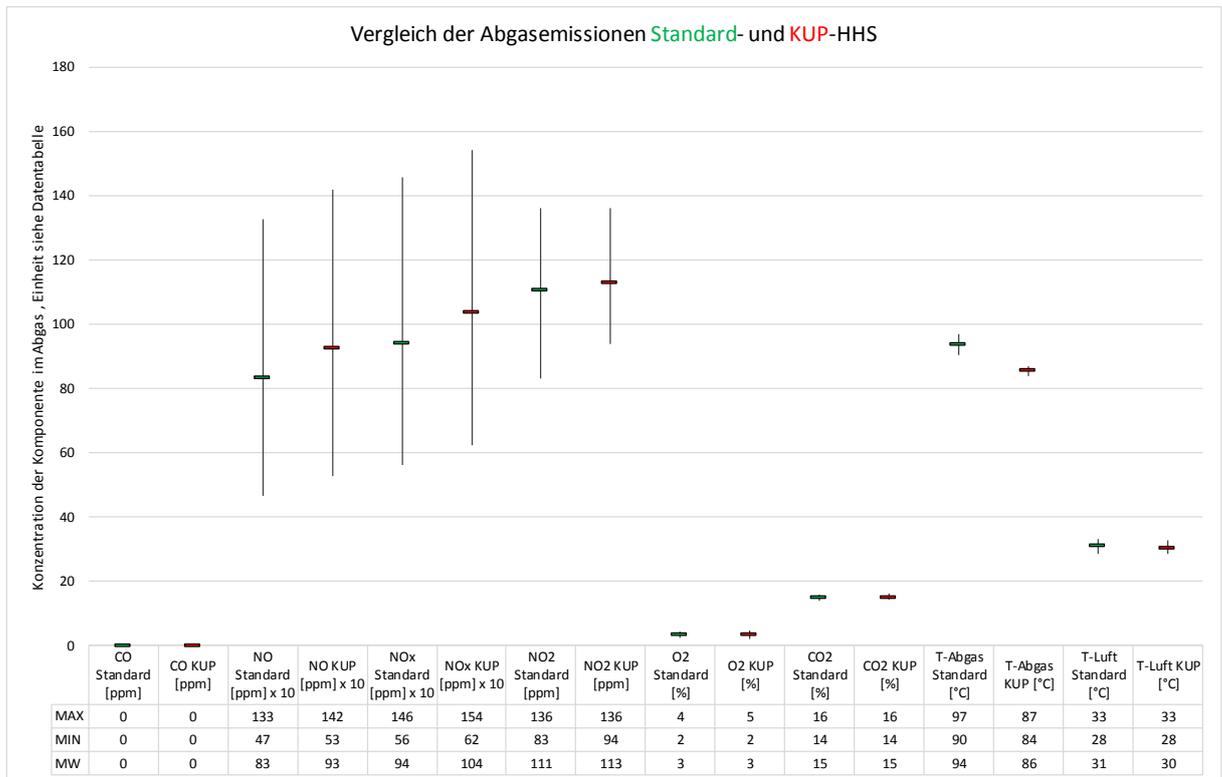


Abbildung 1-19: Vergleich der Abgasemissionen Standard- und KUP-HHS

Gut zu erkennen, sind die höheren Stickoxidemissionen bei der Verwendung von KUP-HHS. Es besteht die Vermutung, dass der höhere Stickstoffanteil im Brennstoff hierfür verantwortlich ist. Insbesondere die höhere Abgastemperatur bei Standard-HHS ist zu beachten, da höhere Abgastemperaturen auch höhere Stickoxidemissionen begünstigen. Bei gleicher Abgastemperatur wären demnach die Stickoxidemissionen der KUP-HHS vermutlich noch etwas höher. Da die Verwendung von KUP-HHS deutlich problematischer ist, als die Verwendung von Standard-HHS und die Entwicklungsarbeiten daher mit selbigen erfolgen, müssen die Erreichten Emissionsminderungspotenziale so hoch sein, dass ein sicheres Einhalten der selbst gewählten Grenzwerte auch für KUP-HHS gewährleistet werden kann.

Der Empfänger dieses Dokumentes ist verpflichtet, die hierin enthaltenen Informationen gemäß den vertraglich geregelten Geheimhaltungsbestimmungen zu behandeln.

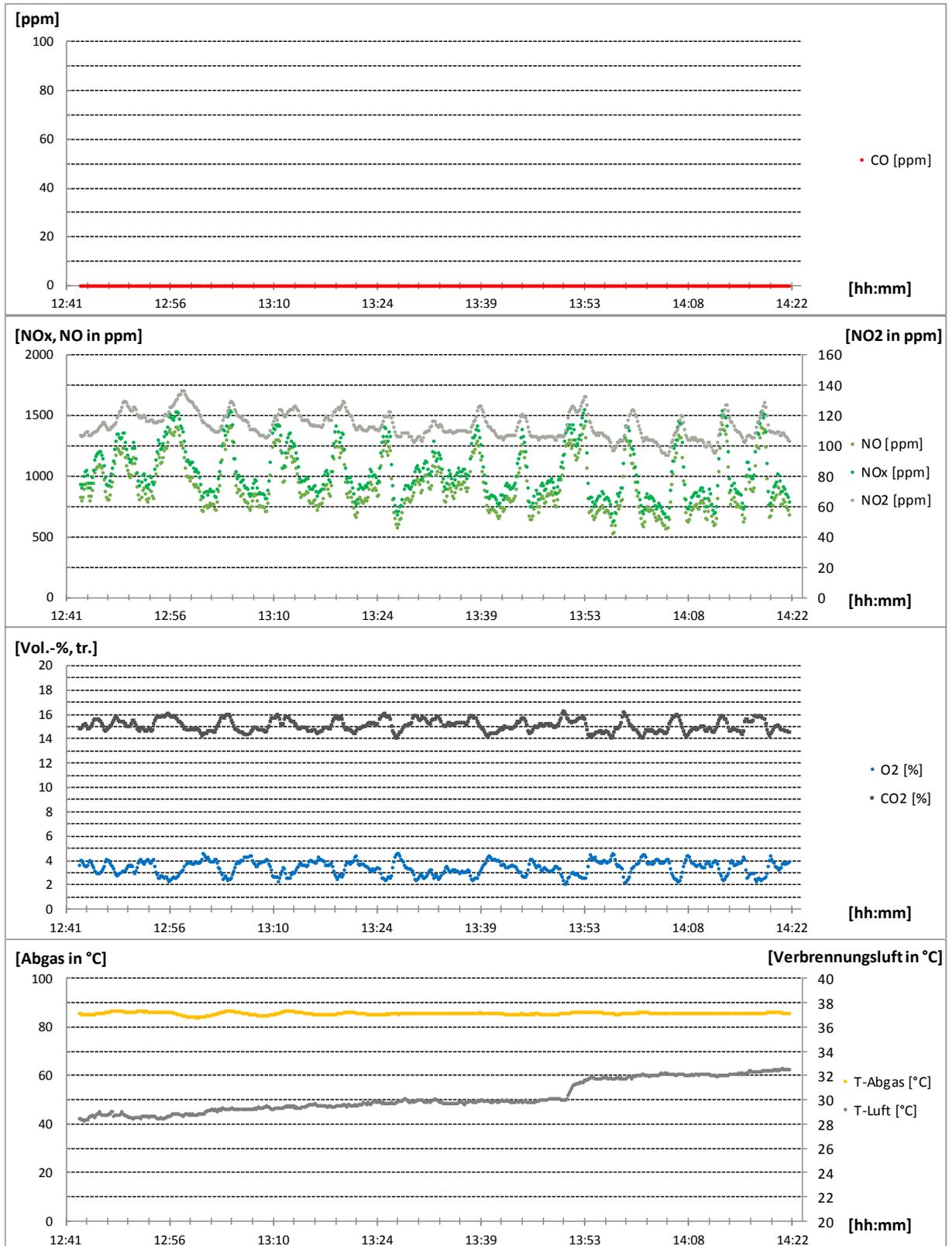


Abbildung 1-20: Abgasemissionen BHKW nach KAT, KUP-HHS; 8.4.2016

Der Empfänger dieses Dokumentes ist verpflichtet, die hierin enthaltenen Informationen gemäß den vertraglich geregelten Geheimhaltungsbestimmungen zu behandeln.

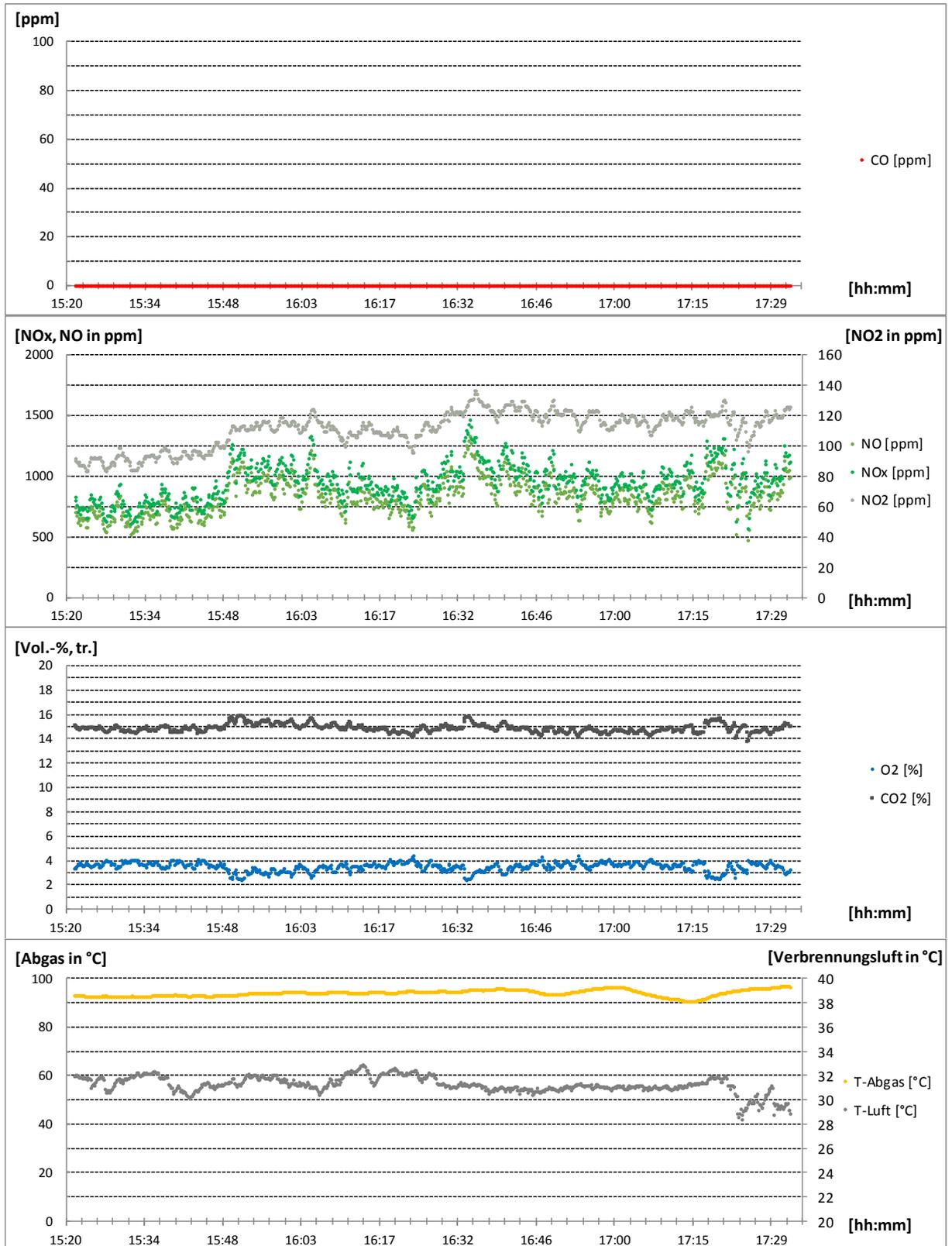


Abbildung 1-21: Abgasemissionen BHKW nach KAT, Standard HHS; 13.4.2016

2 Andere wesentliche Ereignisse

- Einstellung Herr Dr.-Ing. Ulf Sénéchal zum 19.01.2016 mit 0,75 VZÄ
- Durchführung eines internen Kick-Off-Meetings mit allen Projektbeteiligten der HSZG am 28.01.2016 mit Bildung von Arbeitsgruppen und Ernennung von entsprechenden Verantwortlichen
- regelmäßig (aller 2 Wochen) stattfindende Abstimmungen der unterschiedlichen Arbeitsgruppen (AG) in Form von AG-Verantwortlichen-Treffen
- Abstimmungstreffen mit Spanner Re² GmbH und Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH zu katalytischen Versuchen am 17.02.2016
- Einstellung Herr Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze zum 01.03.2016 mit 1,0 VZÄ

Veröffentlichungen

- Zschunke, T., Bräkow, D.: Holzvergasung zeigt deutliche Fortschritte, Holz-Zentralblatt Nummer 8, S. 216-218, 26.02.2016
- Durchführung einer internationalen Fachtagung „Biomass to Power and Heat“ in Zittau, 01.-02.06.2016 (Prof. Zschunke, Hr. Schneider, Fr. Weidner)
- Sénéchal, U., Salomo, B., Zschunke, T.: Posterbeitrag „Untersuchungen zum Temperatur- und Konzentrationsfeld in der mechanisch bewegten Festbett-Vergasungsschicht“ und Teilnahme an der DGMK-Tagung „Konversion von Biomassen und Kohlen“, 09.-11.05.2016 in Rotenburg a.d.F.
- Pressemitteilung des SMUL für Wald & Forst | Landwirtschaft | Energie | Umwelt: „Zittau diskutiert die Zukunft der Bioenergie“, Medienservice Sachsen, 01.06.2016
- Zschunke, T., Kurz, M.: Schad- und Nährstoffgehalt im Holz und seiner festen Rückstände aus einem Holzgas-BHKW, Vortrag zum Feldtag Gut Krauscha, Klein-Krauscha, 24.06.2016
- Holz-Zentralblatt: Umweltminister warnt vor Fehlanreizen, Artikel zur Tagung „Biomass to Power and Heat 2016“, Holz-Zentralblatt Nummer 25, S. 656, 24.06.2016

3 Stand des Vorhabens

Vergleich des Standes des Vorhabens mit dem ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung der SAB geänderten) Arbeits-, Zeit- und Finanzierungsplan.

AP/MS	Zeitplan	aktueller Stand
AE1.1	10/15 bis 03/16	abgeschlossen
AE1.2	03/16 bis 04/17	offen
AE1.3	04/17 bis 12/17	in Bearbeitung
AE2.1	07/16 bis 12/16	in Bearbeitung
AE2.2	12/16 bis 12/18	offen
AE2.3	07/18 bis 02/19	offen
AE3.1	11/17 bis 09/18	in Bearbeitung
AE3.2	02/18 bis 08/18	offen
AE3.3	09/18 bis 02/19	offen
Meilensteine		
M 1	03/2016	erfolgt
M 2	03/2017	offen
M 3	12/2017	offen

Tabelle 3-1: Soll-Ist-Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung

4 Notwendige Änderungen der Zielsetzung

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

- nein

5 Ergebnisse und Schutzrechte von dritter Seite

- nein

6 Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte

- keine

7 Anwendungen und geplante Verwertung der Projektergebnisse

TCV III	Stand: 16.03.2016 Rev.: 0 Seite 58 von 58

Literatur-/Quellenverzeichnis (ausgewählte)

- [1] M. Schneider, „Experimentelle und mathematische Modellierung der Festbettvergasung am Beispiel der Gleichstromvergasung von Holzhackschnitzeln - ein Beitrag zur Erhöhung der Prozeßtransparenz,“ 2003.
- [2] P. Basu, Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical Design and Theory, Elsevier, 2012.
- [3] M. Frenklach, T. Bowman, G. Smith und B. Gardiner, *GRI-Mech 3.0*, 2000.
- [4] K. Kwiatkowski, P. Zuk, M. Dudyński and K. Bajer, "Pyrolysis and gasification of single biomass particle – new openFoam solver," *Journal of Physics: Conference Series*, no. volume 530, number 1, 2014.