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

3. 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) Ralf Pohl Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider Dr.-Ing. Ulf Sénéchal Dipl.-Ing. (FH) Stella Silbermann M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze Dipl.-Ing. Steffen Grusla
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2015 – 30.04.2019
Berichtszeitraum/Datum:	01.07.2017 – 30.06.2018

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

Änderungen:

Änderung	*Datum*	*Status*
Erstellt	25.05.2018	Rev. 0
Änderungen AP2	14.08.2018	Rev. 1
Änderungen AP1 und AP3	20.08.2018	Rev. 2
Änderungen AP1 und AP3	22.08.2018	Rev. 3
Formatierungen	23.08.2018	Rev. 4

Abstract:

Der vorliegende Zwischenbericht zum Vorhaben TCV III beinhaltet die Darstellung aller zwischen dem 01.07.2017 und dem 30.06.2018 durchgeführten Arbeiten.

Freigabe:

Autor(en)	**Geprüft**
	Freigegeben
89 Seiten	

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

Inhaltsverzeichnis:

Inhaltsverzeichnis: 3

Abbildungsverzeichnis: 4

Tabellenverzeichnis: 8

1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse 9

1.1 Zusammenfassung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse 9

1.2 Darstellung nach Arbeitseinheiten 10

2 Andere wesentliche Ereignisse 84

3 Stand des Vorhabens 87

4 Notwendige Änderungen der Zielsetzung 88

5 Ergebnisse und Schutzrechte von dritter Seite 88

6 Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte 88

7 Anwendungen und geplante Verwertung der Projektergebnisse 88

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

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1-1: Verlauf der Zusammensetzung des Produktgases während einer Messfahrt, Vergleich Messsysteme Födisch und Eheim 12
Abbildung 1-2: Verlauf der CO-Konzentration (Messkoffer Eheim) im Produktgas während einer Messfahrt bei Änderung der Raumtemperatur 13
Abbildung 1-3: Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Produktgas während einer Messfahrt sowie des Differenzdruckes über dem Gewebefilter, Vergleich Messysteme Födisch und Eheim 14
Abbildung 1-4: Verlauf der Zusammensetzung des Produktgases während einer Messfahrt, Vergleich Messsystem Mikro-GC und Eheim 15
Abbildung 1-5: Beispielhafte Verläufe des erfassten Wassergehaltes im Motorabgas 16
Abbildung 1-6: Holzhackschnitzel-Transportsystem zur Befüllung des Schubbodencontainers 17
Abbildung 1-7: vereinfachtes CAD-Schema ausgewählter Bauteile des Holzvergasers 18
Abbildung 1-8: Messwerte eines Geschwindigkeitsprofils im Nennbetrieb, Randbereich gemäß Potenzgesetz modelliert 20
Abbildung 1-9: Dimensionslose Darstellung der Messreihe 2 21
Abbildung 1-10: 3D-Profil durch Rotieren der Ausgleichsfunktion 23
Abbildung 1-11: Ablagerungen entlang der Rohrsohle (links); Kondensationserscheinungen während des Anfahrvorganges (rechts) 24
Abbildung 1-12: Reflexionen am Schauglas bei Vorversuchen (links); Reflexionen auf der Sende-/Empfangslinse des LDA-Leihsystems während der Messung (rechts) 26
Abbildung 1-13: durch Zugwirkung der Kette verformtes Gehäuseteil 27
Abbildung 1-14: verbogene Mitnehmer des Kratzkettenförderers 27
Abbildung 1-15: verbogenen Kettenglieder des Kratzkettenförderers 27
Abbildung 1-16: Skizze der vermuteten Ursache für den Kratzkettendefekt 29
Abbildung 1-17: Konstruktionszeichnung des Schneckenfördersystems als Ersatz des bisherigen Kratzkettenförderers 30
Abbildung 1-18: Biomassetrocknungsanlage nach Abbau des Kratzkettenförderers, Trommelfilter und Abluftrohrleitungen 31
Abbildung 1-19: Installiertes Schneckenfördersystem 31

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

Abbildung 1-20: Lastengerüst und neu installiertes Abluftrohr zwischen Silotrockner und Wärmerückgewinnung 32
Abbildung 1-21: Übergabetrog zwischen Schubbodencontainer und Schneckenfördersystem 33
Abbildung 1-22: Gaslaufplan der Permanentgasanalyse inkl. Gasaufbereitung, eigene Darstellung nach [3] 34
Abbildung 1-23: Verfahrensfließschema der Systemsimulation 36
Abbildung 1-24: Ergebnisse der CFD-Simulation des Pufferspeichers (Druck, Temperatur und Oberflächennetz nach einer simulierten Zeit von 6 Tagen) 37
Abbildung 1-25: Vergleich der Abkühlkurven des Pufferspeichers 38
Abbildung 1-26: Ergebnisse der Stoffstrombilanz einer Messfahrt 39
Abbildung 1-27: Ergebnisse der Energiestrombilanz einer Messfahrt 40
Abbildung 1-28: Gemessene Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min 41
Abbildung 1-29: Gemessene zeitliche Ableitung der Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min 41
Abbildung 1-30: Gemessene und simulierte Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min 42
Abbildung 1-31: Gemessene und simulierte zeitliche Ableitung der Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min 43
Abbildung 1-32: Simulierte zeitliche Ableitung der Massenabnahme der verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min 44
Abbildung 1-33: Strömungssimulation im RB-LWS (hf), links: Strömung durch Bündelrohre, rechts: Strömung durch Mantelraum 46
Abbildung 1-34: Granulat der Probe 1 in Silikonform, rechts: Lufteinschlüsse auf Rückseite der erstarrten Probe 2 47
Abbildung 1-35: ROMONTA-Proben 1, 2 und 3 48
Abbildung 1-36: Plattenapparatur zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Probenplatten 48
Abbildung 1-37: Links: Plättchenprobe, Rechts: Kehlnahtprobe 50
Abbildung 1-38: Innenaufbau der Zyklierapparatur 51

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

Abbildung 1-39: Typischer Temperaturverlauf eines Heiz- und Kühlzyklus hier am Beispiel des RT80HC 52
Abbildung 1-40: Links: Latentwärmespeicher (hf) im Zittauer Kraftwerkslabor während Druckprüfung, Rechts: - mit Iso. 56
Abbildung 1-41: Links: Zur Hälfte berohrte Bündelaufhängung des RB-LWS (hf), Rechts: mit äußerer Lochscheibe gequetschte Bündelaufhängung 57
Abbildung 1-42: Links: An Biomasse-Vergasungsanlage gekoppelter Produktgasspeicher, Rechts: Spülen des Speichers mit Stickstoff aus einer Gasflasche 59
Abbildung 1-43: Verlauf der Gaszusammensetzung im Speicher während des Speicherzyklus 60
Abbildung 1-44: Setups der Pulsationsversuche 62
Abbildung 1-45: Versuchsaufbau im Setup 4 mit Bauteilerläuterungen 64
Abbildung 1-46: Messdaten des Setup 0.3; 0,6 m/s; 2,6% Dämpfungsgrad 65
Abbildung 1-47: Messdaten des Setups 3.1; 0,4 m/s; Kükenhahn-Stellung 0°, 74% Dämpfungsgrad 65
Abbildung 1-48: Histogramm Setup 3.1 von Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten orientiert am Mittelwert 66
Abbildung 1-49: Dämpfungsgrade aller Versuchssetups als Säulendiagramm 69
Abbildung 1-50: Standardisierte Eigenschaften des Lufterhitzers LE 10000 DF-R HT (Herstellerangaben) 71
Abbildung 1-51: Lufterhitzer zur Vergasungsluftvorwärmung 72
Abbildung 1-52: Bisherige Vergasungsluftzufuhrstrecke zwischen „Gas-Gas-Wärmeübertrager“ und Reformer 72
Abbildung 1-53: zerkleinertes MDF-Material 74
Abbildung 1-54: Probe der Gärrestpellets 74
Abbildung 1-55: Ergebnisse der ersten Tests zur Kohlenstoffseparierung aus dem Reststoff des Holzvergasers, [7] 75
Abbildung 1-56: Messung des Gesamtstaubgehaltes im Motorabgas 77
Abbildung 1-57: Messung der organischen Stoffe (Gesamt-C) im Motorabgas mittels FID 77
Abbildung 1-58: CAD-Konzeptdarstellung zur KAT-Strecke, [8] 77
Abbildung 1-59: Konzeptskizze zur KAT-Strecke, [8] 78

Abbildung 1-60: Emissionswerte vor und nach Einsatz der Rauchgasrezirkulation 79

Abbildung 1-61: Vergleich Gasanalysemsysteme – Trend der gemessenen Motorabgaskomponenten 81

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

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

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1-1: Zusammenfassung der Ergebnisse im Nennbetrieb 22
Tabelle 1-2: Ergebnisse von Stoffwertuntersuchungen der ROMONTA-Proben 49
Tabelle 1-3: Untersuchte Stahl/PCM-Paarungen 50
Tabelle 1-4: Massebezogene Änderungen für Stahl 1.0038 53
Tabelle 1-5: Massebezogene Änderungen für Edelstahl 1.4301 54
Tabelle 1-6: Massebezogene Änderungen für Edelstahl 1.4404 55
Tabelle 1-7: Erläuterungen zu den Versuchssetups 61
Tabelle 1-8: Ergebnisübersicht der Pulsationsmessungen 68
Tabelle 1-9: Grenzwerte der Emissionen (alles bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Bio- oder Klärgas, FWL < 3 MW, in Anlehnung an TA Luft 2002 76
Tabelle 1-10: Vergleich Gasanalysensysteme - Tagesmittelwerte 82
Tabelle 1-11: Vergleich Gasanalysensysteme – Differenz Tagesmittelwerte 83
Tabelle 3-1: Soll-Ist-Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung 87

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

1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

1.1 Zusammenfassung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Das im AE1.2 enthaltene Thema der berührungslosen Volumenstrommessung mittels Laser-Doppler-Anemometer ist noch nicht abgeschlossen und wurde weiterbearbeitet. Das bestellte LDA-System der Firma TSI konnte auch nach Verlängerung der Wartezeit nicht geliefert werden, so dass eine Stornierung der Bestellung und eine erneute Ausschreibung erfolgten. Erste Ergebnisse und Erfahrungen mit einem versuchsweise ausgeliehenen LDA-Gerät konnten gesammelt werden und die Ergebnisse bei der Neuausschreibung genutzt werden.

Die Quantifizierung der Wärmeverluste des Gesamtsystems über die Oberflächen der Anlagenbauteile durch Konvektion und Strahlung wurde im Berichtszeitraum weitergeführt.

Die Entwicklung und Anwendung von Simulationsbausteinen (UAE13) wurde nur bei zusätzlich freiwerdenden personellen Kapazitäten aufgrund von Anlagenstörungen weiterbearbeitet. Ansonsten wurde die Thematik der Simulation im Wesentlichen vor dem Hintergrund der Prozessdynamik bearbeitet.

Im AP2 sind die Unterarbeitsetappen UAE221, UAE223 und UAE224 gemäß der Planung abgeschlossen. Dabei konnte ein thermischer Speicher auf Basis von PCM-Technologie und ein druckbeladener Brenngasspeicher im Labormaßstab eingerichtet und zum Teil vermessen werden. In der Planung des thermischen Speichers sind Verzögerungen aufgrund von Lieferschwierigkeiten aufgetreten, welche die Vermessung in den Berichtzeitraum des Folgeberichtes verschob. Trotz dieser Verzögerung befindet sich die Projektbearbeitung des Arbeitspaketes Speichertechnologien im Zeitplan. Bezüglich der in Auftrag gegebenen Korrosions- bzw. Zyklierversuche konnte der Abschlussbericht mit aussagekräftigen Ergebnissen hinsichtlich der Verträglichkeit zwischen Behältermaterialien und PCM entgegengenommen werden. Diese Ergebnisse werden bei der Wahl eines geeigneten Behältermaterials für einen Demonstrator-Speicher an der Biomasse-Vergasungs-Anlage eine wichtige Rolle spielen. Untersuchungen am Produktgasspeicher ergaben Rückschlüsse über die Produktgaszusammensetzung nach einem Speicherzyklus und den Pulsationsdämpfungseigenschaften eines Behältervolumens in einer Gasleitung. Somit konnten wichtige Daten für die Integration derartiger Systeme in eine Biomassevergasungsanlage gesammelt werden.

Ein neues Fördersystem zur Befüllung des Schubbodencontainers unter Verwendung von Förderschnecken wurde installiert und vereinfacht diesen Vorgang erheblich. Als Ersatz für

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

den defekten Kratzkettenförderer für den Transport der Holzhackschnitzel (HHS) vom Schubbodencontainer zum Trockner wurden ebenfalls Förderschnecken installiert. Der dafür nötige Übergabetrog vom Schubbodencontainer ist eine Eigenkonstruktion und bedarf weiterer Optimierungen.

Hinsichtlich der Überprüfung der Produktgaszusammensetzung wurden neue Erkenntnisse zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der verschiedenen Messgeräte gewonnen.

Bezüglich der Abgasemissionen wurde der Aufbau der neuen Katalysatorstrecke fortgeführt und die entsprechende Neukonstruktion bestellt. Die technische Umsetzung der Rauchgasrezirkulation ist erfolgt und wird standardmäßig verwendet. Darüber hinaus wurde die Abgasstrecke um Messgeräte zur Wassergehalts- und Staubmessung erweitert und Testmessungen bezüglich C-Gesamt mit Hilfe eines versuchsweise eingesetzten Messgerätes durchgeführt. Um die Genauigkeit der erfassten Abgaszusammensetzungen einzuschätzen wurden parallele Untersuchungen mit mehreren Messgeräten durchgeführt. Zur besseren Bestimmung der Abgaszusammensetzung, insbesondere im Hinblick auf Kohlenwasserstoffe wie Benzol und Formaldehyd, wurden umfangreiche Recherchen und Gespräche mit Herstellern und Anwendern geführt. Ergebnis dieser Arbeiten ist die Auswahl, Ausschreibung und Bestellung eines FTIR-basierten Gasanalysesystems der Firma ANSYCO GmbH.

1.2 Darstellung nach Arbeitseinheiten

AP1 - Verfahrensentwicklung, Systemanalyse, Modellierung und Regelung

Im Rahmen des Berichtszeitraumes wurden zur detaillierten Analyse des derzeitigen Standes der Biomassevergasungsanlage 13 Versuchsfahrten durchgeführt. Bei 7 dieser Versuche wurden die Messdaten einer umfassenden Auswertung (u.a. Stoff- und Energiestrombilanzierung) zugeführt. Dies beinhaltete u.a. eine Langzeitmessfahrt (Auswertungszeitraum >48 h) sowie einen Versuch zum Einsatz des entwickelten Produktgasspeichers (Auswertung im AP2). Der überwiegende Anteil der Messfahrten beinhaltete jedoch die umfangreichen Testmessungen mit dem geliehenen LDA-System und diente darüber hinaus dem Test und Überprüfung der vorhandenen bzw. neu installierten Mess- und Anlagentechnik.

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

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

Dieser Arbeitseinheit wurde mit Erreichen des ersten Meilensteins und Abgabe des 1. Zwischenberichtes abgeschlossen. Im aktuellen Berichtszeitraum sind jedoch noch einige ergänzende bzw. messfahrtbegleitende Arbeiten wie folgt durchgeführt worden:

Messtechnische Analyse des Gesamtsystems

Um die vorhandene Messtechnik und dabei vor allem die Gasanalytik weiter zu validieren, wurde im Rahmen der Messfahrten an den Stoffströmen Produktgas und Motorabgas mit verschiedenen Messgeräten parallel gemessen. Dabei mussten besonders identische Sensorkalibrierungen, vergleichbare Messstellen und die Stoffstromparameter (Temperatur, Druck) berücksichtigt werden.

Beispielhaft hierfür sind in Abbildung 1-1 die durch zwei Gasanalytiksysteme erfassten Produktgaszusammensetzungen dargestellt. Ersichtlich ist, dass die Konzentrationen von H_2 und CO_2 unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten sehr gut miteinander vergleichbar sind. Die Ergebnisse für CH_4 und CO weisen geringe Unterschiede auf. Die durchweg höhere CH_4-Anteil des Messkoffers Visit03H der Fa. Messtechnik Eheim GmbH kann mit der Beeinflussung des Sensorsignals durch weitere im Produktgas enthaltene längerkettige Kohlenwasserstoffe (wie Ethen, Ethan etc.) erklärt werden, wohingegen die Infrarotsensorik im MGA09 der Fa. Födisch Umweltmesstechnik AG unempfindlicher ggü. den höheren Kohlenwasserstoffen ist. Die ebenfalls tendenziell höhere CO-Konzentration des Eheim-Gerätes wird durch die Temperaturabhängigkeit des CO-Sensors begründet. Da die Raumtemperatur durch den Anlagenbetrieb im Verlauf der Messfahrt ggü. dem Zeitpunkt der Kalibrierung weiter steigt, driftet auch die CO-Konzentration und der Unterschied zwischen den beiden CO-Sensoren steigt weiter an. Der CO-Sensor in der Födisch-Permanentgasanalyse wird aufgrund seiner Installation in einem Gasschrank und dessen Standort außerhalb des Versuchsraumes nicht durch die steigenden Raumtemperaturen beeinflusst.

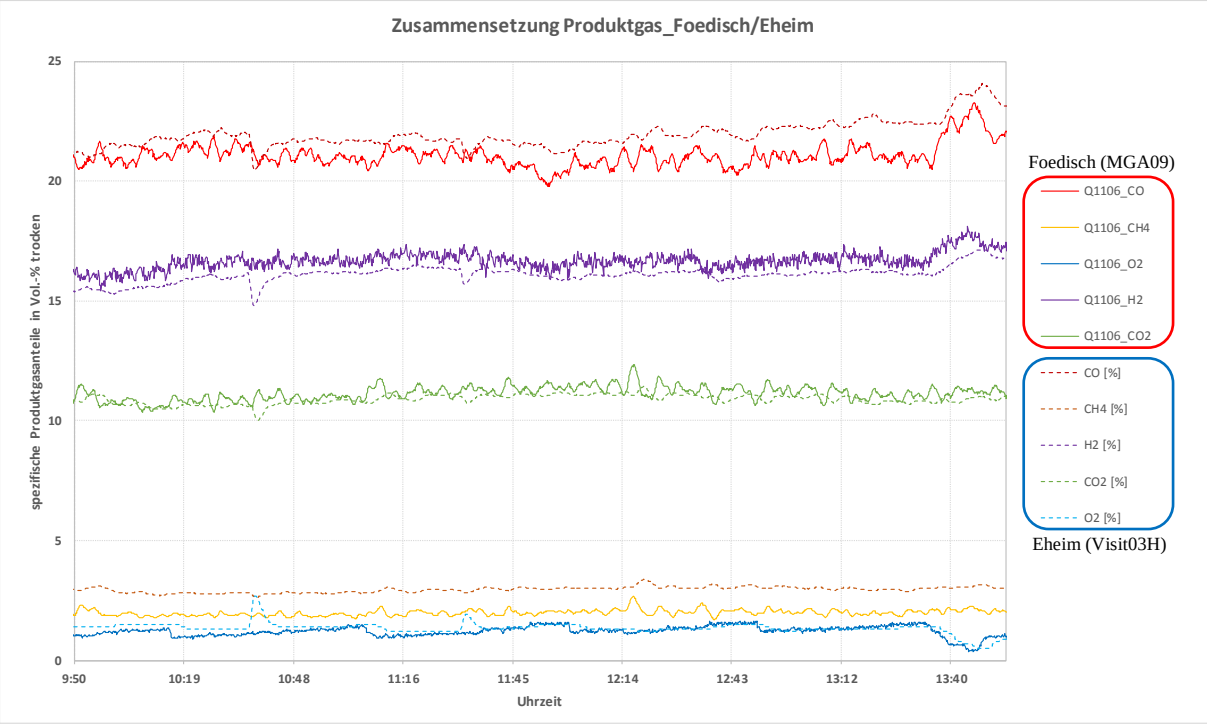

Abbildung 1-1: Verlauf der Zusammensetzung des Produktgases während einer Messfahrt, Vergleich Messsysteme Födisch und Eheim

Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 1-2 der Verlauf der CO-Konzentration und der Raumtemperatur dargestellt. Ersichtlich ist die Abhängigkeit des CO-Anteils von der Raumtemperatur vor allem im Bereich um 07:00 Uhr. Hier wurde durch kurzes Stoßlüften die Raumtemperatur gesenkt. In Folge dessen veränderte sich auch der CO-Anteil, obwohl keine signifikanten Prozessänderungen auftraten. Durch Wiederholung dieses Vorgehens konnte die Abhängigkeit reproduziert und somit bestätigt werden. Um diesen Einfluss zu vermeiden, sollen bei zukünftigen Messfahrten während dieser mehrere Kalibrierungen durchgeführt werden und eine möglichst konstante Raumtemperatur durch ein verbessertes Lüftungsmanagement gewährleistet werden.

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

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

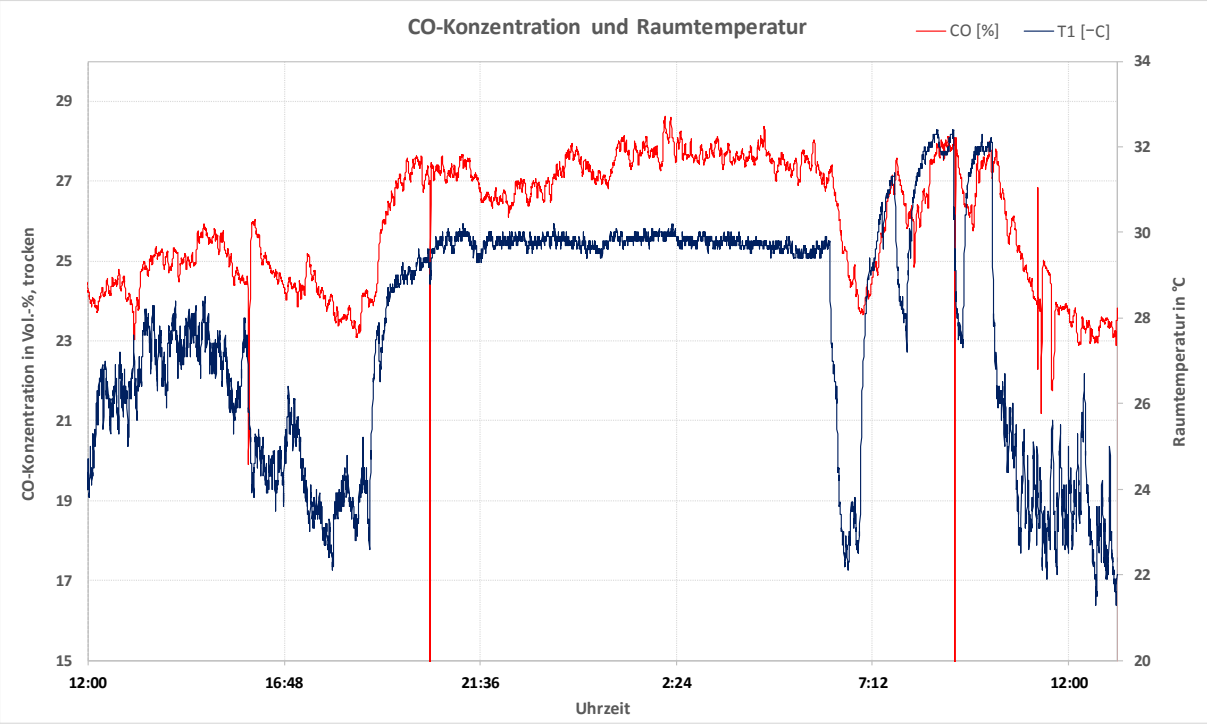

Abbildung 1-2: Verlauf der CO-Konzentration (Messkoffer Eheim) im Produktgas während einer Messfahrt bei Änderung der Raumtemperatur

Weiterhin ist in Abbildung 1-1 ein geringer sich zyklisch verändernder O_2-Anteil ersichtlich, der sowohl durch die Permanentgasanalyse (Födisch MGA09) als auch durch den Messkoffer (Eheim Visit03H) erfasst wird. Um den Zyklus zu verdeutlichen ist in Abbildung 1-3 ein zeitlicher Abschnitt, die dazugehörige O_2-Konzentration des jeweiligen Messsystems und der Differenzdruck über dem Gewebefilter dargestellt. Die erkennbar ähnlichen Verläufe deuten auf eine Abhängigkeit von den Unterdruckverhältnissen in der Gasleitung und somit auf eine Undichtigkeit der Messgasabsaugung oder der Messgasaufbereitung hin. Der Zyklus entsteht durch das Abreinigungsverhalten des Gewebefilters. Nach der Abreinigung ist der Unterdruck in der Gasleitung geringer, da der Gewebefilter nahezu frei von Partikeln ist und in Folge dessen der Umkehrpunkt zwischen Über- und Unterdruck durch das Zusammenspiel zwischen Gebläse (Druckwirkung) und Motor (Saugwirkung) in Richtung des Motors wandert. Bei fortlaufendem Anlagenbetrieb baut sich auf dem Gewebe des Filters ein s.g. Filterkuchen auf, der einen entsprechenden Druckverlust hervorruft und der Umkehrpunkt zwischen Über- und Unterdruck in der Gasleitung wandert wieder in Richtung Gewebefilter. Da sich die Messgasabsaugungen zwischen Gewebefilter und Motor befinden, werden die Gasdruckverhältnisse

an den Messstellen signifikant beeinflusst. Um eine Unabhängigkeit von den Gasdruckverhältnissen zu erreichen, muss die Messgasentnahme über eine zusätzliche Gaspumpe erfolgen.

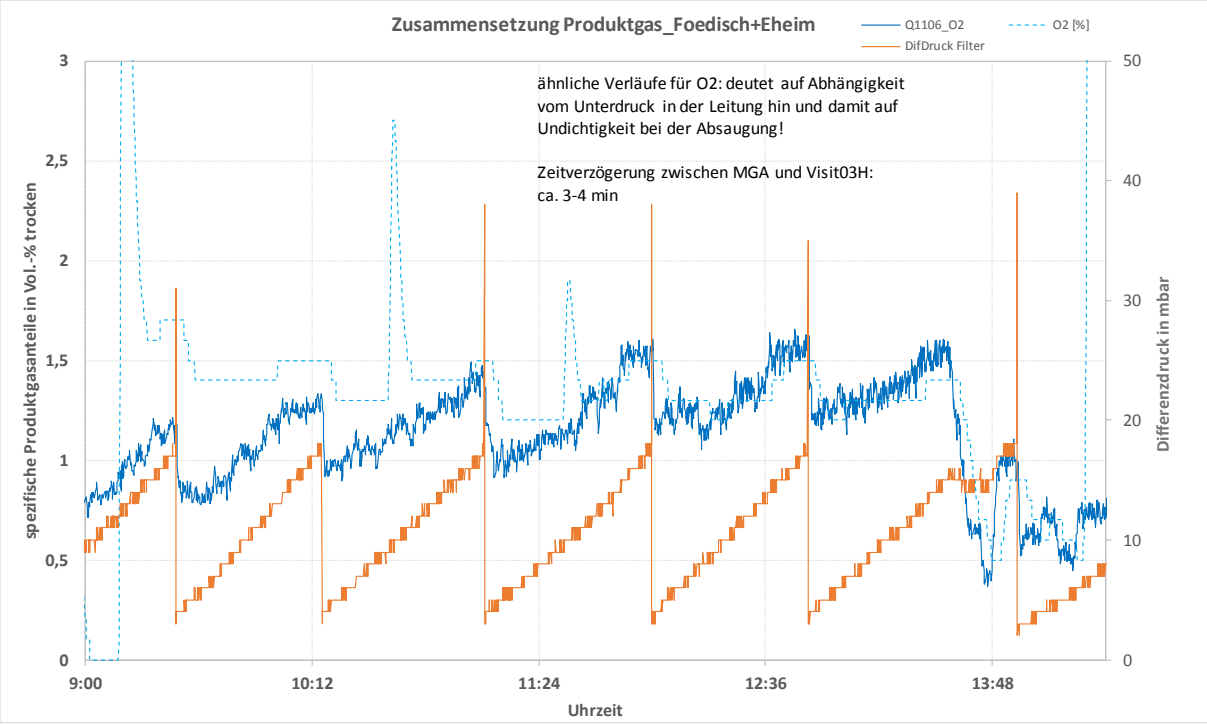

Abbildung 1-3: Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Produktgas während einer Messfahrt sowie des Differenzdruckes über dem Gewebefilter, Vergleich Messysteme Födisch und Eheim

Darüber hinaus wurde gemeinsam mit dem DBFZ am 12.10.17 eine Messfahrt am Laborversuchsstand zur Biomassevergasung des DBFZ durchgeführt und die beiden baugleichen Mikro-Gaschromatographen (Mikro-GC) der Einrichtungen parallel eingesetzt. Durch diese gemeinsame Messfahrt konnten diverse Einstellungsparameter, besondere Hinweise zum Gerätehandling sowie die Analysenergebnisse miteinander abgeglichen und somit sowohl die Messdatenqualität als auch die Auswertungsroutine deutlich gesteigert werden.

Auch ein Messdatenvergleich der Produktgasanalyse zwischen dem Mikro-GC und der auf Infrarot- und Wärmeleitfähigkeitsensoren basierenden Analyseeinheit Visit03H der Fa. Eheim wurde durchgeführt. Ein zeitlicher Auszug hierzu ist in Abbildung 1-4 dargestellt. Ersichtlich ist dabei der signifikant große Unterschied der Konzentration an CO_2. Die zeitlich immer größer werdende Abweichung hinsichtlich des CO-Anteils liegt an dem zuvor beschriebenen

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

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

Temperatureinfluss des sich aufheizenden Versuchsraumes auf den entsprechenden Infrarotsensor. Die weiteren Produktgaskomponenten sind unter Berücksichtigung der jeweiligen Messunsicherheit miteinander vergleichbar.

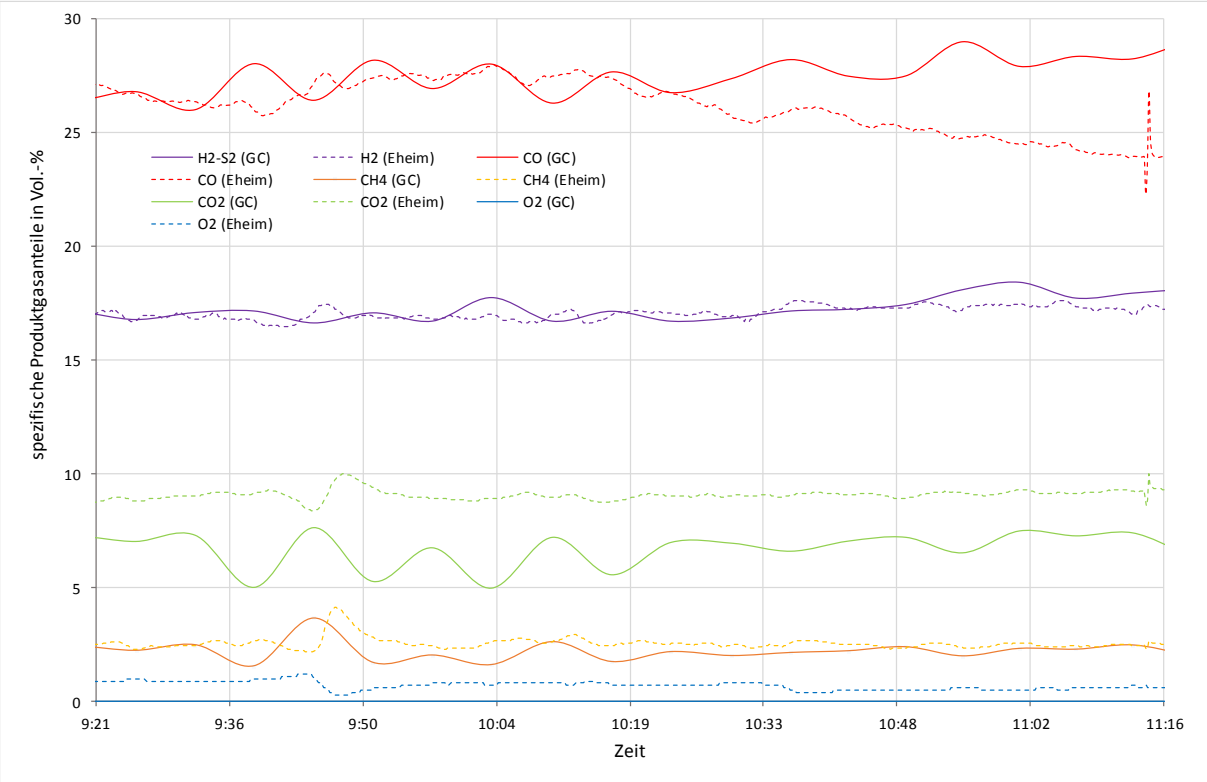

Abbildung 1-4: Verlauf der Zusammensetzung des Produktgases während einer Messfahrt, Vergleich Messsystem Mikro-GC und Eheim

Anlagentechnische Analyse des Gesamtsystems

Die Konzeption zum Umbau der Abgasstrecke nach dem BHKW wurde weitergeführt und die entsprechende Fertigung der Messstrecke in Auftrag gegeben. Darüber hinaus konnte die Konzeption einer zusätzlichen und regelbaren **Vorwärmung des Vergasungsmittels Luft** abgeschlossen und die notwendigen Komponenten bestellt werden. Ausführlichere Informationen hierzu können den Ergebnissen des AP3 entnommen werden.

Weiterhin erfolgte ein umfangreicher Umbau der Biomassetrocknungsanlage im Zuge der Reparatur des Kratzkettenförderers. Ausführlichere Informationen hierzu können dem Abschnitt **Reparaturen** entnommen werden.

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

AE1.2 - Konzeption und Integration Messtechnik

Integration einer Online-Messung des Motorabgas-Wassergehaltes

Die vorhandene mobile Analysetechnik zur Bestimmung des Wassergehaltes in Prozessabgasen der Fa. Bartec wurde vorerst im Motorabgas eingesetzt. Dieser Parameter wird benötigt, um die Güte der Elementarbilanzierung sowohl der Gesamtanlage als auch des Motorprozesses zu verbessern. In Abbildung 1-5 sind zwei beispielhafte Verläufe des Wassergehaltes im Motorabgas während der Messfahrt dargestellt.

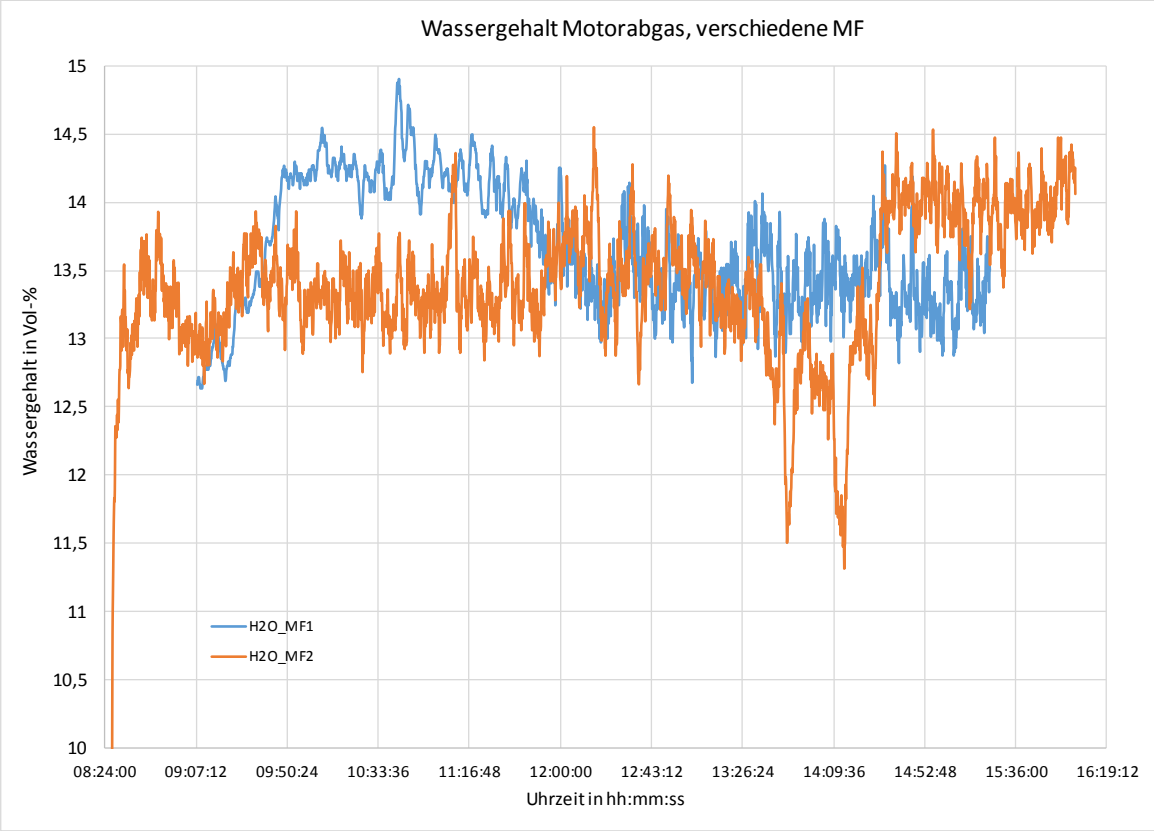

Abbildung 1-5: Beispielhafte Verläufe des erfassten Wassergehaltes im Motorabgas

Als Ergebnis der Messungen konnte die starke Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt nachgewiesen und der bisherige Annahmewert für die Stoffbilanzierung von 15 Vol.-% Wassergehalt im Motorabgas mit einer gewissen Fehlertoleranz bestätigt werden. Darüber hinaus ist es geplant, die Analytik am Biomassetrockner einzusetzen, um auch in dessen Abluft den Wassergehalt zu erfassen.

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

Konzept für Online-Messung des Brennstoff-Wassergehaltes

Die Installation und Einsatz des Holzhackschnitzel-Transportsystems (vgl. Abbildung 1-6) zur Befüllung des Schubbodencontainers wurde erfolgreich durchgeführt. Die Integration verschiedener Online-Messverfahren zur Qualitätsüberwachung der Holzhackschnitzel (v.a. Wassergehalt) musste hingegen aufgrund des Ausfalls des Kratzkettenförderers und damit des gesamten Versuchsstandes zur Biomassetrocknung verschoben werden.

Abbildung 1-6: Holzhackschnitzel-Transportsystem zur Befüllung des Schubbodencontainers

Systembilanzierung/thermische Verluste

Bezugnehmend auf die in [1] dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der Quantifizierung der Oberflächenwärmeverluste des Gesamtsystems wurde eine weitere studentische Arbeit (Diplomarbeit, Hr. Ruben Kaiway) im Mai 2018 begonnen. Im Rahmen der Arbeit werden die Oberflächentemperaturen an definierten Messpunkten mit verschiedenen Temperaturmesssystemen (Infrarotthermometer, Oberflächenthermoelement) erfasst und die Inhalte der betrachteten Flächen durch die Nutzung eines CAD-Abbildes der Anlage berechnet (vgl. Abbildung 1-7).

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

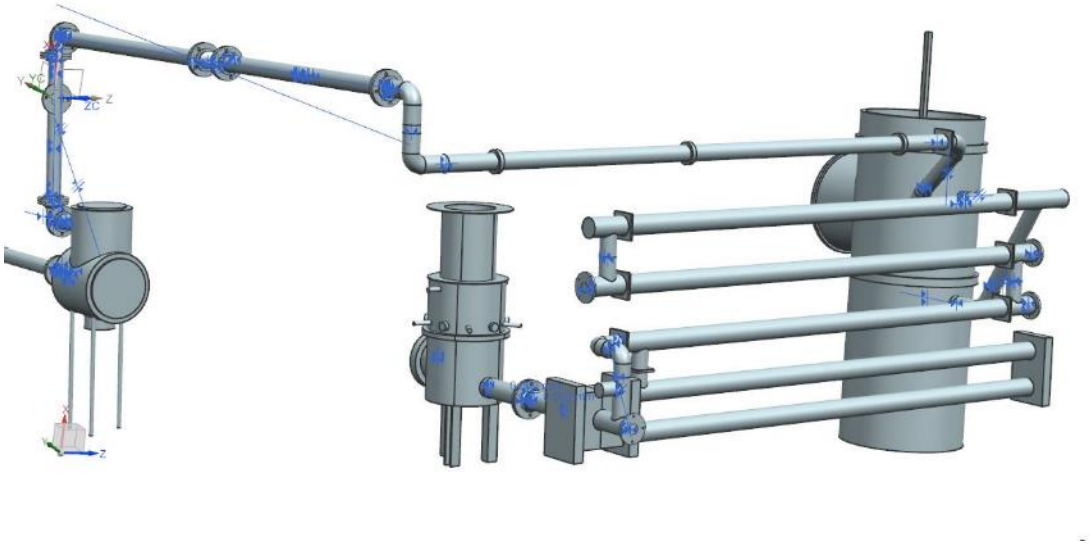

Abbildung 1-7: vereinfachtes CAD-Schema ausgewählter Bauteile des Holzvergasers

Darüber hinaus werden genauere Angaben zu den Emissionsgraden der einzelnen Werkstoffe Eingang in die Berechnung finden, um die Qualität und Belastbarkeit der Berechnungsergebnisse weiter zu steigern.

Umrüstung berührungslose Volumenstrommesstechnik

Hinsichtlich des in [1] auf S. 12-13 geschilderten Kenntnisstandes bezüglich der LDA-Messungen ergaben sich in der Zwischenzeit folgende Änderungen.

1. Der Aufbau und die Inbetriebnahme des von der TSI GmbH zugesagten LDA-Testsystems (TSI Powersight 2D) erfolgten am 06./07.11.2017. Dem zuständigen Applikationsingenieur gelang es an diesen Tagen nicht, verwertbare LDA-Signale aus dem Prozess zu erhalten. Hierzu wurden folgende Gründe benannt:

- die im Produktgas enthaltenen Partikel sind zu klein bzw. in zu geringer Anzahl vorhanden,
- die Rohrkrümmung sorgt für eine Verschiebung des Messvolumens innerhalb des Strömungsprozesses und
- die an den Oberflächen der Schauglasarmatur auftretenden Reflexionen liefern Störsignale, welche mit den eigentlichen Messsignalen nicht in Verbindung stehen.

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

2. Am 28.11.2017 wurde der TSI GmbH die 2. Verzugsanzeige per Einschreiben zugestellt. Darin wurde seitens der Hochschule Zittau/Görlitz dazu aufgefordert, die vertraglich vereinbarten Leistungen bis zum 24.01.2018 abnahmefähig zu vollenden.

3. Mit Email vom 27.12.2017, 14:00 Uhr korrigierte die TSI GmbH die vormals getätigte Aussage bezüglich des verwendbaren Partikelgrößenspektrums dahingehend, dass die für LDA-Messungen ausreichende Partikelsituation (etwa 600 Partikel/cm³) lediglich in kurzen Zeitfenstern unmittelbar nach der Abreinigung des Gewebefilters auftritt. Kurze Zeit später nehmen die groben und somit detektierbaren Partikel im Produktgasstrom bereits deutlich ab. Jene Erkenntnisse machten nun das Eindüsen von Seedingmaterial doch erforderlich. Damit ist ein erhöhter Grad an Aufwand verbunden. Die Seedingpartikel dürfen nicht mittels Druckluft erzeugt werden. Das Hinzugeben würde zu einer sofortigen Oxidation des Produktgases noch vor dem Eintritt in den Gasmotor führen. Aus diesem Grund musste das Seeding mithilfe des Inertgases Stickstoff produziert werden. Das Installieren/Wechseln der zugehörigen Gasflaschen sowie der Druckabbau, der während der Zugabe voranschreitet, sorgten für einen erhöhten finanziellen und organisatorischen Aufwand.

4. Die Leihfrist des LDA-Testsystems endete am 02.02.2018. An diesem Tag wurde das System verpackt und durch eine von der TSI GmbH beauftragte Spedition abgeholt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden Messungen am Thermochemischen Versuchsfeld bei den Betriebszuständen „Anlagenspülung“ und „Nennbetrieb“ durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse werden weiter unten vorgestellt.

5. Am 06.02.2018 trat die HSZG wegen nicht vertragsgemäß erbrachter Leistungen vom Vertrag mit der TSI GmbH zurück, da auch der in der zweiten Verzugsanzeige festgelegte Liefertermin nicht eingehalten wurde. Für eine Herstellung der Handlungsfähigkeit wurde unter Berücksichtigung neuer fachlicher Erkenntnisse umgehend eine Neuausschreibung konzipiert, welche im Zeitraum vom 06.03.-04.04.2018 lief. Nach Prüfung der Angebote erhielt am 14.05.2018 die Dantec Dynamics GmbH den Zuschlag.

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

Trotz der geschilderten Umstände konnten mithilfe des LDA-Leihsystems im Zeitraum 11/2017-01/2018 nach einer Reihe von Vorversuchen zur Untersuchung definierter Parameter auch erste erfolgreiche Messungen an der Anlage selbst durchgeführt werden. Eines der dabei aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile entlang des Schauglasdurchmessers ist beispielhaft in Abbildung 1-8 dargestellt.

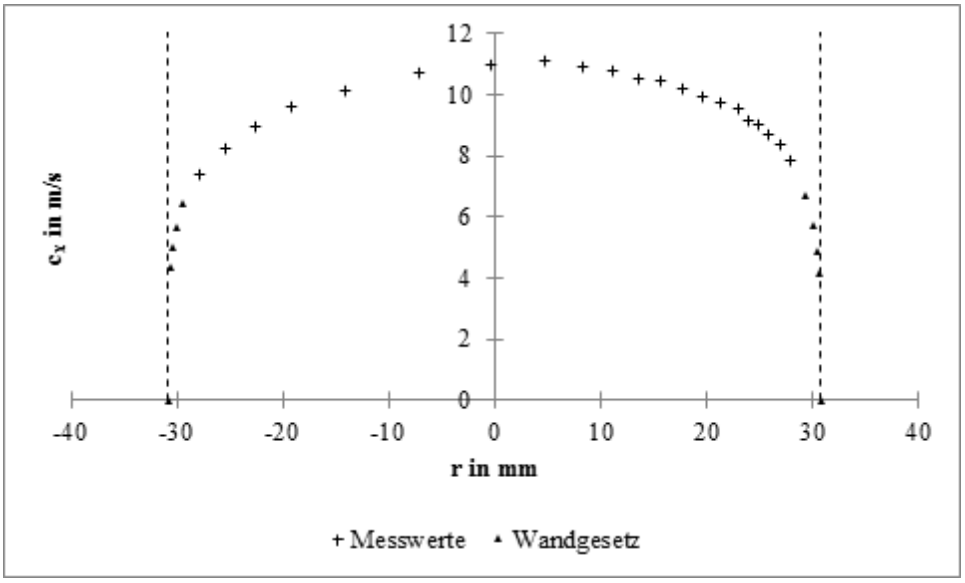

Abbildung 1-8: Messwerte eines Geschwindigkeitsprofils im Nennbetrieb, Randbereich gemäß Potenzgesetz modelliert

Es zeichnet sich durch eine leichte Asymmetrie aus. Dies kann dafürsprechen, dass die vollkommene Ausbildung des Profils noch nicht erreicht ist. Aufgrund der bereits geschilderten Störsignale waren Messungen in unmittelbarer Wandnähe nicht auswertbar. Hier erfolgte die Modellierung der Grenzschicht mithilfe eines Potenzgesetzes. Direkt an der Rohrwand wurde die Haftbedingung $c_x(|r| = R) = 0$ m/s angesetzt.

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

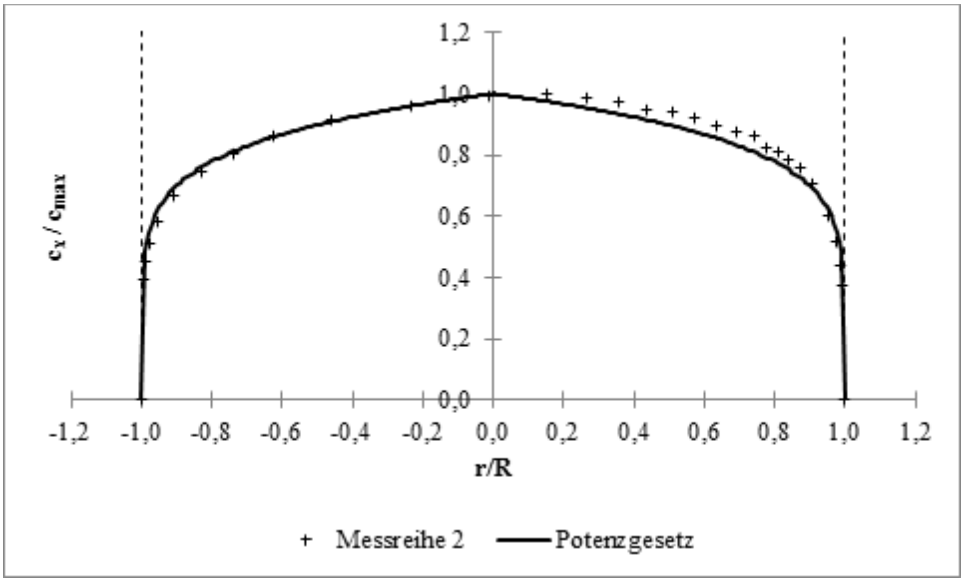

Abbildung 1-9: Dimensionslose Darstellung der Messreihe 2

In der dimensionslosen Darstellung ist gemäß Abbildung 1-9 eine gute Übereinstimmung mit dem für Reynolds-Zahlen Re ≈ $3 \cdot 10^3$ üblichen Potenzgesetz

$$\frac{c_x}{c_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^m$$

mit dem Exponenten m ≈ 0,1555 zu verzeichnen.

Die so aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile erlaubten das Ermitteln von Produktgasvolumenströmen. Dabei wurden 3 Methoden der Auswertung herangezogen:

- Schwerlinienverfahren gemäß VDI/VDE 2640
- Numerische Integration des Geschwindigkeitsprofils mithilfe der Trapezregel
- Analytische Integration des Geschwindigkeitsprofils nach Bestimmung einer Ausgleichsfunktion

Die somit erhaltenen Ergebnisse sind anhand von 3 Messreihen in Tabelle 1-1 mit der bisher verwendeten Volumenstrommessung (Prandtl-Rohr in Rohrmitte einer Referenzstrecke) verglichen.

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

Tabelle 1-1: Zusammenfassung der Ergebnisse im Nennbetrieb

Nennbetrieb	$\dot{V}$ *in* m^3/h	f_{rel} *in* %
Referenzmessung		
Messreihe 1	84,8	0
Messreihe 2	83,7	0
Messreihe 3	80,9	0
Schwerlinienverfahren		
Messreihe 1	94,3	-11
Messreihe 2	96,2	-15
Messreihe 3	86,7	-7,2
Numerische Integration		
Messreihe 1	103	-21
Messreihe 2	104	-24
Messreihe 3	96,7	-19
Analytische Integration		
Messreihe 1	101	-19
Messreihe 2	105	-25
Messreihe 3	98,4	-22

Dabei wird deutlich, dass die Referenzmessung die niedrigsten Volumenströme lieferte. Aufgrund des Ausfalls der Produktgasanalyse im Messzeitraum wurde für die Ermittlung der Produktgasdichte eine mittlere Produktgaszusammensetzung herangezogen, die zum Zeitpunkt der jeweiligen LDA-Messungen ggf. von der tatsächlichen Dichte abwich. Weiterhin ist das Strömungsprofil in der Referenzstrecke bisher nicht bekannt, wodurch die aktuelle Berechnung des Volumenstromes über

$$\dot{V} = K \cdot c_{max} \cdot A_{Ref} \tag{1}$$

hinsichtlich des verwendeten Faktors K = 0,85 in weiteren Schritten zu überprüfen ist.

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

Die Ergebnisse der numerischen und analytischen Integration weichen nur geringfügig voneinander ab, weisen jedoch deutliche Unterschiede zur Referenzmessung auf.

Das Schwerlinienverfahren lässt sich zwischen letztgenannten Werten und der Referenzmessung einordnen. Es wird vermutet, dass der in VDI/VDE 2640 genannte Randzonenkorrekturfaktor k/n in Diskrepanz mit der modellierten Grenzschicht steht. Dies muss allerdings noch näher geprüft werden. Grundsätzlich ist die Vorgehensweise gemäß Norm sehr hilfreich. Allerdings werden sich zukünftige Messungen nicht mehr durch Schwerlinien, sondern durch das Anlegen eines dichten Punktrasters auszeichnen. Dies ist durch die automatisierte Kopplung zwischen Messung und Traversierung möglich.

Zur Visualisierung erfolgte eine programmiertechnisch umgesetzte Rotation des erhaltenen Ausgleichsprofils, wodurch ein 3-dimensionales Strömungsprofil aufgespannt wird (s. Abbildung 1-10).

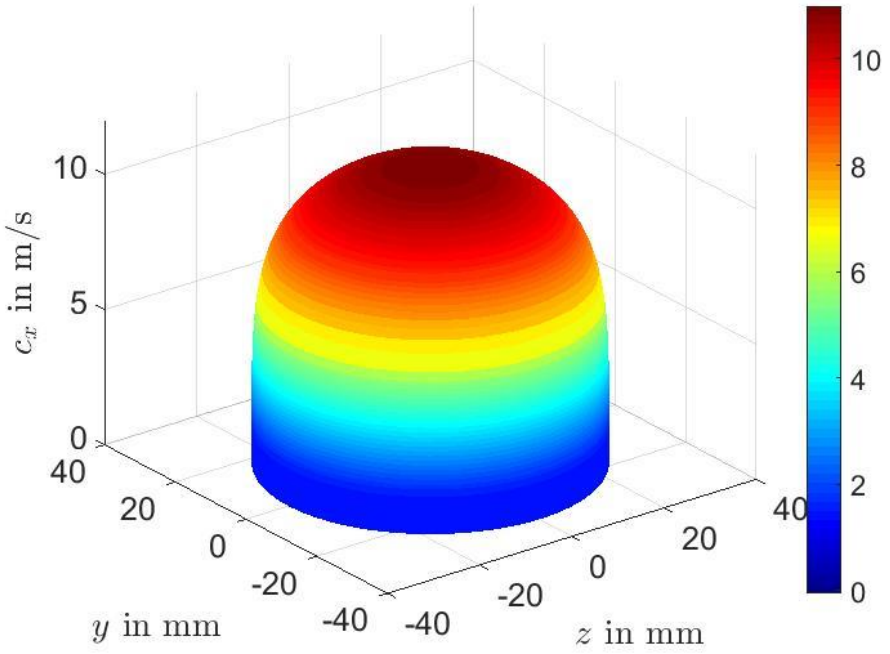

Abbildung 1-10: 3D-Profil durch Rotieren der Ausgleichsfunktion

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

Laut Email vom 02.08.2018 kündigt die Dantec Dynamics GmbH die Lieferung des LDA-Systems für Anfang September an. Erste Komponenten der Systemperipherie sind bereits eingetroffen. Die Inbetriebnahme am TCV ist für den 25./26.09.2018 schriftlich vereinbart.

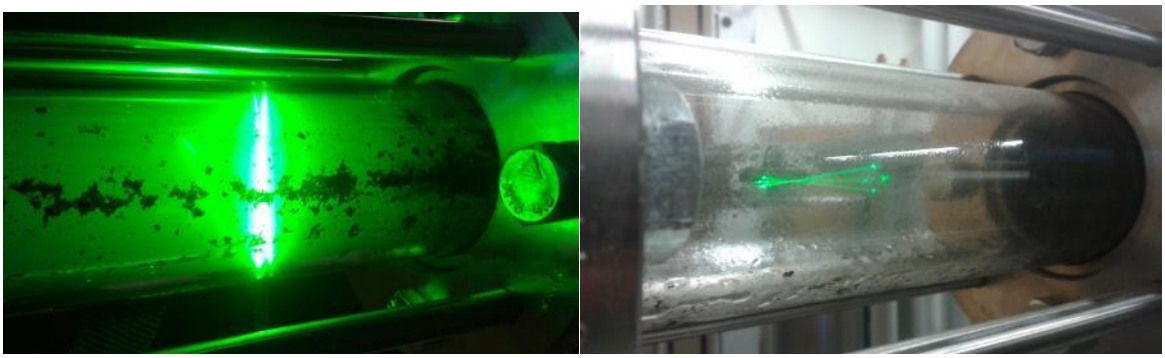

Abbildung 1-11: Ablagerungen entlang der Rohrsohle (links); Kondensationserscheinungen während des Anfahrvorganges (rechts)

Die bisherigen Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die prinzipielle Eignung des Messverfahrens wurde nachgewiesen. Allerdings sind noch eine Reihe von Vereinfachungen enthalten (mittlere Produktgasdichte, Stationarität, nur ein Messpfad, Modellierung der Grenzschicht etc.), die schrittweise aufgelöst werden müssen. Besonders das aufwändige Seeding mittels prozessfremder Partikel stellt eine Herausforderung dar. LDA-Messungen können nur von einer Schauglasseite aus durchgeführt werden, welche keine Verschmutzungen aufweist. Die Kondensationseffekte an der Rohrinnenwand während des Anfahrens der Anlage behindern ebenfalls das Durchführen derartiger Messungen (s. Abbildung 1-11).
2. Es konnten erste Produktgasvolumenströme bestimmt werden, welche in einer realistischen Größenordnung liegen. Messungen während des Nennbetriebes lieferten reproduzierbare Ergebnisse. Die Diskrepanz der ermittelten Volumenströme untereinander muss noch beigelegt werden.
3. Im Rahmen der Untersuchungen wurden mittels der Software MATLAB® Algorithmen zur Auswertung und Darstellung programmiert, welche als wesentliche Grundlage für zukünftige Messungen dienen werden und problemlos anpassbar sind.

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

4. Für die Neuausschreibung und für den zukünftigen Einsatz ließen sich wichtige Zusammenhänge zwischen Hard- und Softwareparametern (Ausrichtung, Laserleistung, Optik etc.) ableiten.

Zukünftige Optimierungen werden deshalb insbesondere folgende Bereiche betreffen:

1. Die Verwendung eines sehr dichten Messrasters statt der laut VDI/VDE 2640 empfohlenen Schwerlinien erhöht die Genauigkeit. Darüber hinaus sollen durch eine definierte Winkelverstellung und/oder Strahlverfolgungssoftware mehrere Messpfade abgetastet werden. Es ist zu beachten, dass das Schauglas nicht aus allen Winkeln zugänglich ist. Dies liegt einerseits an der Einbausituation und andererseits an Verschmutzungen der Rohrsohle (s. Abbildung 1-11).
2. Der Einsatz kürzerer Brennweiten für ein kleineres Messvolumen und eine darin gebündelte höhere Intensität des Laserlichtes führt zu einer besseren Auflösung des wandnahen Bereiches. Somit kann evtl. auch die Nutzung der prozesseigenen Partikel gelingen. Für höhere Datenraten soll eine Messung in Vorwärts- oder Seitwärtsstreuung geprüft werden und das bisherige Rückwärtsstreuverfahren (Sende- und Empfangslinse im selben Gerät) ablösen.
3. Die in Abbildung 1-12 dargestellten Reflexionen auf der Linse sollen durch leichtes Verkippen der Sonde vermieden werden. Die Notwendigkeit einer Datenfilterung unterbleibt und Randbereiche können besser vermessen werden. Allerdings ist hierfür eine Korrektur der Lage des Messvolumens innerhalb des Rohres notwendig. Die Beschaffung einer entsprechenden Software zur Strahlverfolgung ist deshalb dringend notwendig und in der Realisierung befindlich. Unter diesem Aspekt soll auch die Parametrierung von Kern- und Randbereich zukünftig getrennt erfolgen.
4. Für eine Erhöhung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ist ein geeigneteres Abbruchkriterium zu definieren, welches über eine bloße Anzahl an Messwerten pro Messpunkt oder die Definition einer Zeitdauer pro Messpunkt hinausgeht. Derartige statistische Konvergenzkriterien sind Softwarebestandteil der Neuausschreibung.

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

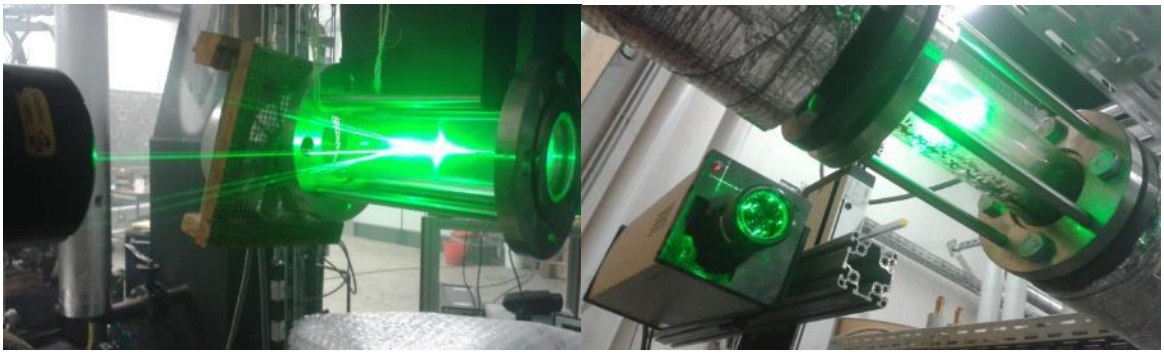

Abbildung 1-12: Reflexionen am Schauglas bei Vorversuchen (links); Reflexionen auf der Sende-/Empfangslinse des LDA-Leihsystems während der Messung (rechts)

Es ist anzumerken, dass das hier eingesetzte Verfahren der Volumenstrombestimmung gemäß eigener Recherchen noch keine Anwendung an Holzvergaseranlagen fand und somit als neuartig angesehen werden kann. Literatur für die konkreten Probleme derartiger Anlagen in Kombination mit LDA-Messungen existiert offensichtlich noch nicht.

Reparaturen

Im Rahmen der Messfahrten traten Störungen bzw. Schäden einiger Anlagenkomponenten auf. Dies betrifft insbesondere den Kratzkettenförderer der Biomassetrocknungsanlage und den Permanentgasanalysator, die beide nicht mehr einsatzfähig waren und ersetzt werden mussten. Eine kurze Beschreibung von Schaden und Vorgehensweise ist in den nächsten Abschnitten aufgeführt.

- **Kratzkettenförderer**

Die angelieferten, in der Regel waldfrischen Holzhackschnitzel (HHS), werden in einem Schubbodencontainer gelagert. Dieser fördert die HHS durch einen hydraulischen Schubboden über einen Übergabetrog in den ersten Kratzkettenförderer. Über diesen werden sie dann diskontinuierlich in den Silotrockner transportiert. Im Verlauf einer Messfahrt war der notwendige Leistungsbedarf des Getriebemotors für den Kratzkettenförderer so groß, dass mehrfach der Motorschutz auslöste, bis schlussendlich die Messfahrt abgebrochen wurde. Daraufhin wurden einzelne Kanalabdeckungen deinstalliert und festgestellt, dass zum einen eine Kette vom Antriebsritzel heruntergesprungen war und zum anderen starke Verformungen

einiger Gehäuseteile aufgetreten sind (vgl. Abbildung 1-13). Außerdem war ersichtlich, dass die Mehrzahl der Mitnehmer stark verbogen sind (vgl. Abbildung 1-14).

Abbildung 1-13: durch Zugwirkung der Kette verformtes Gehäuseteil

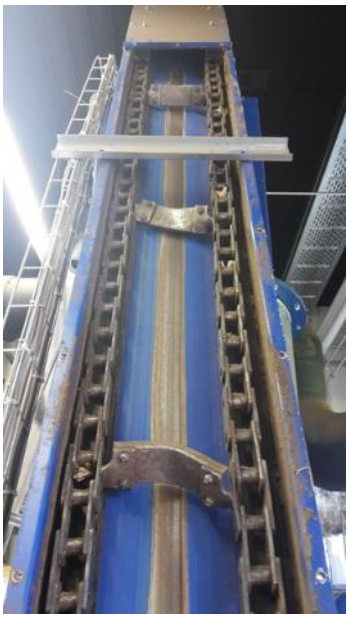

Abbildung 1-14: verbogene Mitnehmer des Kratzkettenförderers

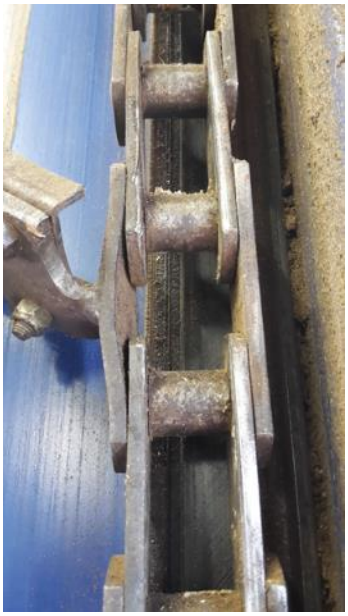

Abbildung 1-15: verbogenen Kettenglieder des Kratzkettenförderers

Eine der vermuteten Ursachen für den Defekt der Kratzkette ist in Abbildung 1-16 veranschaulicht. Da der offene Kanalquerschnitt beim Austritt aus dem Übergabetrog (Bereich A) größer ist als der Querschnitt nach der Kettenumlenkung (Bereich B), gelangen mehr HHS in den Umlenkungsbereich, als zum Silotrockner abgeführt werden können. Dadurch stauen sich in diesem Bereich die HHS zurück, sodass diese zwischen dem oberen und dem unteren Ket-

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

tenabschnitt verdichtet werden. Die durch die entgegengesetzt laufenden Ketten entstehenden Scherkräfte wirken ebenfalls direkt auf Mitnehmer und deren Kettenglieder. Die nun für die Kettenbewegung notwendige enorme Zugkraftwirkung des Getriebemotors hat augenscheinlich dazu geführt, dass zum einen der Motorschutz aktiviert wurde, zum anderen die Kette vom Antriebsritzel sprang sowie im Bereich des oberen 60°-Winkels Deformierungen an der Kanalabdeckung auftraten.

Wird dieser konstruktive Mangel behoben und folglich der Kanalquerschnitt A kleiner als der Querschnitt B ausgeführt, sollte keine Überfüllung im Umlenkungsbereich mehr auftreten. Jedoch besteht immer noch die Gefahr des HHS-Verblockung am Ausgang des Übergabetrogs. Dass die Bewegungsrichtung der Kratzketten vom Hersteller entgegen dem Uhrzeigersinn gewählt wurde, ist nach Auskunft von [2] der Tatsache geschuldet, dass damit der HHS-Auswurf in den Silotrockner einfacher realisiert werden konnte.

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

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

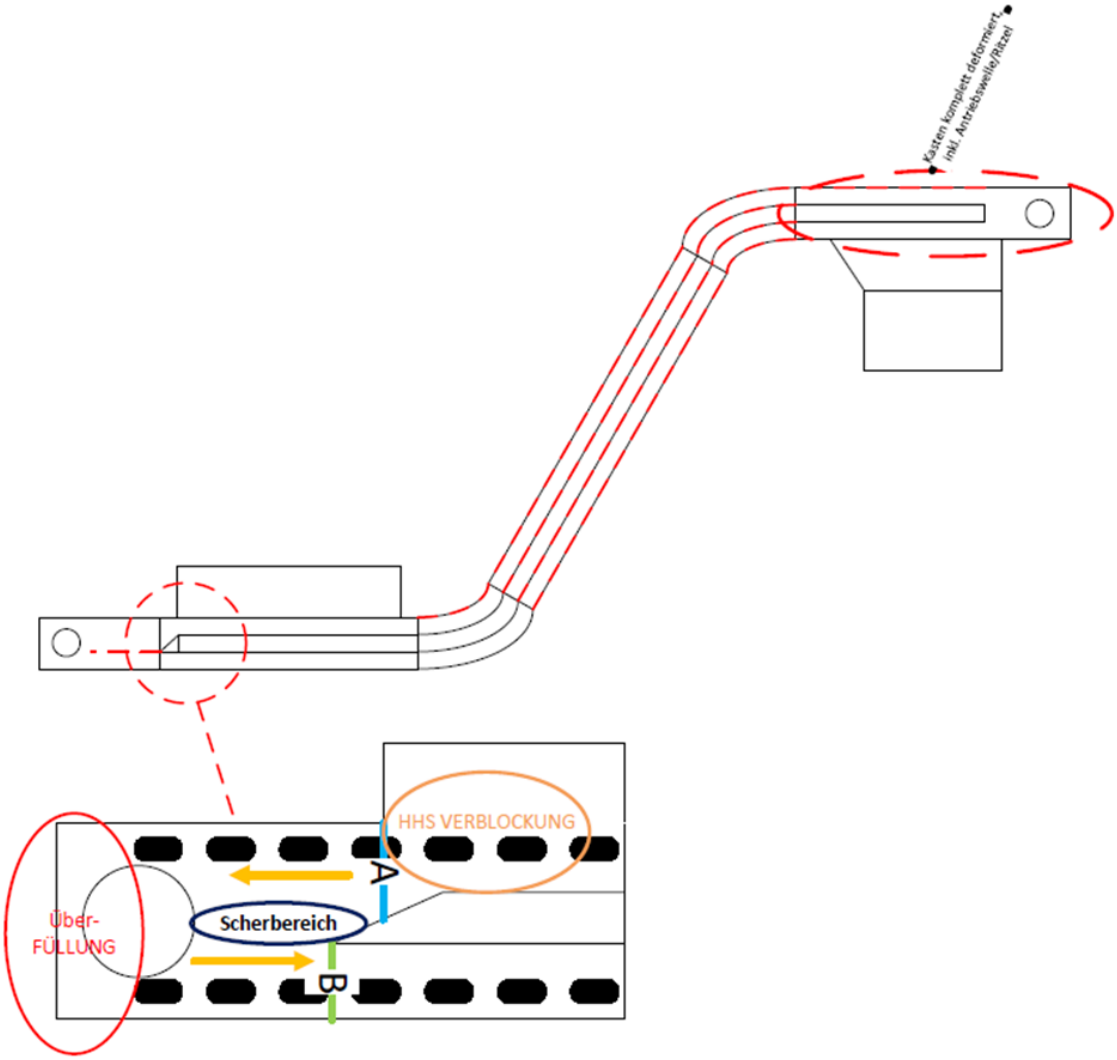

Abbildung 1-16: Skizze der vermuteten Ursache für den Kratzkettendefekt

Ausgehend von der Schadensbeschreibung und den geführten Gesprächen scheint es darüber hinaus sehr wahrscheinlich, dass das grundsätzliche Problem der bisherigen Fördertechnik die Überfüllung des Übergabetroges ist und die oben beschriebenen Probleme sich daraus ergeben haben. Der Spalt des Schubbodencontainers zum Übergabetrog ist nicht verstellbar, so dass bei feuchten HHS zu wenig und bei trockeneren HHS zu viel HHS in den Übergabetrog und damit auf die Kratzkette gelangen. Eine einfache Reparatur des Kratzkettenförderers würde somit nur kurzfristig helfen und voraussichtlich zu erneuten Problemen führen.

Ein weiteres prinzipielles Problem konnte im Rahmen der Ursachenforschung ebenfalls identifiziert werden: Durch den Versuchsbetrieb mit den daraus resultierenden Stillstandszeiten ist bei nassen HHS die Gefahr des Festrostens der Kettenglieder der Kratzkette deutlich größer

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

als im Dauerbetrieb. Eine zukünftige Steuerung sollte eine Leerfahrt des Kratzkettenförderers beinhalten, so dass auch nach Abschluss des Betriebes keine nassen HHS mehr für längere Zeit dort verbleiben und die Korrosionsgefahr verringert wird.

Als Ergebnis der Schadensaufnahme wurde Kontakt zum Hersteller des Kratzkettenförderers aber auch zu Herstellern alternativer Transportsysteme von Schüttgütern aufgenommen und die Möglichkeiten vor Ort diskutiert. Nach eingehender Recherche, Angebotseinholungen und Diskussionen mit den entsprechenden Fachleuten, wurde beschlossen, den bisherigen Kratzkettenförderer zu deinstallieren und durch ein Schneckenfördersystem zu ersetzen. Die ausschlaggebenden Vorteile des Schneckenfördersystems ggü. der bisherigen Transporteinrichtung waren folgende:

- Unempfindlichkeit ggü. Korrosion
- Überschüttung im Übergabetrog des Schubbodencontainers unkritisch
- deutlich niedrigere Investitionskosten.

Ein entsprechendes Schneckenfördersystem, bestehend aus Übergabe-, Vertikal- und Horizontalschnecke inkl. Übergabetrichter wurde beauftragt, ausgelegt und gefertigt (vgl. Abbildung 1-17).

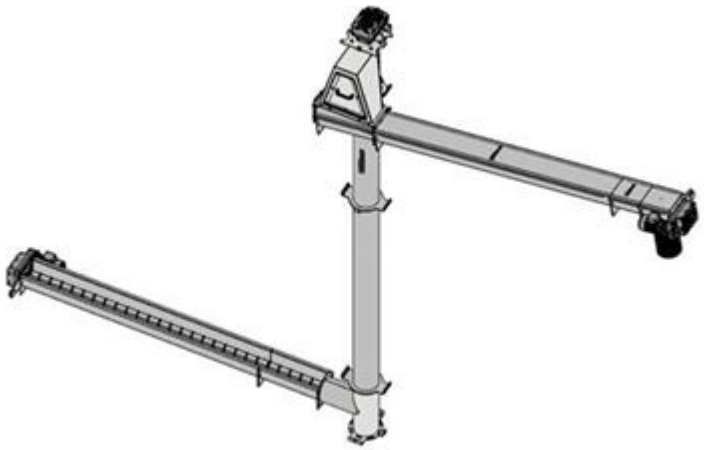

Abbildung 1-17: Konstruktionszeichnung des Schneckenfördersystems als Ersatz des bisherigen Kratzkettenförderers

Parallel hierzu wurde der komplette Kratzkettenförderer deinstalliert. In diesem Rahmen erfolgte auch der Abbau des Trommelfilters der Trocknungsanlage und der entsprechenden

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

Rohrleitungen der Abluft (vgl. Abbildung 1-18). Der Trommelfilter wurde im Rahmen einer wirtschaftlichen Optimierung der Biomassetrocknungsanlage aufgrund seiner relativ hohen Betriebskosten (Permanentschmierung der Trommelfilterwelle, Antriebsleistung Zellradschleuse) und seiner geringen Filterwirkung entfernt. Nach dem erfolgten Abbau der Komponenten wurde das neue Schneckenfördersystem installiert (vgl. Abbildung 1-19).

Abbildung 1-18: Biomassetrocknungsanlage nach Abbau des Kratzkettenförderers, Trommelfilter und Abluftrohrleitungen

Abbildung 1-19: Installiertes Schneckenfördersystem

Anschließend mussten die Rohrleitungen der Abluft zwischen Silotrockner und Wärmerückgewinnung komplett neu verlegt und die zuvor am Trommelfilter abgestützten Rohrleitungen mit einem zusätzlichen Lastengerüst abgefangen werden (vgl. Abbildung 1-20).

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

Abbildung 1-20: Lastengerüst und neu installiertes Abluftrohr zwischen Silotrockner und Wärmerückgewinnung

Abschließend war eine Neukonzipierung des bisherigen Übergabetrogs am Schubbodencontainer notwendig. Entsprechend wurde eine Umhausung der Trogschnecke als Staubschutz und HHS-Übergaberaum konstruiert und gefertigt, in der über eine Welle mit Paddeln der HHS-Füllstand im Übergabetrog an die Trocknersteuerung übermittelt wird. Dies ist notwendig, um den Schubboden so zu steuern, dass zum einen keine Überfüllung des Übergaberaumes mit HHS und zum anderen keine Leerfahrt des Schneckensystems auftritt. Die jetzt vorhandene Sensorik, bestehend aus Welle, Paddeln und elektromagnetischen Sensor hat sich jedoch hinsichtlich seiner mechanischen Belastbarkeit als unzureichend erwiesen und muss weiter optimiert werden.

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

Abbildung 1-21: Übergabetrog zwischen Schubbodencontainer und Schneckenförder-system

- **Permanentgasanalysator MGA 09 der Fa. Födisch Umweltmesstechnik AG**

Eine weitere umfassende Reparatur war aufgrund eines Biodieseleinbruchs in die Permanent-gasanalyse notwendig. Der Biodiesel stammt aus der Messgasaufbereitung und gelangte durch in Folge einer Anlagenstörung durch die Saugwirkung der Gaspumpe mit in den Gasanalysa-tor. Dadurch wurde die Infrarot (IR)-Bank mit den IR-Sensoren irreparabel geschädigt und der Analysator musste durch ein Neugerät ersetzt werden. Darüber hinaus müssen alle Gas-schläuche inkl. Verbinder zwischen Messgasaufbereitung und Analysator gewechselt bzw. gereinigt werden, um den Biodiesel aus dem System zu entfernen. Weiterhin soll die bisherige Biodiesel-Gaswäsche, die direkt im Gasstrom abläuft, durch eine Waschflasche ersetzt wer-den, um einen Biodieseleintrag in die nachfolgenden Bauteile zu verhindern.

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

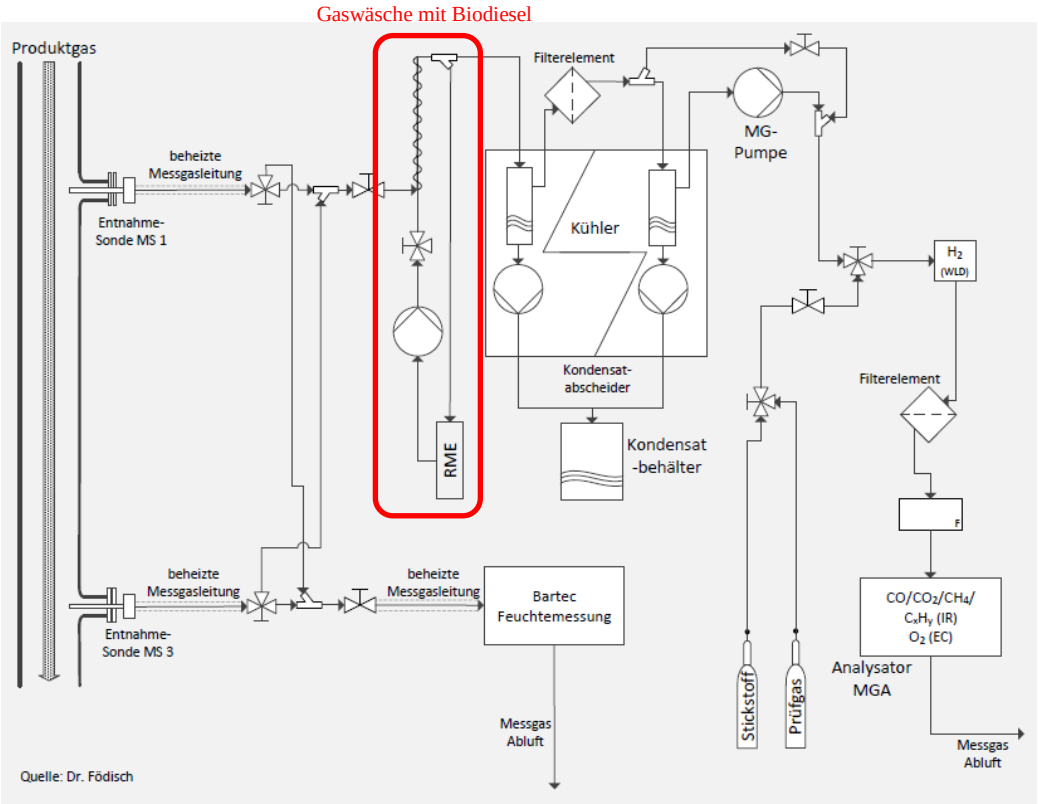

Abbildung 1-22: Gaslaufplan der Permanentgasanalyse inkl. Gasaufbereitung, eigene Darstellung nach [3]

- **Control Panel**

Nach einem Defekt der Speicherkarte des zentralen Control Panels im Schaltschrank der Holzvergasungsanlage wurde diese ausgetauscht. Die dafür nötigen Tools zur Formatierung und Neuinstallation der Speicherkarte wurden durch den Hersteller der Vergasungsanlage zur Verfügung gestellt – sodass zukünftige Neuinstallationen herstellerunabhängig durchgeführt werden können. Anschließend musste die gesamte Anlagenkonfiguration manuell wieder auf die vorherigen Werte (die im Vorfeld im Zuge der Anlagendokumentation ausgedruckt wurden) eingestellt werden, da die automatische Parameterimportfunktion unzuverlässig arbeitete. Für eine weitere Verzögerung dabei sorgten Softwareupdates mit Parameterumbenennung und –neudefinierung. Im Verlauf dieser Arbeiten wurde festgestellt, dass die Schaltschrankkonfiguration seitens des Herstellers nicht vollständig dokumentiert wurde – sodass diese Dokumentation nachgeholt werden musste.

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

- **Rechner der Messwerterfassung**

Ein Festplattendefekt aufgrund unbekannter Ursache führte zum Ausfall des Leitrechners des Messwerterfassungssystems und in Folge dessen zu Verzögerungen durch die Reparatur der Festplatte und anschließender Systemwiederherstellung. Im anschließenden Messbetrieb zeigten sich zufällig auftretende Systemfehler im Intervall von einem bis drei Tagen, was auf weitere defekte Hardwarekomponenten hinwies. Durch einen neuen Rechner, bei dem die komplette Messdatenerfassung neu eingerichtet und konfiguriert wurde, konnten die Systemabstürze zwar beseitigt werden, allerdings ergaben sich dadurch neue Schwierigkeiten mit der Software der Messwerterfassung (Labview), die ebenfalls nur einen unzuverlässigen Messbetrieb ermöglichten und einen hohen Arbeitsaufwand erforderten. Obwohl kein Datenverlust auftrat, war während der Arbeiten an den Rechnern zur Messwerterfassung der Messbetrieb nur eingeschränkt möglich und die Messwerterfassung bei länger dauernden Messfahrten nicht immer erfolgreich.

Analyse dynamisches Prozessverhalten

Zur verbesserten Analyse des dynamischen Prozessverhaltens wurde weiter am Gesamtmodell der Versuchsanlage mittels OpenModelica gearbeitet. Es wurde ein neues Modell für einen Doppelrohr-Wärmeübertrager erstellt, welche die Gleichungen für den Druckverlust und Wärmeübergang in einem Ringspalt nach [4] nutzt und mit dem in OpenModelica vorhandenen Rohrströmungsmodell sowie einem ebenfalls neu programmierten Modell für den Wärmetransport in einer zylindrischen Wand kombiniert. Darüber hinaus wurde das Modell des Ringspaltes um Gleichungen für den 2-Flächen-Strahlungsaustausch (zwischen der inneren und äußeren Wand) erweitert. In einer durchgeführten Testsimulation betrug die Abweichung zwischen CFD- und OpenModelica-Simulation nur 5 % - bei einer über 100-fach schnelleren Berechnung.

Das Gesamtmodell wurde um den Pufferspeicher nebst der angeschlossenen Wärmequellen und –senken erweitert und sieht schematisch wie in Abbildung 1-23 dargestellt aus. Das nun vorhandene Gesamtmodell ist damit wesentlich besser für die zeitabhängige Simulation geeignet, da nun die realen instationären Vorgänge des Kühlkreislaufes erfasst werden können.

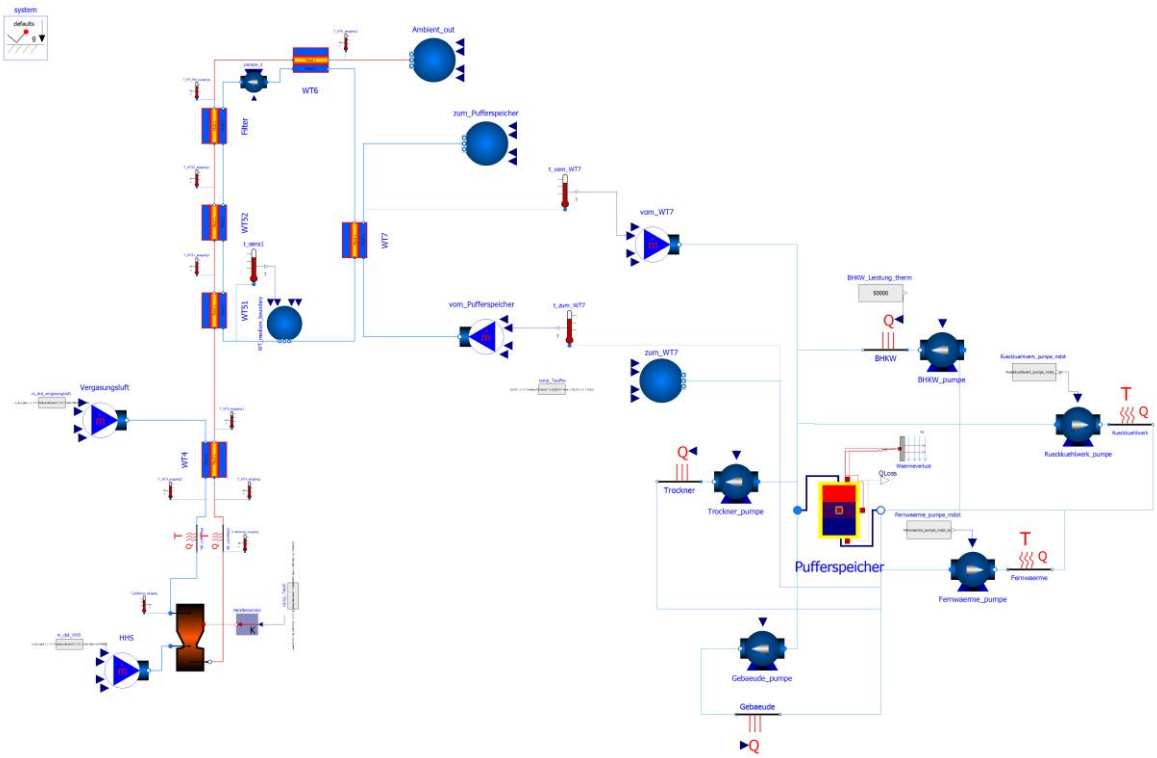

Abbildung 1-23: Verfahrensfließschema der Systemsimulation

Bei der Ergebnisauswertung wurden Abweichungen von Messdaten beobachtet, die weiter untersucht werden sollten. Insbesondere die Gebäudeheizung sowie die Fernwärmeübergabestation weisen ein zeitliches Verhalten auf, welches von verschiedener Regelungseinrichtungen, der Trägheit des Gebäudes sowie den natürlich auftretenden Tag/Nacht-Schwankungen beeinflusst wird. Diese Effekte in ihrer Gesamtheit sehr gut abzubilden ist eine große Herausforderung. Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde kleinere Detailberechnungen durchgeführt (instationäre Simulation der Rohrleitung vom Pufferspeicher zur Fernwärmeübergabestation), welche das vorhandene Wissen über die thermischen Verluste der Versuchsanlage bereichert.

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

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

Zur Überprüfung der Modellqualität des Pufferspeichers wurde eine CFD-Simulation des Abkühlverhaltens des Pufferspeichers durchgeführt. Dabei wurden die Geometriedaten des Pufferspeichers laut den vorhandenen Unterlagen sowie eigenen Messungen in ein CAD-Modell übertragen und Simulationen mit ANSYS CFX als auch OpenFOAM durchgeführt. Die simulierte Zeit betrug dabei 6 Tage. Beispielhaft sind in Abbildung 1-24 einige Ergebnisse der OpenFOAM-Berechnungen dargestellt.

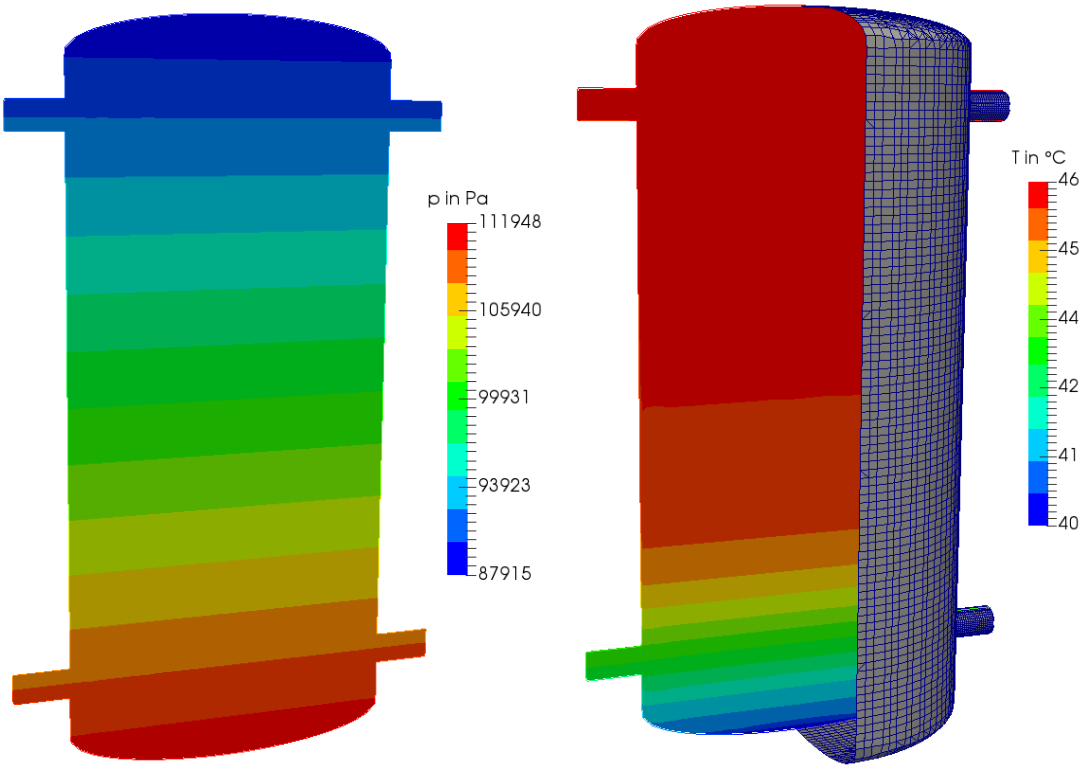

Abbildung 1-24: Ergebnisse der CFD-Simulation des Pufferspeichers (Druck, Temperatur und Oberflächennetz nach einer simulierten Zeit von 6 Tagen)

Beide CFD-Simulationsergebnisse wurden mit experimentell ermittelten Daten sowie einer OpenModelica-Simulation verglichen. Wie in Abbildung 1-25 ersichtlich, weichen die Abkühlkurven (mittlere Temperaturen) der Simulationen von den Messergebnissen am Ende der 6 Tage um ca. 5 K ab. Dieser Unterschied deutet auf einen im Experiment höheren Wärmestrom (im Mittel ca. 200 W) vom Pufferspeicher an den Raum hin.

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

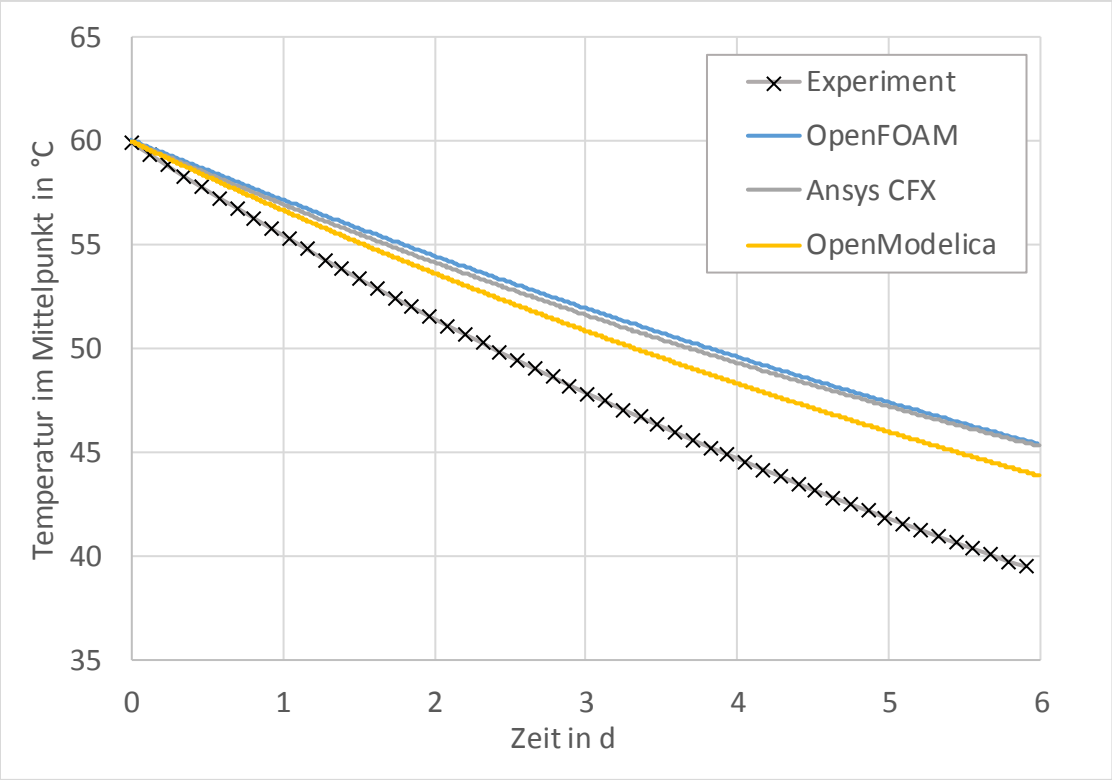

Abbildung 1-25: Vergleich der Abkühlkurven des Pufferspeichers

Zur Abschätzung der Zeitskalen und damit ebenfalls zur Analyse des dynamischen Prozessverhaltens wurden messtechnische Untersuchungen am Trockner durchgeführt. Die dabei ermittelte Formel zur Berechnung der Zeit bis zum kompletten Entleeren beträgt

$$t = 15 + 14 * t_{Pause} \tag{2}$$

mit t in Minuten und t_{Pause} der Wartezeit (in Minuten) zwischen den jeweiligen 1-minütigen Austragzeiten. Im Versuchsbetrieb liegt diese Zeit je nach Wassergehalt der zu trocknenden Hackschnitzel zwischen 8 und 12 Minuten. Diese Zeit ist gleichzeitig die Verweilzeit des Holzes im Trockner. Aus einem geschätzten Trocknervolumen von 0,5 m³ kann somit auf durchschnittliche Volumenströme der Holzhackschnitzel zwischen 2,7 und 4 l/Minute durch den Trockner geschlossen werden. Die komplette Befüllung mit dem neuen Schneckensystem dauert ca. 50 Minuten.

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

Systembilanzierung

Die Bilanzierung der Stoffströme wurde durch weitergehende Untersuchungen fortgeführt. Neben der vorwärts gerichteten Betrachtung der Elementbilanzen ausgehend von den Holzhackschnitzeln und dem Vergasungsmittel Luft zur Berechnung der Produktgaszusammensetzung wurden Parameterstudien durchgeführt, die von als zuverlässig messbar betrachteten Produktgasbestandteilen ausgehen und dadurch die Spannbreiten der rückwärtigen (stromaufwärts gelegenen) Prozessparameter veranschaulichen. Einige Unsicherheiten bei der Produktgasmessung wurden im Rahmen dieser Untersuchungen erkannt und an Lösungen dafür gearbeitet.

Beispielhaft hierfür sind in Abbildung 1-26 und Abbildung 1-27 die Ergebnisse der Stoff- und Energiestrombilanzierung einer Messfahrt dargestellt. Hierbei ebenfalls angegeben sind die resultierenden Bilanzfehler um jede Anlagenhauptkomponente (Vergaser, Wärmeübertrager, BHKW), die es im Rahmen der Systembilanzierung weiter zu minimieren gilt.

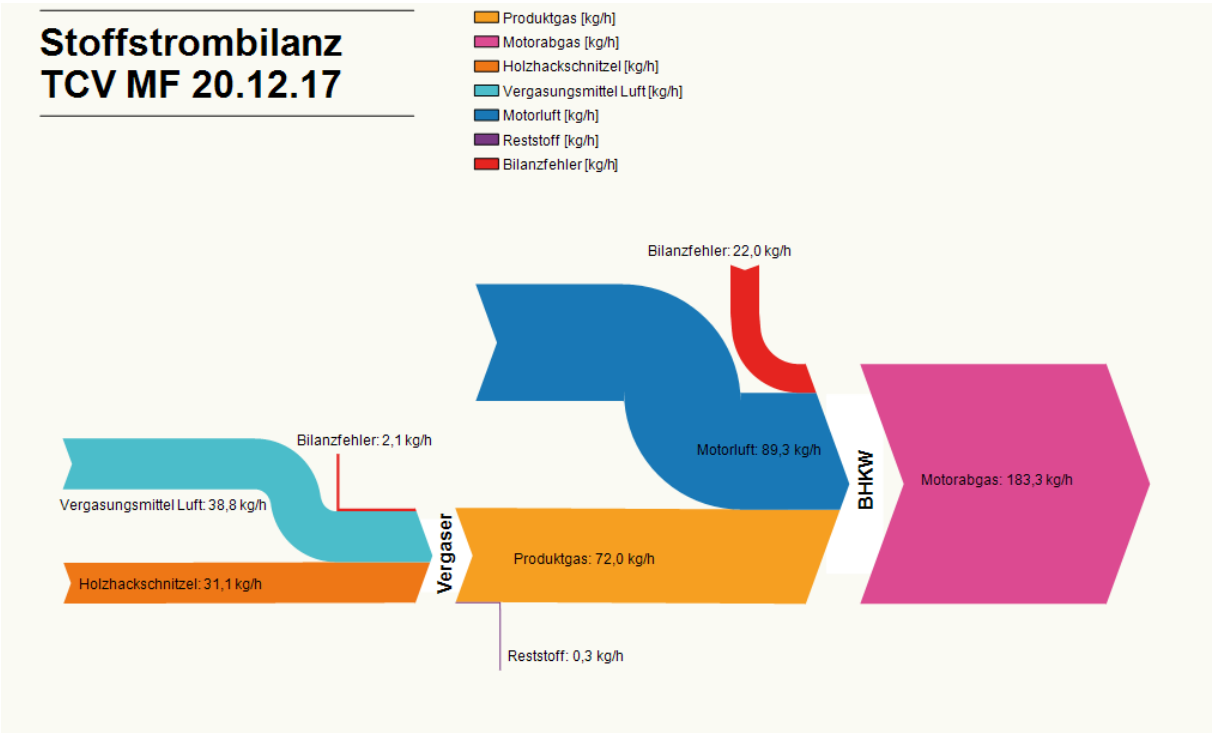

Abbildung 1-26: Ergebnisse der Stoffstrombilanz einer Messfahrt

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

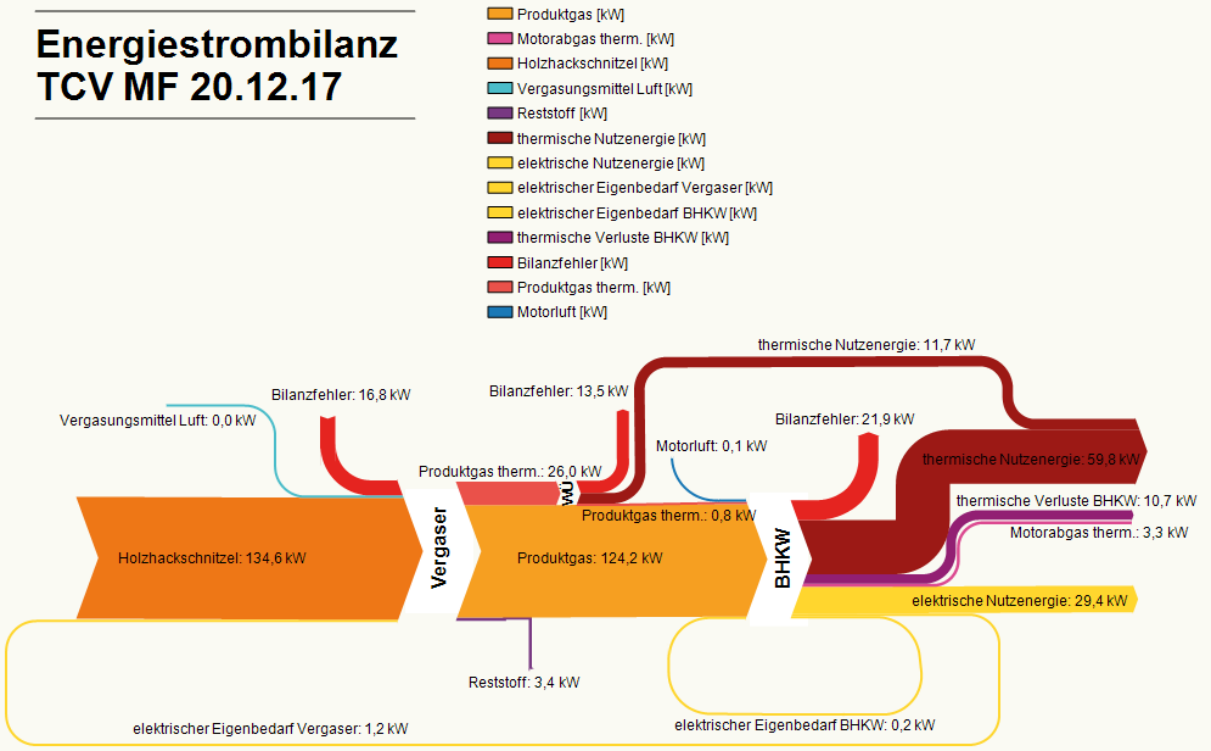

Abbildung 1-27: Ergebnisse der Energiestrombilanz einer Messfahrt

Weiterentwicklung des detaillierten Modells des Reformers

Nach der Auswertung von Literaturdaten (siehe [1]) wurde die ungenügende Nutzbarkeit der daraus gewonnenen Kinetikdaten für die Pyrolyse festgestellt. Ebenfalls wurde deutlich, dass die vorhandene Thermowaage (LECO TGA 701) zur Messung eigener Daten eine unzureichende zeitliche Auflösung aufweist. Aus diesem Grund wurden mit Hilfe des Instituts für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung (iTN) der Hochschule Zittau / Görlitz weitere thermogravimetrische Untersuchungen durchgeführt.

Zum Einsatz kam dabei eine Thermowaage vom Typ TGA/ DSC 1 (Star System) der Firma Mettler-Toledo AG. Proben der in der Versuchsanlage verwendeten Hackschnitzel wurden sehr fein gemahlen und bei verschiedenen Heizraten (2,5 K/min; 5 K/min; 10 K/min) unter Stickstoffatmosphäre untersucht.

Ergebnis dieser Experimente sind die in Abbildung 1-28 und Abbildung 1-29 dargestellten Messkurven. Besonders in der abgebildeten Ableitung der Masseabnahme werden mehrere Minima erkennbar, die auf die verschiedenen, zu dem jeweiligen Zeitpunkt hauptsächlich umgesetzten Komponente hinweisen. Entsprechend der meist in der Literatur verwendeten

Komponenten wurde bei den nachfolgenden Betrachtungen ebenso von 4 Komponenten Wasser, Hemizellulose, Zellulose und Lignin ausgegangen.

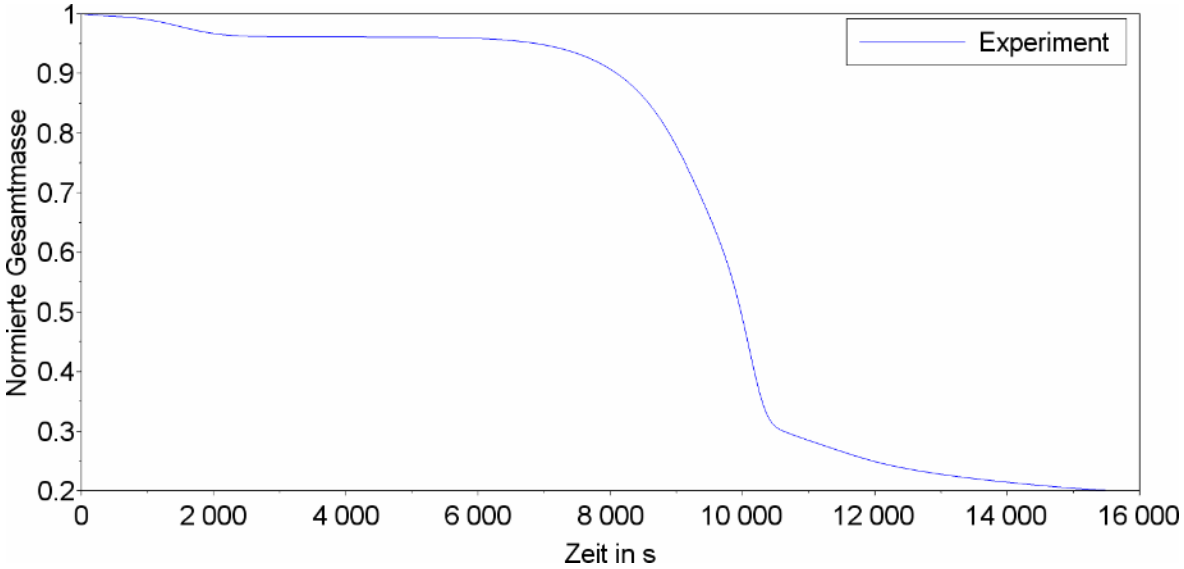

Abbildung 1-28: Gemessene Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min

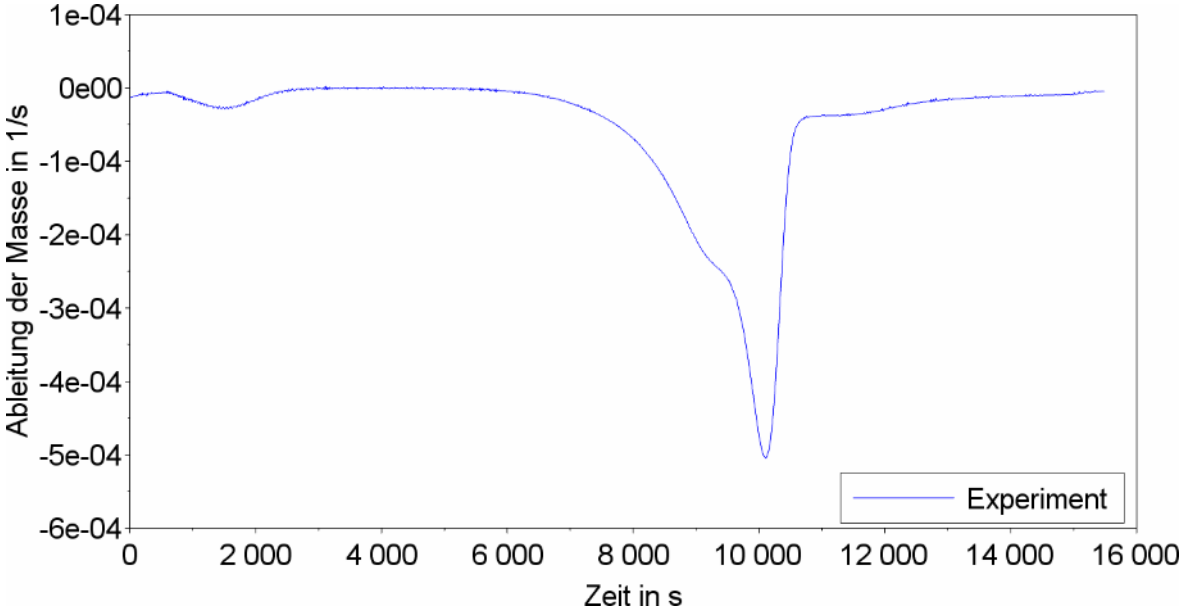

Abbildung 1-29: Gemessene zeitliche Ableitung der Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min

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

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

Zur Modellierung wurde eine modellbasierte Methode (siehe [1]) verwendet und die einzelnen Reaktionskinetiken mit dem Arrhenius-Ansatz

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}} \tag{3}$$

modelliert. Die Programmierung der numerischen Lösung des sich so ergebenden Gleichungssystems bestehend aus 4 gewöhnlichen Differenzialgleichungen wurde in Matlab, Octave sowie Scilab umgesetzt. Nach Optimierung der insgesamt 12 Parameter (4 präexponentielle Faktoren A, 4 Aktivierungsenergien E_A sowie 4 Startmasseanteile) durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (der Ableitung der Gesamtmasse) ergaben sich die in Abbildung 1-30 und Abbildung 1-31 dargestellten Ergebniskurven.

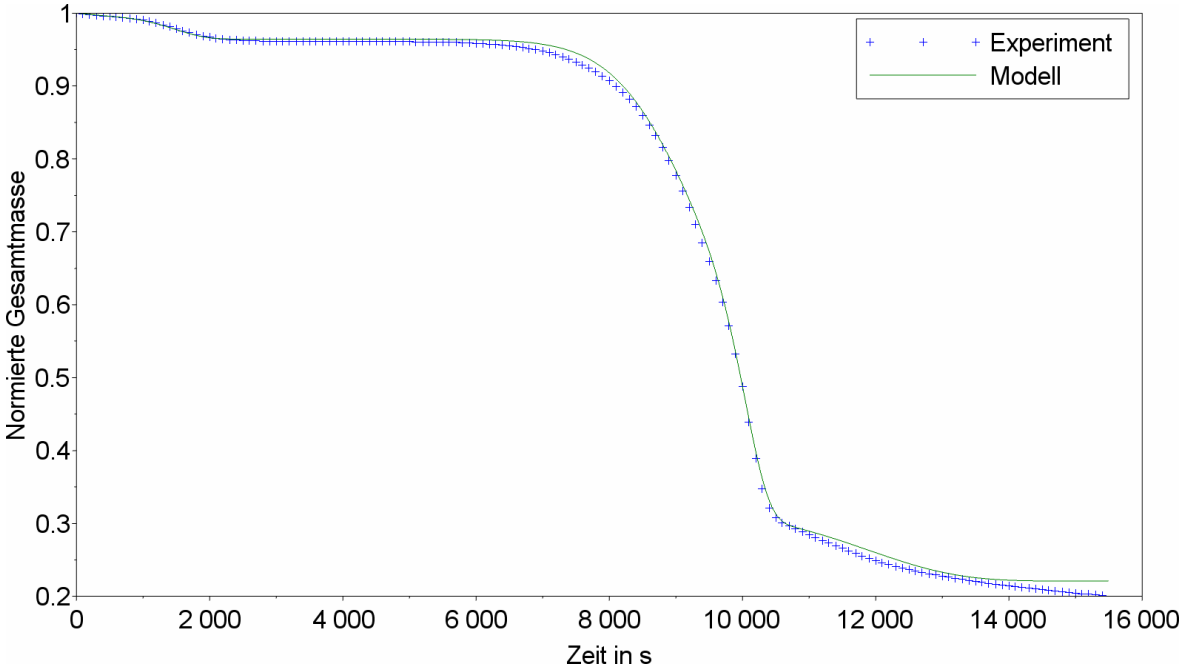

Abbildung 1-30: Gemessene und simulierte Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min

Der Kurvenverlauf ist bei den anderen Heizraten ähnlich, nur die Zeitskala ändert sich wesentlich. Am Ende des Experimentes bleibt ein Rest Kohlenstoff (Cfix) übrig, dessen Anteil sich ebenfalls aus der Optimierung der Parameter ergibt.

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

Die Übereinstimmung zwischen den Messdaten sowie dem Modell ist deutlich besser als die bisherigen Ergebnisse, was auf eine hohe Qualität der auf diesem Wege ermittelten Kinetikdaten hindeutet. Einige Schwächen scheinen bei dem Modell der Komponente Lignin zu bestehen, was vermutlich durch Sekundärreaktionen von Ligninabbauprodukten begründet werden kann.

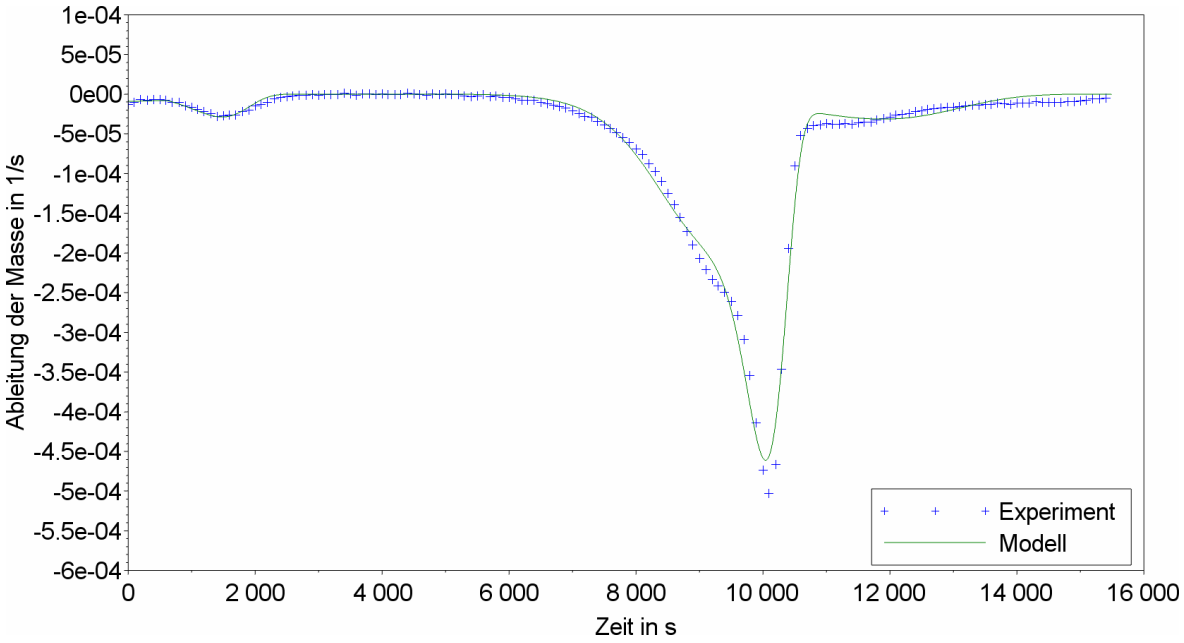

Abbildung 1-31: Gemessene und simulierte zeitliche Ableitung der Massenabnahme in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min

Die in Abbildung 1-32 gezeigten Kurven verdeutlichen, wie sich die Ableitung der Gesamtmasse aus den einzelnen Komponenten zusammensetzt.

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

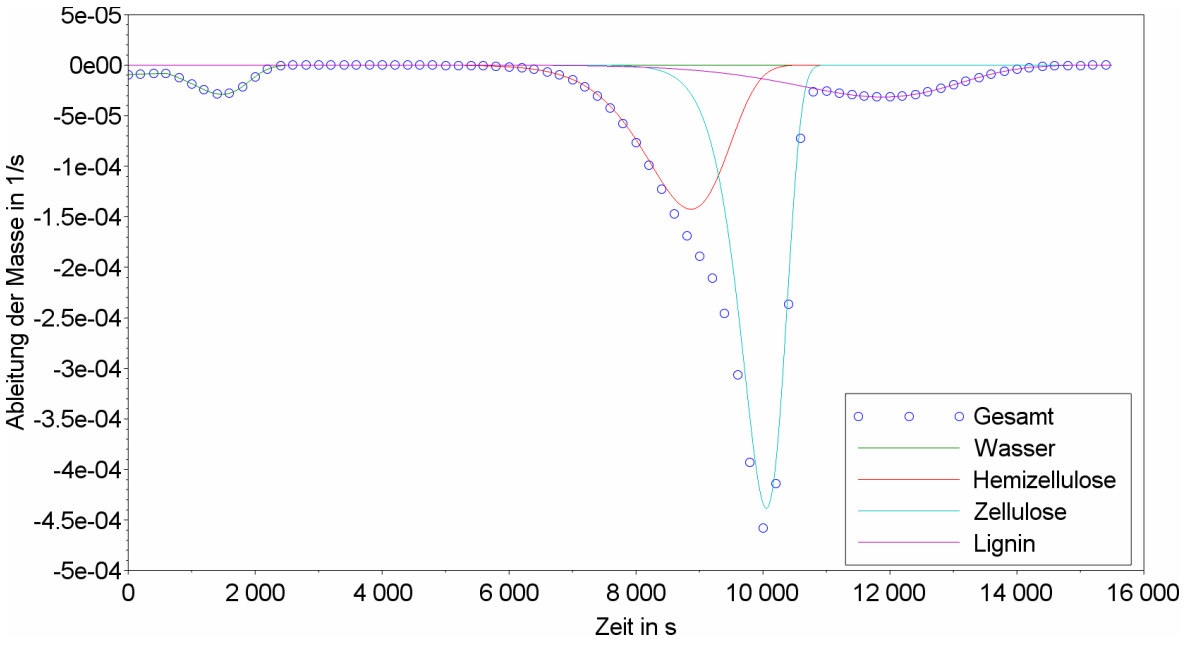

Abbildung 1-32: Simulierte zeitliche Ableitung der Massenabnahme der verschiedenen Komponenten in Abhängigkeit der Zeit bei einer Heizrate von 2,5 K/min

AP2 - Speichertechnologien

AE2.2 – Anwendungsorientierte Speichertechnologieentwicklung

Im Vordergrund der Arbeitsetappe 2.2 des AP2 – Speichertechnologien im genannten Berichtszeitraumes standen Fertigung, Aufbau und Tests der Laborversuchsstände Rohrbündel-Latentwärmespeicher (hf) (RB-LWS (hf)) und Laborgasspeicher. Bereits im vorherigen Berichtzeitraum wurden teilweise Zeichnungsableitungen der konstruierten Versuchsstände erstellt und erste Komponenten in Auftrag gegeben. Dies wurde im nun erläuterten Berichtszeitraum fortgeführt. Diese Komponenten reichen von individuell angefertigten Behältern über Messtechnik, Peripheriegeräte bis hin zu Ständerwerken aus Aluminiumprofilen. Nach Lieferung der Hauptkomponenten von Latentwärmespeicher und Gasspeicher (Speicherbehälter, Lochscheiben, Bündelrohre, Dichtungen, Berstscheiben, Gaspumpe, Messtechnik, Verschraubungen, Aluminiumprofile) konnte der Aufbau und die darauffolgenden Dichtheitsprüfungen durchgeführt werden, welche beanstandungslose Ergebnisse lieferten. Danach konnte mit dem Versuchsbetrieb begonnen werden, wobei sich diese Versuche auf Grund von Lieferverzögerungen bislang auf den Produktgasspeicher konzentrierten. Hinsichtlich der am Fraunhofer IFAM in Dresden in Auftrag gegebenen Korrosionsuntersuchungen konnte der Abschlussbericht entgegengenommen und mit den Ergebnissen Rückschlüsse auf die Materialverträglich-

keit zwischen Stählen und PCM gezogen werden. Dies ist für den im späteren Verlauf des Projektes in die Biomasse-Vergasungsanlage zu implementierenden PCM-Speicher von Bedeutung. Neben den genannten Schwerpunkten wurden weitere, teils analytische, simulatorische und empirische Untersuchungen, durchgeführt. In Zusammenarbeit mit der Firma „Romonta“ wurden deren Produkte auf Tauglichkeit als PCM hin getestet und daraufhin erste Feedbacks gegeben.

Thermischer Speicher

Während sich vereinzelte relevante Komponenten für den Aufbau noch in der Fertigung befanden wurde auf Basis der Konstruktionsdaten eine dreidimensionale Strömungssimulation des RB-LWS (hf) mit dem Programm „Comsol Multiphysics“ durchgeführt. Randparameter waren dabei die Geometrie und der an der Wärmespeichertestanlage im Zittauer Kraftwerkslabor zur Verfügung stehende maximale Volumenstrom im Wärmeträgerkreislauf von 38 l/min.

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

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

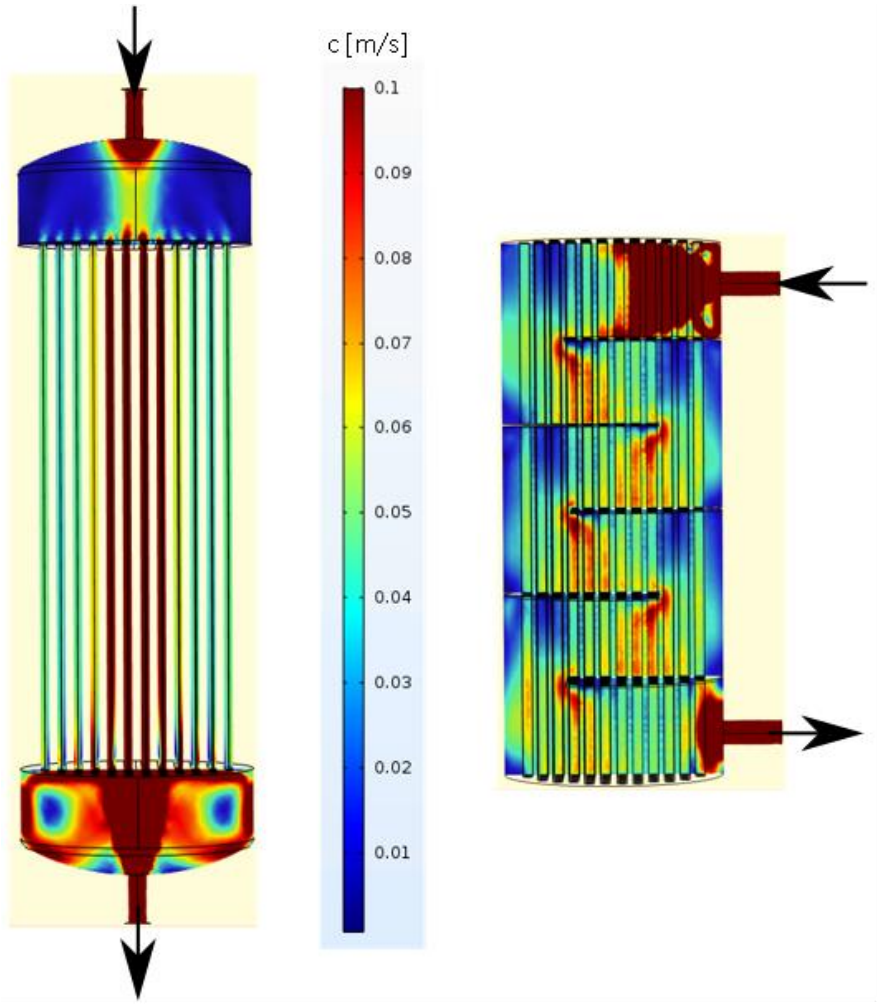

Abbildung 1-33: Strömungssimulation im RB-LWS (hf), links: Strömung durch Bündelrohre, rechts: Strömung durch Mantelraum

In der Abbildung sind die Ergebnisse der Strömungssimulation für die Fälle Wärmeträgermedium strömt im Rohrbündel und Wärmeträgermedium strömt im Behältermantelraum in der zweidimensionalen Darstellung zu sehen. Man erkennt, dass in jedem relevanten Bereich nahe der Bündelrohre eine Fluidbewegung vorherrscht und somit nahezu die gesamte zur Verfügung stehende Wärmeübertragungsfläche für den Wärmedurchgang zwischen Medium und PCM genutzt wird. Anhand dieser Simulation wird von keinen strömungs- und thermodynamischen Todgebieten im Speicher ausgegangen, sodass das gesamte Potenzial des RB-LWS (hf) zur Verfügung steht.

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

Test von PCM im Entwicklungsstatus

Im November und Dezember 2017 wurden Produkte des Unternehmens ROMONTA für die Verwendung als PCM getestet. ROMONTA stellt anwendungsorientierte Wachse auf Basis von Rohmontanwachs aus bitumenreicher Braunkohle her. Es sollte herausgefunden werden, ob diese Stoffe (noch nicht auf dem PCM-Markt verfügbar) einen Mehrwert für den Wärmespeichersektor und das Projekt bieten.

Es wurden 3 verschiedene Wachsproben hinsichtlich des Handlings und der Wärmeleitfähigkeit im festen Zustand untersucht. Die granulierten Wachse wurden zuerst in eine selbst hergestellten Silikonform mit den Innenmaßen 60 x 60 x 5 mm gegeben und danach in einem Ofen bei den angegebenen Schmelztemperaturen (+10 K) aufgeschmolzen.

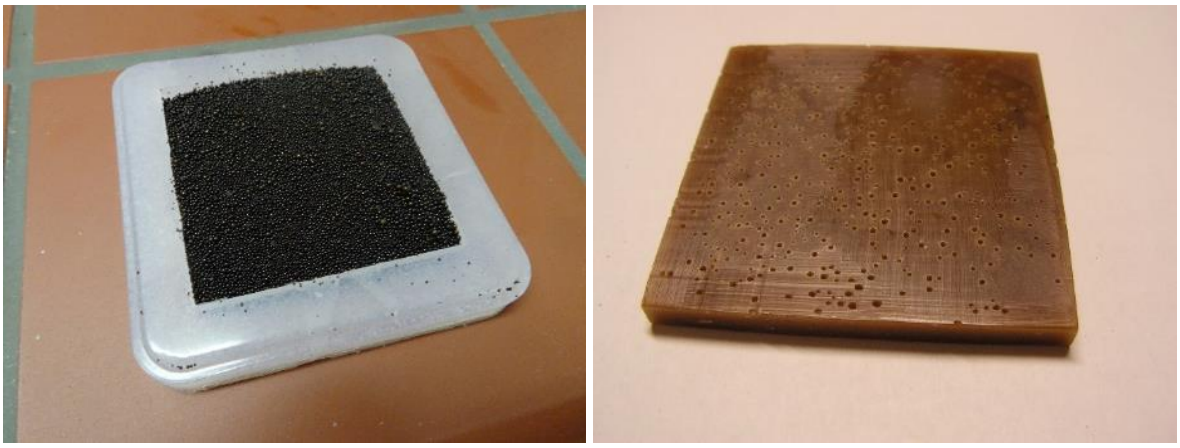

Abbildung 1-34: Granulat der Probe 1 in Silikonform, rechts: Lufteinschlüsse auf Rückseite der erstarrten Probe 2

Nach Herausnehmen und dem natürlichen Erstarren der Proben lagen Platten in den genannten Abmessungen vor, welche jedoch mit gewissen Lufteinschlüssen in Form von Blasen versehen waren. Dies war besonders auf der Rückseite der Probenplatten zu erkennen (siehe Abbildung 1-34). Diese Lufteinschlüsse haben negative Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit, aber auch auf die Dichte der Platte. An der Vorderseite bildete sich hingegen eine sehr homogene Oberfläche aus, welche jedoch auf Grund der Volumenänderung während des Erstarrens und der Oberflächenspannung konkav ausgebildet war und plan geschliffen werden musste.

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

Abbildung 1-35: ROMONTA-Proben 1, 2 und 3

Zur Bestimmung der Dichte wurden die Proben mit einem Messschieber vermessen und mit einer Feinwaage gewogen. Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Proben in einer Plattenapparatur vermessen. Diese Apparatur wurde speziell zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Festkörpern aufgebaut und befindet sich im Labor Energiesystemtechnik.

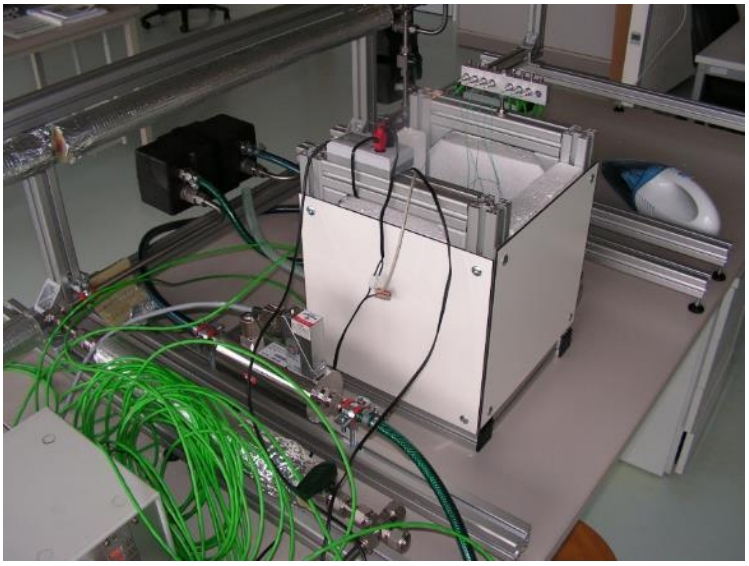

Abbildung 1-36: Plattenapparatur zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Probenplatten

In der Plattenapparatur wird jeweils eine Probenplatte zwischen referenzplatten und Temperierfolien gestapelt. Der gesamte Stapel ist zur Reduzierung der Wärmeverluste in einer Styroporschüttung untergebracht. Wird über die Temperierfolien ein Wärmestrom durch den Sta-

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

pel geleitet, kann mittels Temperaturmesstechnik ein Temperaturgradient ermittelt und aus diesem die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnet werden.

Tabelle 1-2: Ergebnisse von Stoffwertuntersuchungen der ROMONTA-Proben

Werte für 20 °C	Probe 1	Probe 2	Probe 3
ϑs [°C] aus Datenblatt	78	100	77
Dichte [kg/m³]	974	934,2	968,6
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	0,232	0,257	0,259

Fazit

Gerade im Hinblick auf Schmelztemperatur (aus mitgeliefertem Datenblatt), Schmelzenthalpie (aus mitgeliefertem Datenblatt), Dichte und Leitfähigkeit besitzen die Wachsproben Stoffeigenschaften, welche vergleichbar sind mit bereits etablierten PCM-Produkten. Über die Zyklenstabilität und Degradation beispielsweise ist noch nichts bekannt. Vom Handling her besitzen die Proben keine Nachteiligen Eigenschaften. Sie ließen sich gut aufschmelzen und ebenso im festen Zustand bearbeiten. Wir werden unsere Wärmespeicherforschung weiterhin mit den etablierten PCM fortsetzten, da wir hierfür fundierte Kenntnisse über die Zyklenstabilität besitzen, welche sehr wichtig für derartig genutzte Stoffe sind. Mit weiteren F&E-Tätigkeiten reihen sich die getesteten Produkte (oder andere) schon bald in den PCM-Markt ein.

Korrosionstests zwischen PCM und Stählen

Um sicher zu stellen, dass es während des Speicherbetriebes zu keinen nachteiligen Wechselwirkungen zwischen PCM und Behältermaterialien kommt, wurden Korrosionstests in Auftrag gegeben. Diese sollen die Einsatzfähigkeit bestimmter Stähle für den Latentwärmespeicherbau, speziell im Hinblick auf Korrosion validieren oder widerlegen. Ergebnisse der Korrosionstests, welche am Fraunhofer IFAM in Dresden in Auftrag gegeben wurden sind in ei-

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

nem gesonderten Bericht zusammengefasst [5]. Auszüge aus diesem Bericht sind nachfolgen aufgeführt.

Dafür wurden Materialproben von Behältermaterialien im PCM angeordnet und das PCM zyklisch geschmolzen und erstarrt. Nach einer Mehrzahl an Zyklen können erste Aussagen über Veränderungen an den Behältermaterialien getroffen werden. Zusätzlich zum reinen Behältermaterial werden auch verschweißte Proben untersucht. Schweißnähte am Behälter bieten potentiell eine größere Wahrscheinlichkeit für einen Korrosionsangriff als das reine Material aufgrund des Kontaktes verschiedener Materialpaarungen.

Die Stahlplättchenproben sind in 20 x 20 x 3 mm Dimensionen und die verschweißten Proben analog dazu aus zwei senkrecht aufeinander geschweißten Plättchenproben ausgeführt (siehe Abbildung 1-37).

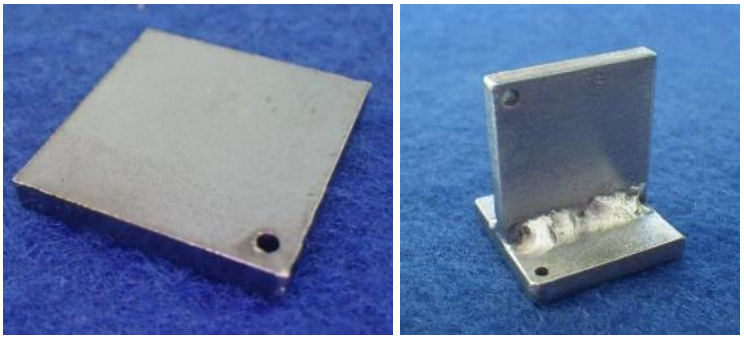

Abbildung 1-37: Links: Plättchenprobe, Rechts: Kehlnahtprobe

Tabelle 1-3: Untersuchte Stahl/PCM-Paarungen

		PCM	
		RT80HC (Ts = 78 °C)	PlusICE A118 (Ts = 118 C°)
Behälter-material	1.0038	x	x
	1.4301	x	x
	1.4404	-	x

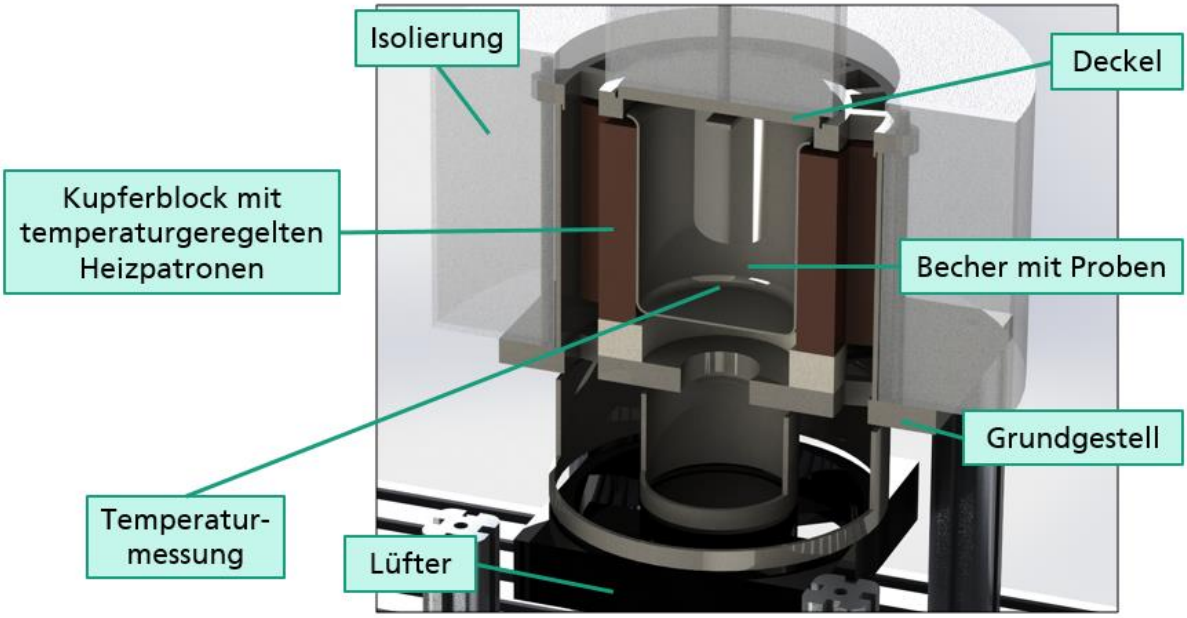

Abbildung 1-38: Innenaufbau der Zyklierapparatur

Die PCM werden in der Apparatur jeweils 50mal aufgeschmolzen und erstarrt, durchlaufen also 50 Speicher-Zyklen mit über- und Unterschreitung der Schmelztemperatur. Dabei befinden sich die Stahlproben innerhalb des PCM. In der folgenden Abbildung ist ein typischer Temperaturverlauf eines Zyklus dargestellt.

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

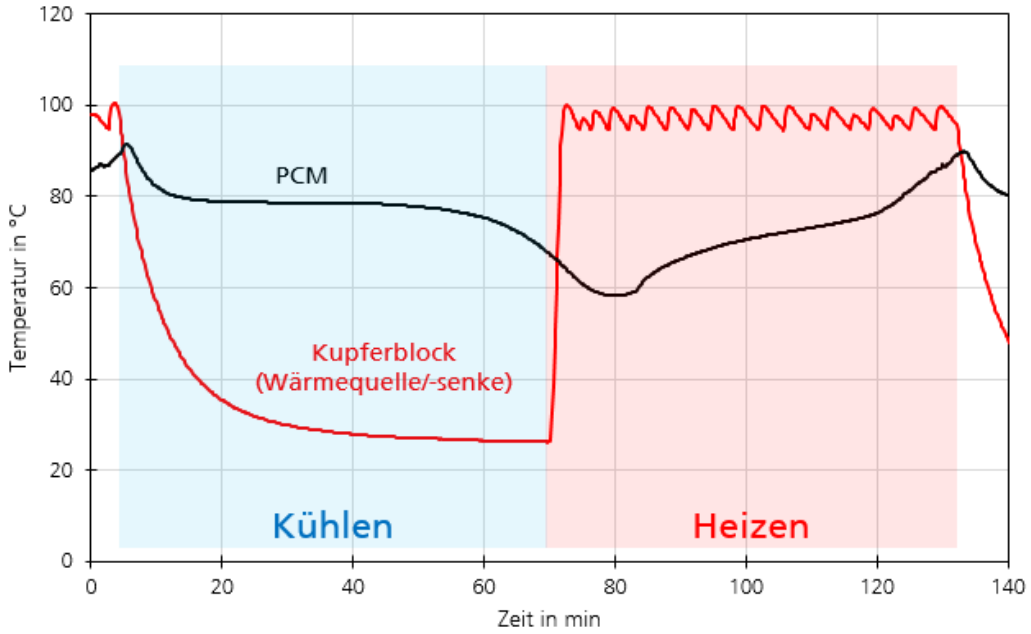

Abbildung 1-39: Typischer Temperaturverlauf eines Heiz- und Kühlzyklus hier am Beispiel des RT80HC

Nach Beendigung der 50 Zyklen wird die Stahlprobe gereinigt und Materialveränderungen sowohl optisch als auch anhand der Masse mit einem zuvor festgehaltenen Anfangszustand verglichen. In den nachstehenden Tabellen sind die massebezogen Probenveränderungen über die Zyklierversuche aufgeführt.

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

Tabelle 1-4: Massebezogene Änderungen für Stahl 1.0038

	RT80HC				PlusICE A118
Probennummer	230006_52_KLE1704_05	230006_52_KLE1704_06	230006_52_KLE1704_07	230006_52_KLE1704_10	230006_52_KLE1704_15
Art	Plättchen	Plättchen	Plättchen	Kehlnaht	Kehlnaht
Masse vorher in g	9,13	9,10	9,09	18,11	19,14
Masse nachher in g	9,10	9,10	9,08	18,11	19,13
Masseänderung in %	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0

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

Tabelle 1-5: Massebezogene Änderungen für Edelstahl 1.4301

	RT80HC				PlusICE A118
Probennummer	230006_52_KLE1704_01	230006_52_KLE1704_02	230006_52_KLE1704_03	230006_52_KLE1704_09	230006_52_KLE1704_14
Art	Plättchen	Plättchen	Plättchen	Kehlnaht	Kehlnaht
Masse vorher in g	9,32	9,32	9,27	19,11	18,84
Masse nachher in g	9,32	9,32	9,27	19,11	18,84
Masseänderung in %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

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

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

Tabelle 1-6: Massebezogene Änderungen für Edelstahl 1.4404

	RT80HC	PlusICE A118
Probennummer	230006_52_KLE1704_11	230006_52_KLE1704_16
Art	Kehlnaht	Kehlnaht
Masse vorher in g	18,95	19,23
Masse nachher in g	18,96	19,23
Masseänderung in %	0,1	0,0

Fazit

Optisch ist an den Stahlproben, wenn überhaupt, lediglich eine Patinabildung aufgetreten. Bezogen auf die Masse gab es keine Veränderungen, bzw. keine die nicht auf die Genauigkeit der Waage zurück zu führen ist. Somit wird der in den kommenden Monaten zu entwickelnde Speicherdemonstrator, welcher seinen Einsatz an der Biomasse-Vergasungsanlage finden soll, aus Edelstahl 1.4301 gefertigt werden. Klassischer Baustahl hatte zwar ebenso keine Oberflächenveränderungen während der Korrosionsversuche aufgewiesen, dennoch sollte bei einem anwendungsorientierten Speicher von einer wesentlich höheren Zyklenzahl ausgegangen werden. Für höhere Zyklenzahlen stellt Edelstahl dabei zwar die teurere, aber auch beständigere Variante dar.

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

Aufbau, Druck- und Handlingprüfung

Nachdem die ersten für den Aufbau des Versuchsstandes relevanten Komponenten geliefert wurden, wurde mit dem Aufbau des mobilen Ständerwerks begonnen und anschließend der mittig gelagerte Behälter aufgehängt. Durch die drehbare Lagerung soll das Handling während Berohrungsarbeiten und der PCM-Wechsel erleichtert werden (siehe Abbildung 1-40).

Abbildung 1-40: Links: Latentwärmespeicher (hf) im Zittauer Kraftwerkslabor während Druckprüfung, Rechts: - mit Iso.

Danach wurden die inneren Lochscheiben auf die Stutzringe geschraubt und die Silikondichtungen aufgelegt. Vor den Berohrungsarbeiten für die Druckprüfung wurde der Speicher in waagerechte Position gedreht. Für die Berohrung wurden die gegenüberliegenden Bohrungen der montierten Lochscheiben mit einem langen Gewindestab anvisiert und der Stab eingeschoben (siehe Abbildung 1-41, links). Anschließend wurde ein Bündelrohr über den Gewindestab gefädelt und so an seine Position zwischen den Lochscheiben gebracht. Durch Auflegen der äußeren Lochscheiben und verschrauben mit den inneren -Scheiben wird eine Quet-

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

schung der Silikondichtung erreicht und die Bündelrohre durch die Materialverdrängung fixiert und abgedichtet (siehe Abbildung 1-41, rechts).

Abbildung 1-41: Links: Zur Hälfte berohrte Bündelaufhängung des RB-LWS (hf), Rechts: mit äußerer Lochscheibe gequetschte Bündelaufhängung

Zur Komplettierung des Versuchsstandes für die Testdurchströmung wurden die Klöpperböden, an denen sich die Medienschlüsse befinden, aufgesetzt und befestigt. Nun konnte der Speicher an die Testanlage gekoppelt und mit der Durchströmung des Rohrbündels im Speichers begonnen werden. Das Handling der Berohrungsarbeiten stellte sich als sehr gut heraus. Für das Einfädeln der 112 Rohre wurde weitaus mehr Zeitaufwand erwartet.

Der erste Leckagetest mit 1 bar Überdruck verlief sehr positiv. Es wurde das passenden Anzugsmoment zur ausreichenden Quetschung der Dichtung gefunden. Durch die waagerechte Stellung des Speichers konnte Flüssigkeit bei einer möglichen Leckage durch die seitlich am Mantelzylinder angebrachten Stutzen austreten und leicht identifiziert werden. Dies war jedoch nicht der Fall. Ebenso wurde kein Druckabfall im Medienkreislauf detektiert.

In anschließenden Abreiten wurde der Latentwärmespeicher (hf) isoliert und steht nun für die empirischen Untersuchungen im Zittauer Kraftwerkslabor zur Verfügung.

Ausblick

Auf Grund von Lieferverzögerungen konnte bisher nur der Aufbau und die Leckageprüfung durchgeführt werden, über welche vorab Berichtet wurde. Die Teile sind nun nach Ablauf des Berichtzeitraumes eingetroffen und können für die schnelle Kopplung des Speichers an die

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

Testanlage genutzt werden und somit den Versuchsbetrieb gewährleisten. Bei den Bauteilen handelt es ich um sonderangefertigte Messleitungen, an denen sich Differenzdruck- und Temperaturmessung für Vor- und Rücklauf befinden und somit essentiell für einen ergebnisorientierten Testbetrieb sind.

Produktgasspeicher

Der Laborversuchsstand Produktgasspeicher wurde zu Beginn im Labor Energiesystemtechnik der HSZG aufgebaut und anschließend einer Druckprüfung unterzogen. Dabei wurde der Speicher mit Luft aus der Druckluftleitung beaufschlagt und nah unter dem Berstdruckes der Berstscheibe, bei 3,66 bar gehalten. Ergebnisse waren die nachgewiesene Dichtigkeit des Speichers, sowie Funktionstüchtigkeit der Messtechnik. Zu sehen war auch eine klare Wölbung der Berstscheibe während der Prüfung, welche einen Druck nahe des Berstdruckes vermuten lässt und den Anwendungsdruckbereich der Scheibe bestätigt. In weiteren Arbeitsschritten wurde die für den Versuchstand beschaffte Gaspumpe installiert und zur Steuerung der Drehzahl mit einem Frequenzumrichter ausgestattet.

Nach erfolgter Druckprüfung wurde der Speicher für eine Messfahrt am 31.01.2018 in die Halle an die Biomasse-Vergasungsanlage verlegt. Bei der Messfahrt wurde der Speicher mit Produktgas aus der stationären Betriebsweise der Anlage geladen. Zuvor musste der Speicher mit einem Inertgas gespült werden, um Luft und den darin enthaltenen Sauerstoff aus dem Versuchsstand zu drängen. Dieser Vorgang konnte mit Stickstoff realisiert werden.

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

Abbildung 1-42: Links: An Biomasse-Vergasungsanlage gekoppelter Produktgasspeicher, Rechts: Spülen des Speichers mit Stickstoff aus einer Gasflasche

Das Produktgas wurde dann mit der Gaspumpe aus der Produktgasleitung abgesaugt und in den Speicher transportiert. Anschließend dauerte es etwas über eine Stunde um den Stickstoff durch Mischen mit Produktgas und Abgabe an die Umwelt vollständig aus dem Speicher zu verdrängen. Der Volumenstrom war bei diesem Vorgang sehr gering und wurde durch die in Reihe geschaltete Gasanalyseapparatur vorgegeben. Nachdem die Gasanalyse keinen Stick- sowie Sauerstoff mehr detektiert hatte, wurde die Druckbeladung mit Produktgas begonnen. Nach 5 Minuten und bei einem Speicherdruck von 2,04 bar war der Vorgang beendet, der Speicher wurde geschlossen und die Pumpe gestoppt. Während der Verdichtung stieg die Temperatur um 4 K auf 24 °C an. Auf diesen Vorgang ist auch der geringe Druckrückgang nach Schließen des Speichers zurückzuführen. Während des Temperaturausgleiches des nicht isolierten Speichers mit der Umgebung kontrahierte das Gas im Inneren etwas. Der stationäre Speicherdruck lag später bei 2,02 bar und blieb nach Beendigung der Messfahrt bis Montag

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

den 02.02.2018 12 Uhr, dem Zeitpunkt der Entladung, konstant. Die Entladung erfolgte wieder über die Gasanalyse, welche dabei eine unveränderte Gaszusammensetzung darstellte.

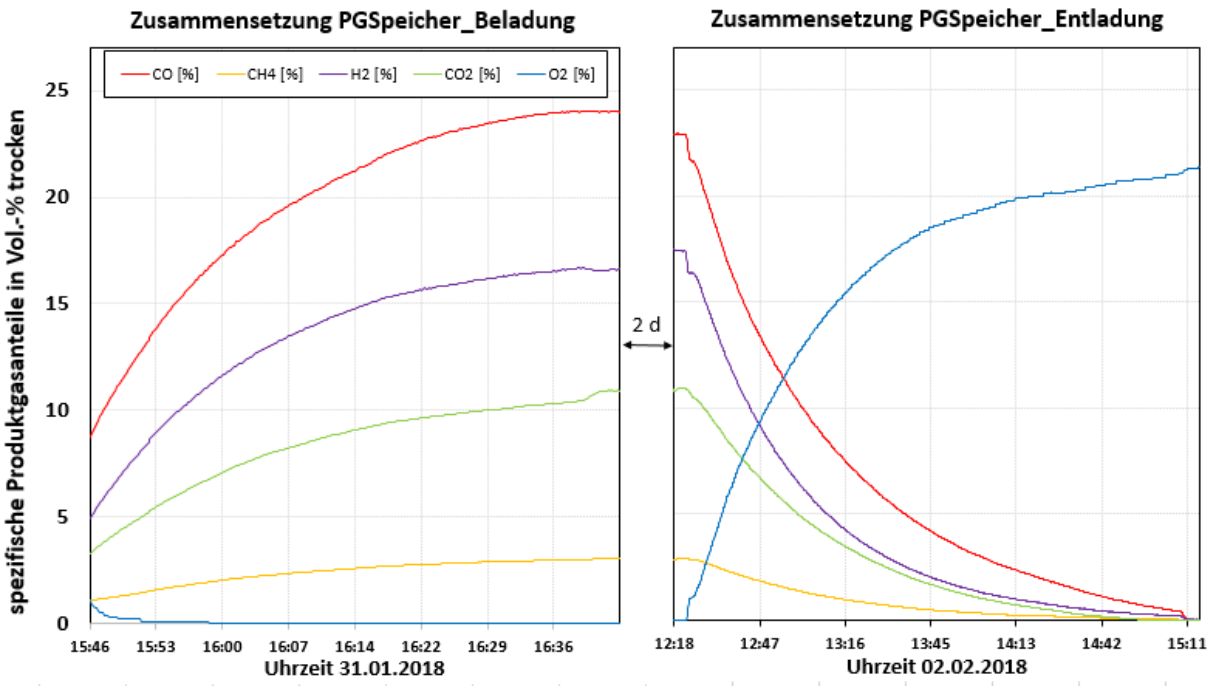

Abbildung 1-43: Verlauf der Gaszusammensetzung im Speicher während des Speicherzyklus

Somit konnte die prinzipielle Einsatzfähigkeit des Speichers nachgewiesen werden, wobei die Speicherkapazität von 12 l für einen anwendungsorientierten Speicher ungenügend ist. Die Kapazität lässt sich jedoch über eine einfache Skalierung des Speichers erhöhen. Dazu müsste evtl. sogar nur der Mantel mit einem angeflanschten Zylinder erweitert werden, was eine Kommunikation mit dem TÜV und eine strikte Einhaltung des Explosionsschutzes für größere Behälter erfordert.

Pulsationsdämpfung

Laborversuche zur Dämpfung eines pulsierenden bzw. fluktuierenden Gasvolumenstromes, wie dieser am Biomassevergasungs-BHKW auftritt, wurden an 6 unterschiedlichen Versuchssetups durchgeführt. Siehe Tabelle 1-7 und Abbildung 1-44. Unter einer Pulsationsdämpfung versteht man das Glätten, eines schwankenden Volumen- oder Massenstromes zwischen zwei Bezugspunkten innerhalb eines Leitungssystems, in Richtung des Mittelwertes.

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

Tabelle 1-7: Erläuterungen zu den Versuchssetups

Setup	Erläuterungen
0	Ohne Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung ohne Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle gefördert, Pulsator am Eintritt
1	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle gefördert, Pulsator vor Speicher
2	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator vor Speicher
3	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle und saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator vor Speicher
4	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle und saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator hinter Speicher
5	Ohne Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle und saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator am Eintritt

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

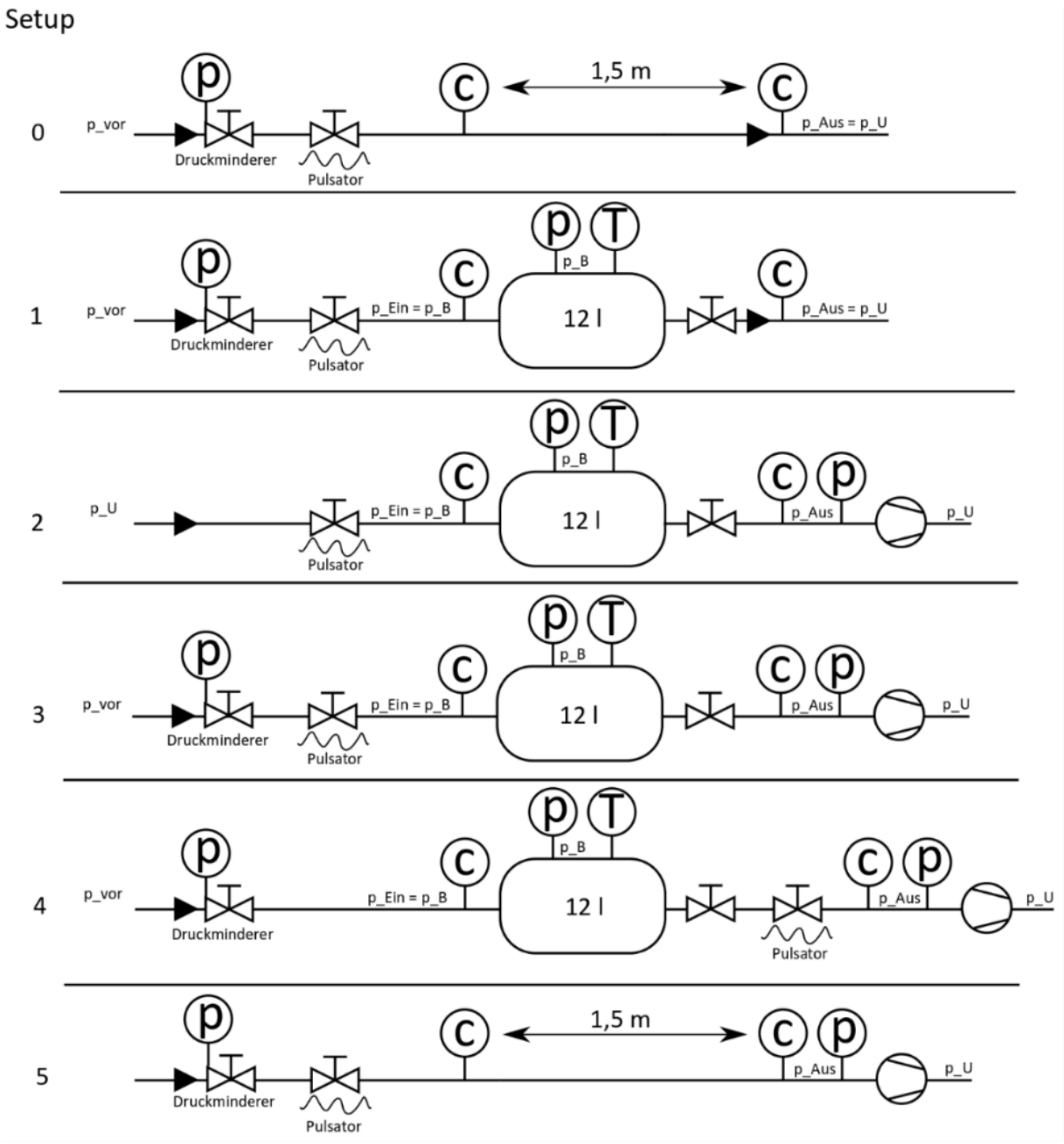

Abbildung 1-44: Setups der Pulsationsversuche

Alle Versuche wurden mit dem Medium Luft bei Umgebungstemperatur (22 °C) durchgeführt. Dabei wurde in Setup 0 und 5 das Dämpfungsverhalten der reinen Rohrleitungen inklusive Messstrecken untersucht. Somit konnte man den Zustand ermitteln in dem auf Grund des kleinsten (kompressiblen) Gasvolumens und Druckverlust die geringste Pulsationsdämpfung zu erwarten ist. Setup 5 ähnelt dabei dem aktuellen Aufbau am Biomassevergasungs-BHKW mit Vergasungsluftzuführung (mittels Druckluftzuführung im Versuchsaufbau und Seitenka-

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

nalverdichter am BHKW) und Produktgasansaugung (mittels saugseitiger Membranpumpe im Versuchsaufbau und Motor am BHKW). Setup 3 stellt die geplante Variante mit integriertem Gasbehälter/-Speicher vor. Alle weiteren Setups wurden initiiert um z.B. eine saugseitige Pulsation oder Betriebsarten mit reiner Saug- oder Druckdurchströmung zu untersuchen und zu bewerten.

Es wurden jeweils die Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten (Volumenströme), sowie die Druckverhältnisse vor, nach und in dem beobachteten Gasvolumen (entweder Behälter + Leitung oder Leitung) gemessen. Aus den Messwerten von Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit wird der Dämpfungsgrad bestimmt. Mit dem Pulsator (Nadelventil) wird entweder vor oder hinter dem betrachteten Gasvolumen manuell eine zufällige Volumenstrompulsation erzeugt. Durch vergleichen der Peaks (Amplituden) von Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit wird mittels Excel-Tool der Dämpfungsgrad der jeweiligen Messung bestimmt. Für jedes Setup wurden während der Messfahrten die Volumenströme, die Kükenhahn-Stellung (hinter dem Behälter) und somit der Druckverlust variiert. Dadurch kann der Einfluss dieser Größen auf den Dämpfungsprozess erfasst werden. Den vorangegangenen Simulationsrechnungen zu Folge sind dies die beiden Parameter, neben dem Gasvolumen, mit dem größten Einflusspotential auf die Pulsationsdämpfung.

Im nachstehenden Bild ist der Versuchsaufbau im Setup 4 mit piktogrammischen Bauteilerläuterungen dargestellt.

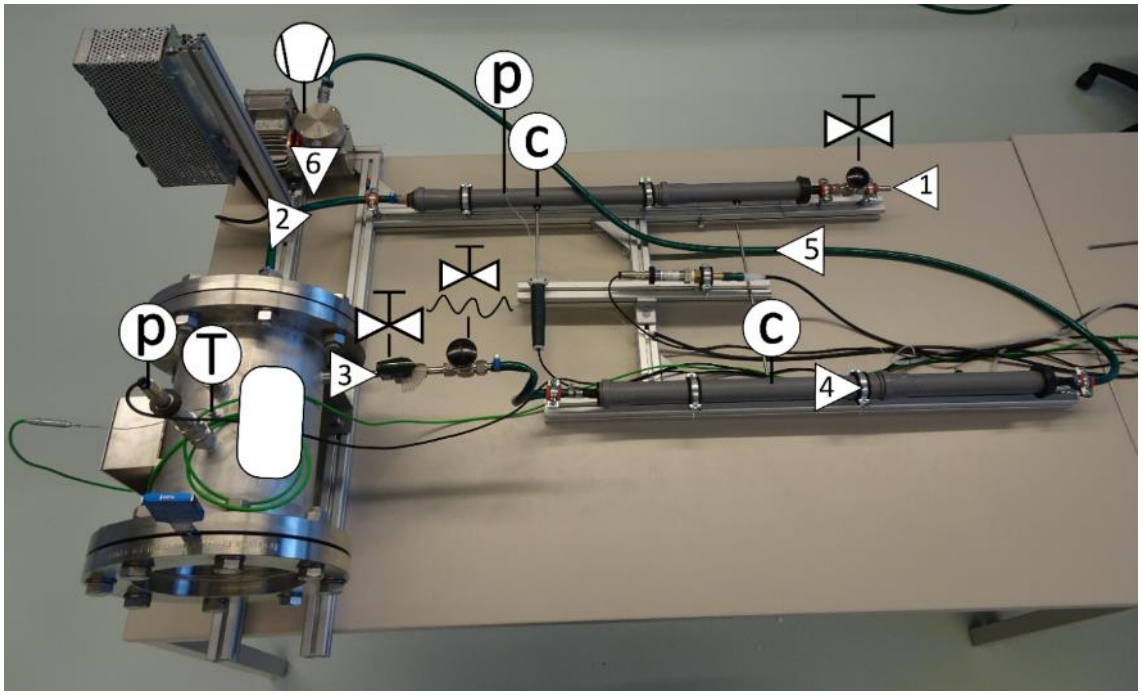

Abbildung 1-45: Versuchsaufbau im Setup 4 mit Bauteilerläuterungen

Die nachstehenden Diagramme zeigen Messdaten der Pulsationsdämpfungsversuche für ein Setup mit geringem Dämpfungsgrad (Setup 0.3) und eines mit hoher Pulsationsdämpfung (Setup 3.1). Diese sollen darstellen in welchen Größenordnungen sich die Schwankungen des Volumenstromes bzw. der Strömungsgeschwindigkeit bewegen und welche Dämpfungsgrade mit welchen Konfigurationen erreicht werden können. Im Diagramm für Setup 3.1 sind die Ein- und Austrittsgeschwindigkeit aufgeführt und die Minima und Maxima gekennzeichnet, zwischen denen die Messwerte, wie im Histogramm (Abbildung 1-48) dargestellt, unterschiedlich oft auftreten. In Richtung des Mittelwertes wird das Auftreten, ähnlich einer Glockenkurve, häufiger.

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

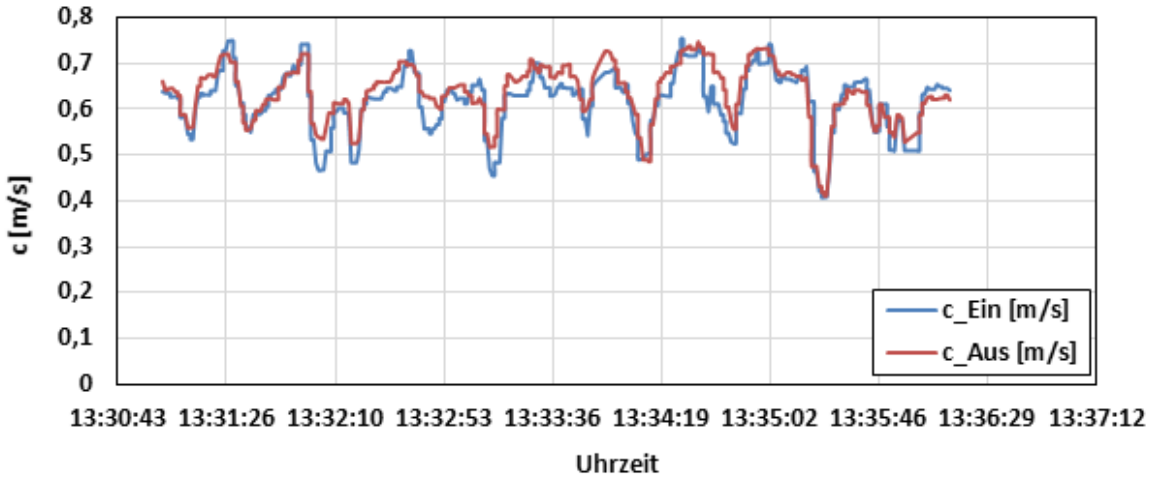

Abbildung 1-46: Messdaten des Setup 0.3; 0,6 m/s; 2,6% Dämpfungsgrad

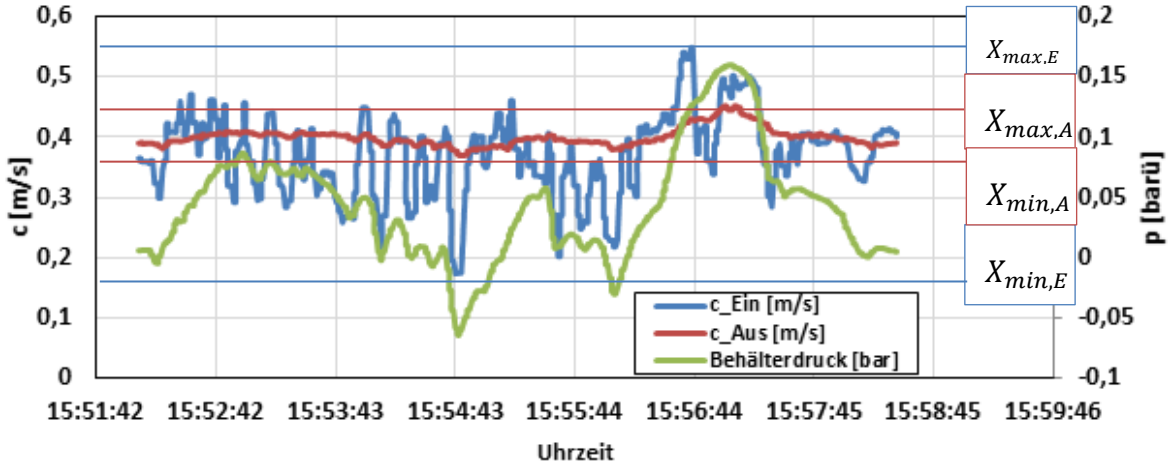

Abbildung 1-47: Messdaten des Setups 3.1; 0,4 m/s; Kükenhahn-Stellung 0°, 74% Dämpfungsgrad

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

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

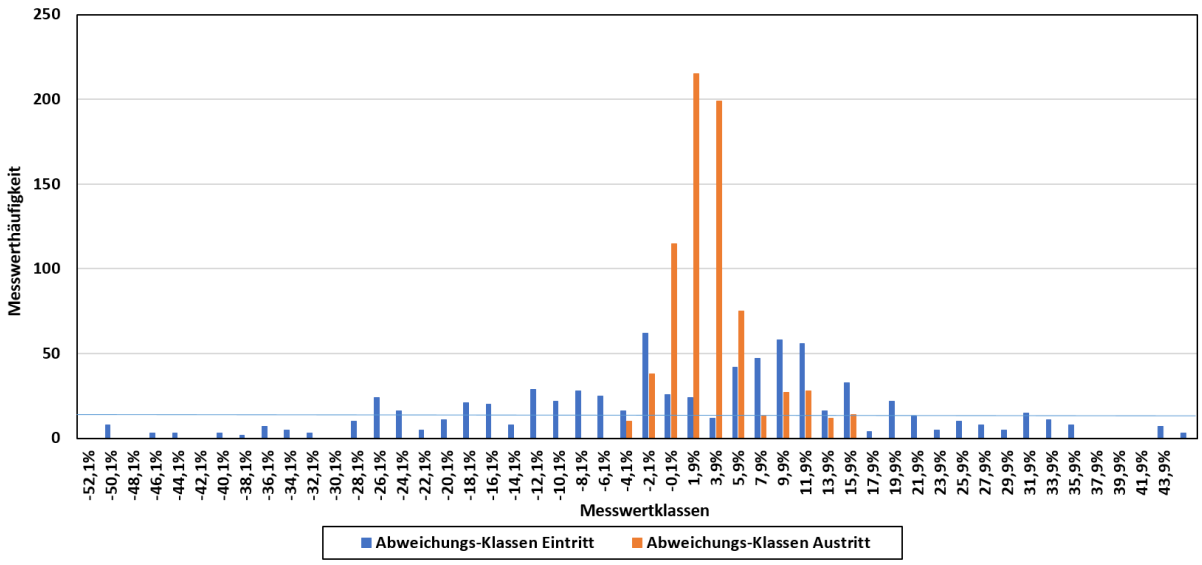

Abbildung 1-48: Histogramm Setup 3.1 von Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten orientiert am Mittelwert

Das Histogramm in Abbildung 1-48 veranschaulicht den jeweils für Eintritts- und Austrittsvolumenstrom in 50 Klassen unterteilte Messwertbereich, sowie die Häufigkeit der Messwertklassen pro Messfahrt. Es verdeutlicht somit die Anzahl der gemessenen Volumenstromwerte von Ein- bzw. Austritt und deren relativen Abweichung vom Mittelwert bzw. Median.

Ein- und Austrittshistogramm beziehen sich dabei nicht zwangsläufig auf den gleichen mittleren Volumenstromwert. Durch messtechnische Unregelmäßigkeiten (z.B. die Positionierung des Hitzdrahtanemometers in der Messtrecke) und Druckunterschiede können diese trotz des Kontinuitätsgesetzes und gleich gearteter Messstrecken voneinander abweichen. Zur Bewertung einer vorliegenden Volumenstromdämpfung oder zur Feststellung einer vorliegenden Pulsation ist dies jedoch qualitativ ausreichend.

Anhand der belegten Klassenanzahl pro Messgröße (Eintritt- bzw. Austrittsgeschwindigkeit/Volumenstrom) wird der Dämpfungsgrad bestimmt. Es wird dabei der Quotient aus der Anzahl von Eintritts- und Austritts- Klassen gebildet.

$$DG = 1 - \frac{N_{K,A}}{N_{K,E}}$$

Die Klassenschrittweite wird dabei von den größten positiven und negativen Amplituden beider Messgrößen bestimmt, indem der Bereich zwischen minimaler und maximaler relativer Abweichung vom Mittelwert in 50 Klassen geteilt wird.

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

Beispiel zu obenstehenden Histogramm für Setup 3.1

$\bar{c}_i = \frac{\sum c,i}{N_{c,i}}$ $\bar{c}_E = 0{,}377\ m/s$ $\bar{c}_A = 0{,}398\ m/s$

$$e_{min,E} = \frac{\left(c_{min,E} - \bar{c}_E\right)}{\bar{c}_E} = \frac{\left(0{,}173\ \frac{m}{s} - 0{,}377\ \frac{m}{s}\right)}{0{,}377\ \frac{m}{s}} = -54{,}11\ \% = e_{min,HG}$$

$$e_{min,A} = \frac{\left(c_{min,A} - \bar{c}_A\right)}{\bar{c}_A} = \frac{\left(0{,}37\ \frac{m}{s} - 0{,}398\ \frac{m}{s}\right)}{0{,}398\ \frac{m}{s}} = -7{,}04\ \%$$

$$e_{max,E} = \frac{\left(c_{max,E} - \bar{c}_E\right)}{\bar{c}_E} = \frac{\left(0{,}548\ \frac{m}{s} - 0{,}377\ \frac{m}{s}\right)}{0{,}377\ \frac{m}{s}} = 45{,}36\ \% = e_{max,HG}$$

$$e_{max,A} = \frac{\left(c_{min,A} - \bar{c}_A\right)}{\bar{c}_A} = \frac{\left(0{,}451\ \frac{m}{s} - 0{,}398\ \frac{m}{s}\right)}{0{,}398\ \frac{m}{s}} = 13{,}32\ \%$$

Kleinstes Minimum und größtes Maximum sind die Grenzen des Histogrammbereiches (-54,11 %; 45,36 %)

$$N_{K,HG} = 50\ (\text{im Excel} - \text{Tool})$$

$$\Delta e_{HG} = \frac{\left(e_{max,HG} + \left|e_{min,HG}\right|\right)}{N_{K,HG}} = \left(\frac{45{,}36 + 54{,}11}{50}\right) = 2\ \%\ (\text{gerundet})$$

$$DG_{SU3.1} = 1 - \frac{N_{K,A}}{N_{K,E}} = 1 - \frac{11\ (\text{orange Säulen})}{43\ (\text{blaue Säulen})} = 0{,}744 \rightarrow 74{,}4\ \%$$

Für eine automatisierte Auswertung der Messwerte für jedes Setup und die dazugehörigen Parameter wurde ein Excel-Tool erstellt, welches die Messwerte einer Klasse zuordnet, summiert und somit die Säulenwerte des Histogramms bildet. Zur Anwendung des Tools müssen nur die Messwerte und die dazugehörigen Zeiten reinkopiert werden. Die Anzahl der Messdatenpunkte für Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten ist nicht vorgeschrieben und kann somit variieren.

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

Tabelle 1-8: Ergebnisübersicht der Pulsationsmessungen

Setup		Kükenhahn- Stellung [°]	mittl. Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	Dämpfungsgrad [%]
0	.1	-	0,2	5,26
	.2		0,38	6,98
	.3		0,6	2,56
1	.1	0	0,41	0
	.2		0,6	5
	.3		1	11,11
	.4	35	0,41	4,88
	.5		0,8	16,67
	.6		1,1	21,43
	.7	45	0,45	16,67
	.8		0,8	43,24
	.9		1	47,62
2	.1	0	0,25	85,29
	.2		0,4	82,93
	.3	45	0,33	68,42
	.4		0,22	69,7
3	.1	0	0,38	74,42
	.2	30	0,35	73,81
	.3	45	0,33	74,36
	.4	50	0,31	77,27
4	.1	0	0,25	68,42
	.2		0,38	40
	.3	45	0,28	33,33
	.4		0,35	65,57
5	.1	-	0,6	15,79

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

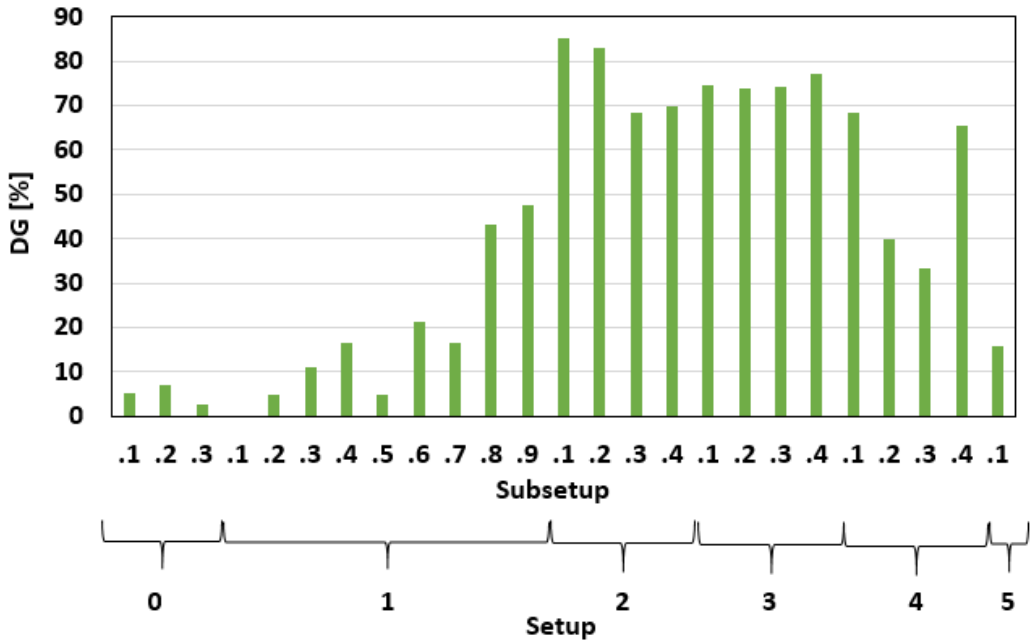

Abbildung 1-49: Dämpfungsgrade aller Versuchssetups als Säulendiagramm

Ergebnisinterpretation

Der Dämpfungseffekt ist nach den Ergebnissen stark von einem Druckverlust abhängig, welcher sich über den Verlauf des Rohrleitungssystems ergibt. Mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten ist der Effekt ebenfalls zu beobachten, wobei dadurch wiederum der Druckverlust über die Versuchsstrecke und vor allem über den Kükenhahn steigt. Die besten Dämpfungseffekte werden mit saugendem Fluidtransport erreicht. Das Vorhandensein eines Behälters bzw. eines erweiterten Gasvolumens im Rohrleitungssystem verstärkt den Effekt und bringt auch ohne Absaugung gute Ergebnisse beim Vergleichmäßigen von Gasströmungen mit sich.

AP3 - Reststoffverwertung und Emissionsverhalten

Optimierung Vergasermodul / Einflussgrößen

In Erweiterung der Systemanalyse soll die dem Reformer zugeführte Vergasungsluft in ihrer Temperatur variiert und damit eine Einflussgröße zur Optimierung des Vergasermoduls getestet werden. Zum einen ermöglicht dies eine detailliertere Betrachtung des Einflussparameters

„Temperatur“ auf den Vergasungs- und letztlich Gesamtprozess, zum anderen kann auch die angestrebte Ergänzung einer Latentwärmespeicherung vielfältiger simuliert werden.

Zur Vorwärmung der Luft kommen mehrere Konzepte zum Tragen. Bisher wird die durch einen Seitenkanalverdichter angesaugte Umgebungsluft mittels des heißen Produktgases über die bereits integrierte „Gas-Gas-Wärmeübertragerstrecke“ auf 300 °C temperiert. Ergänzend soll die Lufttemperatur nun mittels eines elektrischen Lufterhitzers auf bis zu mindestens 750 °C geregelt werden.

Hierfür sind mehrere Anforderungen an einen solchen Lufterhitzer zu beachten. Dazu zählt neben den bereits eingehenden 300 °C Fluidtemperatur sowie eingeschränkten Einbaudimensionen insbesondere die Wahrung von Prozessdrücken. Ein unvermeidbarer Druckverlust durch zusätzliche Einbauten muss demnach über den Verdichter kompensiert werden können.

Nach Recherchen, Berechnungen und Rücksprachen mit potentiellen Herstellern fällt die Wahl auf den Lufterhitzer *LE 10000 DF-R HT* der Leister Technology AG, bei welchem als Wärmeträger eine mit Glühwendeln durchzogene Keramikstruktur fungiert, durch welche die Vergasungsluft strömt. Mit einer maximalen Leistung in Höhe von $\dot{Q} = 15\ kW$ temperiert dieser Lufterhitzer nach Herstellerangaben (vgl. Abbildung 1-50) einen geforderten Mindestluftvolumenstrom $\dot{V}_{0,\min(20°C)} = 795\ {}^{l}/_{min}$ von $T = 20\ °C$ auf $T = 900\ °C$.

Dem zugrunde liegt die Energiebilanz $\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$ unter Berücksichtigung der entsprechenden Stoffwerte Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c_p sowie unter Ausschluss von Volumenänderungs- und Dissipationsarbeit. Der Druckverlust beliefe sich dabei auf circa 8 mbar. Mit zunehmendem Volumenstrom stiege entsprechend einer Geschwindigkeitserhöhung des Fluids im Heizkanal auch der Druckverlust.

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

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

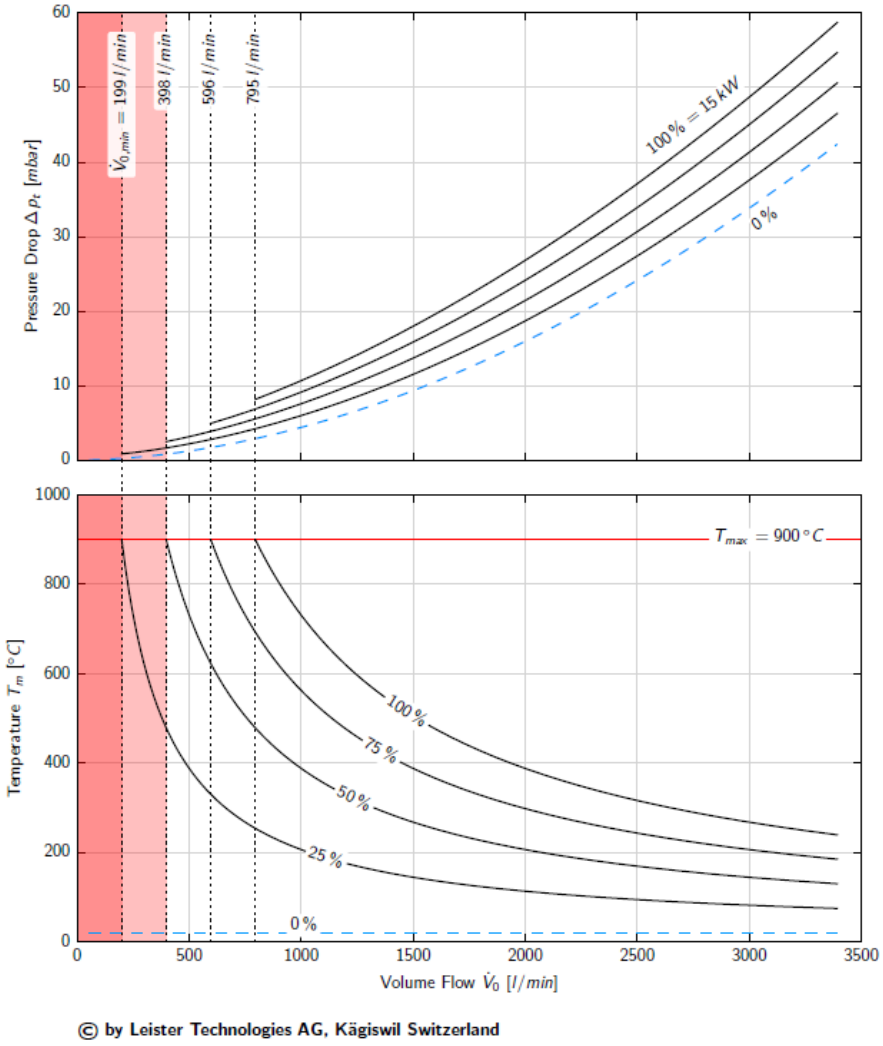

Abbildung 1-50: Standardisierte Eigenschaften des Lufterhitzers LE 10000 DF-R HT (Herstellerangaben)

Je nach letztlich gewünschtem Temperaturniveau wird eine Anpassung der Leistung gemäß prozessspezifischem, angesaugtem Vergasungsluftvolumenstrom dahingehend erfolgen, dass eine Überhitzung der Apparatur vermieden wird. Dies gewährleistet ein nach VDE-Bestimmungen vorgeschriebener Luftstromwächter, welcher auf Basis thermischer Anemometrie die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids vor Eintritt in den Lufterhitzer registriert. Vorversuche ergaben zudem, dass der eingebaute Seitenkanalverdichter das Potential aufweist, prognostizierte Druckverluste zu kompensieren.

Im weiteren Projektverlauf wird nun der Einbau der Apparatur (siehe Abbildung 1-51) in die bestehende Prozessstrecke (siehe Abbildung 1-52) realisiert.

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

Abbildung 1-51: Lufterhitzer zur Vergasungsluftvorwärmung

Abbildung 1-52: Bisherige Vergasungsluftzufuhrstrecke zwischen „Gas-Gas-Wärmeübertrager“ und Reformer

Brennstoffvariation

In [6] wurde im Rahmen eines Messprogrammes u.a. der Betrieb von Biomassevergasungsanlagen Ökonomisch bewertet. Ein diesbezügliches Ergebnis des Projektes war, dass die Brennstoffkosten, aufgrund relativ hoher Qualitätsanforderungen, einen hohen Anteil der Produkti-

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

onskosten verursachen und demzufolge einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage besitzen. Aus diesem Gesichtspunkt ist es interessant alternative Brennstoffe für Biomassevergasungsanlagen zu testen. Aus ökologischer Sicht könnte dabei eine Kaskadennutzung von Holz (z.B. energetische Nutzung von Holzabfällen aus Säge- und Möbelindustrie) sinnvoll sein.

Daher wurde mit verschiedenen Institutionen Kontakt (Spanner Re² GmbH, Biogastechnik Süd GmbH) aufgenommen und sowohl Proben von Abfällen aus der Möbelindustrie (mitteldichte Holzfaserplatte (MDF-Material) als auch Gärrestpelletproben eines Betreibers mehrerer Biogasanlagen beschafft. Die Analyse hinsichtlich ihres Asche-Schmelz-Verhaltens, des Brennwertes und deren Zusammensetzung erfolgte im eigenen Labor für Verbrennungstechnik. Durch diese Analysen konnte die prinzipielle Eignung der Materialproben als Zuschlag zum Standardbrennstoff für die Biomassevergasungsanlage nachgewiesen werden. Um das Material den HHS zuzumischen, sollten jedoch die beiden Stoffströme miteinander ein homogenes Brennstoffgemisch bilden und sich innerhalb der Anlage nicht entmischen. Daher wurde mit einem Schredder versucht, das MDF-Material auf die übliche HHS-Größe zu zerkleinern (vgl. Abbildung 1-53). Anschließend wurden für das zweite Halbjahr 2018 erste Vergasungstest der beiden Materialien im Rahmen der Projektarbeit vereinbart. Dabei soll vorerst ein Zumischanteil von ca. 5 Ma.-% im Vergleich zur Standardbrennstoffmasse getestet werden. Entsprechende Mengen des MDF-Materials und der Gärrestpellets wurden produziert und zugeschickt. Die Beimischung soll analog zur Vorgehensweise der katalytischen Vergasungsversuche im Tagesbehälter der Versuchsanlage manuell vorgenommen werden.

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

Abbildung 1-53: zerkleinertes MDF-Material

Abbildung 1-54: Probe der Gärrestpellets

AE3.2 – Reststoffverwertung

Bezüglich der Reststoffverwertung wurde mit Dr. Borchardt von der TU Dresden Kontakt aufgenommen. Die entsprechende Forschungsgruppe forscht zur Separierung von Kohlenstoff aus Abfallstoffen mittels mechanochemischen Reaktionen. Es wurde dahingehend eine Zusammenarbeit vereinbart, dass Proben des Reststoffes eingeschickt und erste Separierungstests durchgeführt werden. Dabei konnte die spezifische Oberfläche der Materialien von 300 m²/g auf 700 m²/g gesteigert werden (vgl. Abbildung 1-55). Für die Anwendung von Kohlenstoffmaterialien als Elektroden in elektrochemischen Energiespeichern werden sehr hohe spezifische Oberflächen benötigt, d.h. sehr nanoporöse Materialien. Klassische Aktivkohlen die derzeit eingesetzt werden, weisen spezifische Oberflächen um die 1500 m²/g auf. Daher werden weitere Versuche mit Variation der Prozessparameter durchgeführt, um die spezifische Oberfläche weiter zu steigern. Grundsätzlich ist für das Separierungsverfahren ein hoher Restkohlenstoffanteil von Vorteil, was auf den Reststoff aus der Holzvergasungsanlage zutrifft. Als Ergebnis der ersten Tests konnte die prinzipielle Eignung des Materials bestätigt werden.

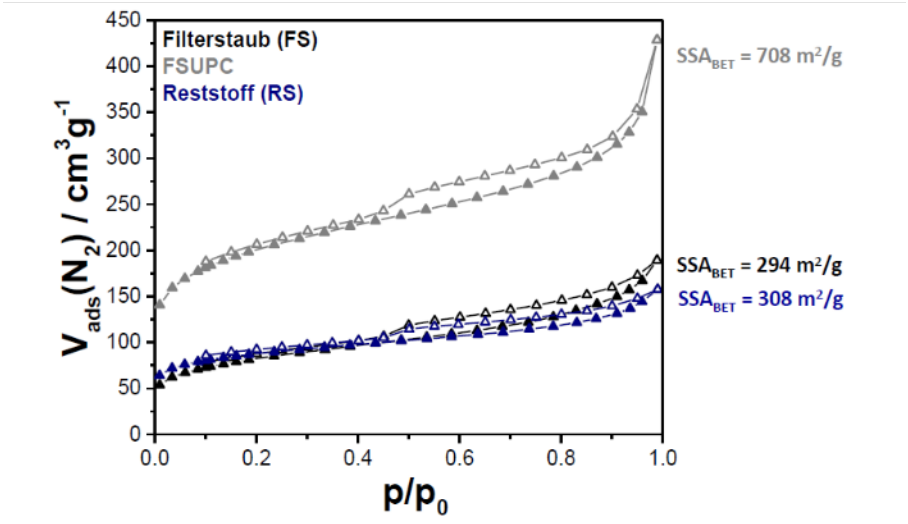

Abbildung 1-55: Ergebnisse der ersten Tests zur Kohlenstoffseparierung aus dem Reststoff des Holzvergasers, [7]

AE3.3 – Emissionsverhalten

Aus thermochemischen Anlagen zur Vergasung von Biomasse mit anschließender Nutzung des Produktgases in einem Verbrennungsmotor werden verschiedene luftverunreinigende Stoffe freigesetzt. Relevante Emissionen sind im Wesentlichen Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickstoffoxide (NO_x), außerdem Benzol (C_6H_6) und Formaldehyd (CH_2O) sowie andere Kohlenwasserstoffe aus der Verbrennungsmotoranlage. Die Luftverunreinigungen treten je nach Anlagentechnik, Bau- und Betriebsweise an verschiedenen Stellen in unterschiedlicher Art und Menge auf. Die derzeitigen gesetzlichen Anforderungen für genehmigungsbedürftige Anlagen (gemäß TA Luft 2002 für Verbrennungsmotoren mit einer Feuerungswärmeleistung <3 MW beim Einsatz von Bio- oder Klärgas, gilt als Anhaltspunkt) nach Tabelle 1-9 lassen sich nur einhalten, wenn sowohl Primär- als auch Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung ergriffen werden.

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

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

Tabelle 1-9: Grenzwerte der Emissionen (alles bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Bio- oder Klärgas, FWL < 3 MW, in Anlehnung an TA Luft 2002

	Fremdzündungsmotoren (Ottomotoren)
Kohlenstoffmonoxid in g/m^3	< 0,3 (bei Einstufung als „nicht-Biogas“ < 0,65 („bei Einstufung als Biogas“)
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid in g/m^3	< 0,5
Formaldehyd in mg/m^3	< 60
Gesamtstaub in mg/m^3	< 20
Benzol in mg/m^3	< 1
Organische Stoffe, angegeben als Gesamt-C in mg/m^3	< 20
Schwefeloxide in g/m³	< 0,35

Im Rahmen einer Langzeitmessfahrt wurde im Motorabgas erstmals die Gesamtstaubbeladung und der Gehalt an Gesamt-C (Organische Stoffe) erfasst. Das verwendete Messsystem zur Staubbeladung ist ein nach 1. BImSchV zugelassenes mobiles Staubanalysegerät SM 500 der Fa. Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH. Für die Erfassung der organischen Stoffe wurde ein Flammenionisationsdetektor (FID) der Fa. J.U.M. Engineering - GmbH eingesetzt. Als Ergebnis dieser Messungen konnte festgestellt werden, dass sowohl die Emissionen der Organischen Stoffe (als Gesamt-C) als auch die Gesamtstaubbeladung deutlich unter den Grenzwerten in Anlehnung an die TA Luft 2002 lagen.

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

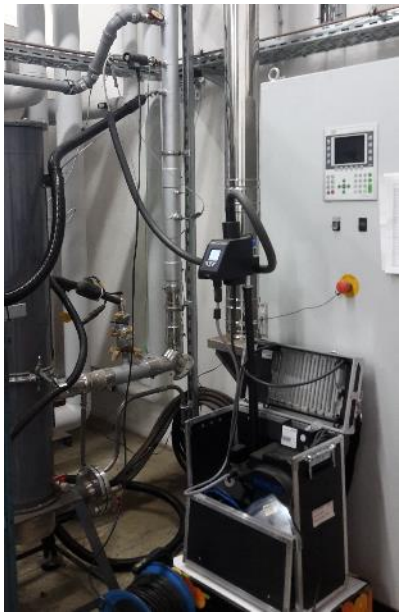

Abbildung 1-56: Messung des Gesamtstaubgehaltes im Motorabgas

Abbildung 1-57: Messung der organischen Stoffe (Gesamt-C) im Motorabgas mittels FID

KAT-Strecke

Im vorhergehenden Berichtszeitraum wurde ein Konzept zur Emissionsminderung erstellt, das auf Basis von Primärmaßnahmen (Rauchgasrezirkulation und Luftstufung) in Form einer Kat-Messstrecke eingesetzt werden soll. Dieses Konzept wurde weiterentwickelt, die konstruktive Planung abgeschlossen und die Fertigung beauftragt (vgl. Abbildung 1-58 und Abbildung 1-59).

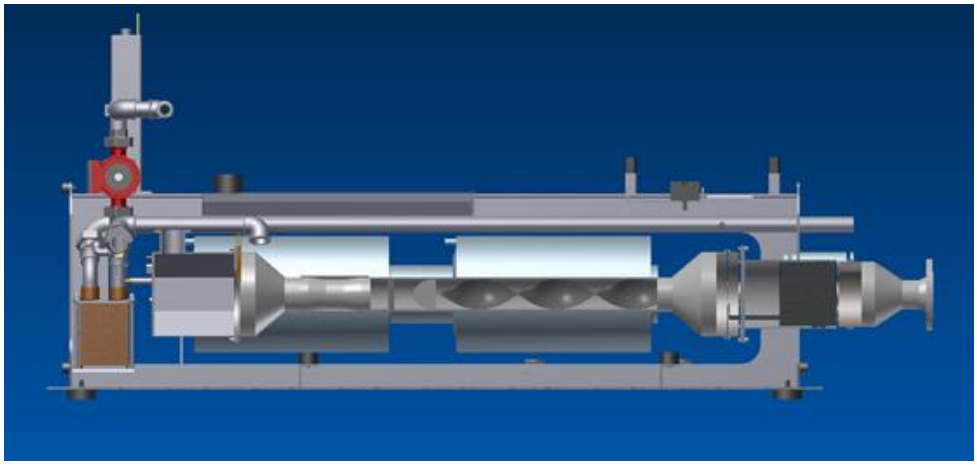

Abbildung 1-58: CAD-Konzeptdarstellung zur KAT-Strecke, [8]

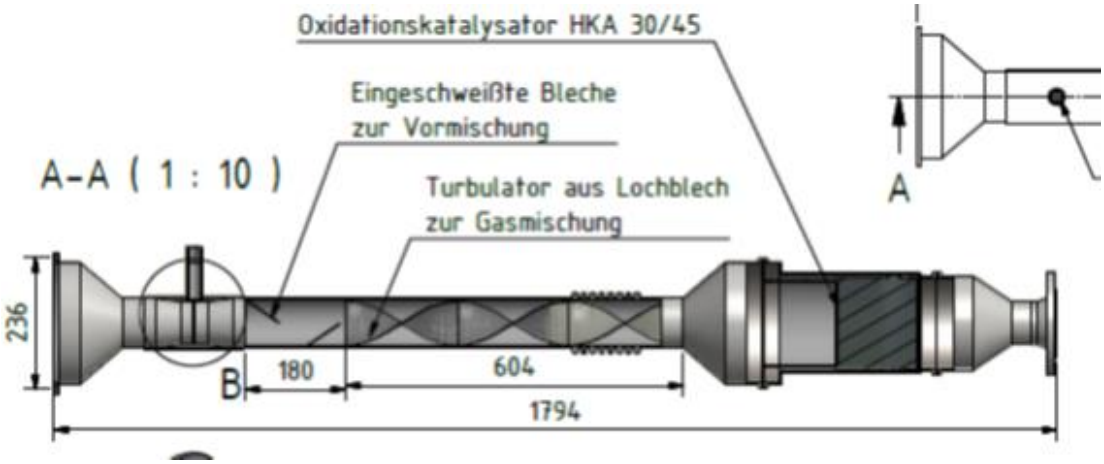

Abbildung 1-59: Konzeptskizze zur KAT-Strecke, [8]

Für den Einsatz der KAT-Strecke müssen die Betriebsparameter für die jeweiligen Katalysatortypen eingehalten werden. Dies betrifft neben der Abgastemperatur auch den Restsauerstoffgehalt im Abgas. Um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden und somit die optimale Katalysatorwirkung zur Verfügung zu stellen, müssen daher die Abgastemperaturen durch z.B. externe Wärmezufuhr und der Restsauerstoffgehalt (z.B. durch Eindüsung von Luft) beeinflusst werden. Dies kann mit der geplanten KAT-Messstrecke genauso realisiert werden wie der Testeinsatz verschiedener Katalysatoren an den beiden zur Verfügung stehenden Einsatzstellen. Dazwischen soll dem Abgas Luft zugeführt und durch Leitbleche bzw. Turbulatoren vermischt werden, um die notwendigen Betriebsparameter (Restsauerstoffgehalt) für den zweiten Katalysator (z.B. Oxidationskatalysator) bereitzustellen.

Rauchgasrezirkulation

Die prinzipielle Wirksamkeit einer Rauchgasrezirkulation konnte durch den installierten Bypass von der Abgasstrecke in den Ansaugtrakt des Motors weiter getestet und bestätigt werden. Eine beispielhafte grafische Auswertung des Emissionsverhaltens bei Einsatz der Rauchgasrezirkulation zeigt folgende Abbildung 1-60.

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

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

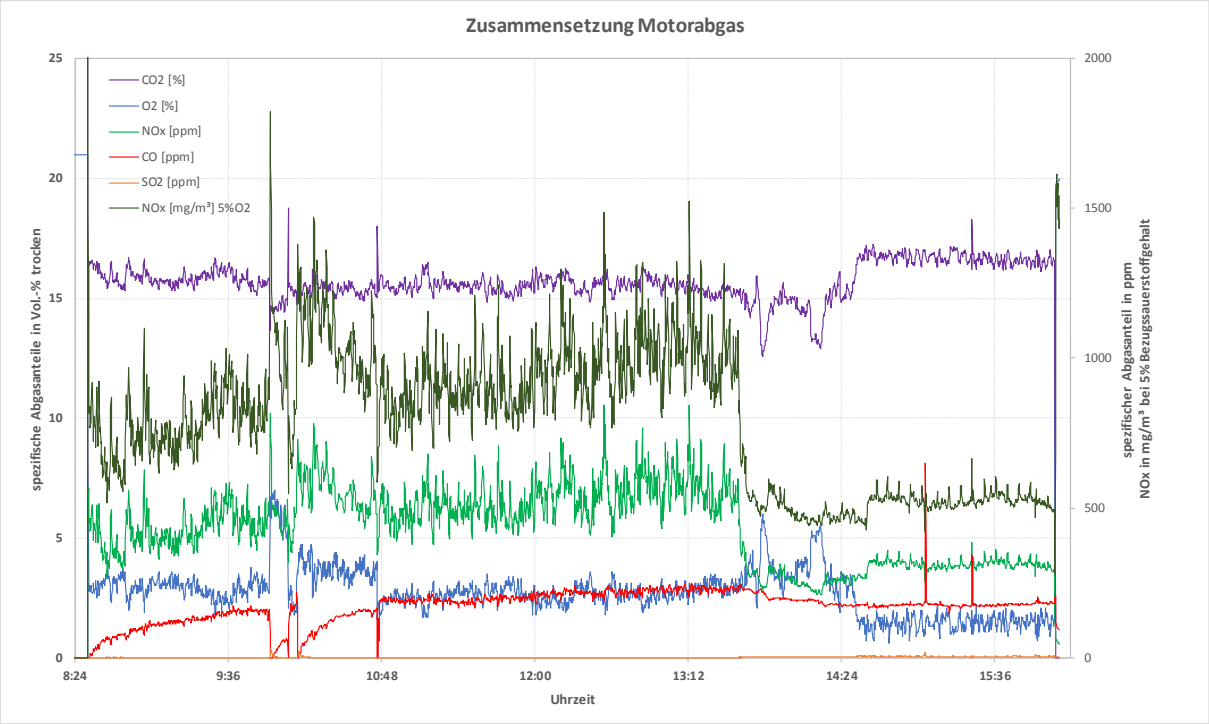

Abbildung 1-60: Emissionswerte vor und nach Einsatz der Rauchgasrezirkulation

Mit Einsatz der Rauchgasrezirkulation und erfolgreicher Anpassung der Lambdafahrweise ab ca. 14:30 Uhr konnte deutlich das Potenzial der Rauchgasrückführung zur Minderung der NOx-Emissionen gezeigt werden. Damit die BHKW-Leistung konstant bleibt, muss die Lambdafahrweise dahingehend angepasst werden, dass ein wesentlich geringerer Sauerstoffgehalt im Abgas akzeptiert wird. Da es sich bei der installierten Lambdasonde um eine Sprungsonde handelt, ist deren Einstellung sehr schwierig.

In Tabelle 1-9 zu den Emissionsgrenzwerten nach TA Luft 2002 sind auch Stoffe aufgeführt, die mit der vorhandenen Kaltgasanalytik nicht erfasst werden können. Dies betrifft u.a. Formaldehyd, Ammoniak oder Benzol, die abhängig von Temperatur und spezifischen Partialdruck im Motorabgas auskondensieren können. Um deren Anteil im Motorabgas zu erfassen, muss eine Heißgasmessung eingesetzt werden. Hierzu wurde eine umfangreiche Recherche durchgeführt, erste Angebote eingeholt und die vorhandenen Anforderungen mit den Anbietern diskutiert. Die Anforderungen an das Messsystem neben den vorhandenen Messbedingungen sind u.a. durch folgende Punkte beschrieben:

- Kontinuierliche Messung im Motorabgas
- Beheizbare, korrosionsbeständige Messzelle (180 °C)

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

- Gasprobenahme ohne Trocknung oder Verdünnung mittels beheizter Probenahmesonde und beheiztem Heizschlauch
- Kalibrierung der einzelnen Messgase
- Handhabbare Transportfähigkeit zu verschiedenen Einsatzorten

Durch die aufgeführten Anforderungen und als Ergebnis einer umfassenden Recherche wurde als Messprinzip die Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR) favorisiert und ein entsprechendes Analysensystem zum 04.05.2018 öffentlich ausgeschrieben. Zuvor konnte die entsprechende Analytik an der TU Dresden besichtigt und deren Einsatzfähigkeit in Bezug auf die Anforderungen mit den messtechnischen Betreuern diskutiert werden. Die Fa. ANSYCO GmbH erhielt den Zuschlag der Ausschreibung. In Folge dessen wurde deren angebotenes mobile Abgasanalysesystem DX4000 am 26.06.2018 in Auftrag gegeben.

Vergleich verschiedener Messsysteme zur Analyse der Zusammensetzung des Motorabgases

Zwecks Bewertung der Messwertzuverlässigkeit von Messsystemen zur Analyse des Motorabgases erfolgten in dem Zeitraum 16.05.2018 – 18.05.2018 Vergleichsmessungen mit verschiedenen Gasanalysensystemen. Dabei wurden nachfolgende Gasbestandteile mit den ausgewiesenen Analysatoren unterschiedlicher Hersteller gemessen und die Messergebnisse verglichen:

1. Sauerstoff (O_2)
   - OXYNOS 100 (Fa. Rosemount)
   - SIDOR (Fa. SICK AG)
   - VISIT 03H (Fa. Messtechnik EHEIM GmbH)
2. Kohlendioxid (CO_2)
   - BINOS 100 (Fa. Rosemount)
   - SIDOR (Fa. SICK AG) – keine kontinuierliche Datenerfassung
   - VISIT 03H (Fa. Messtechnik EHEIM GmbH)
3. Kohlenmonoxid (CO)
   - SIDOR (Fa. SICK AG)
   - VISIT 03H (Fa. Messtechnik EHEIM GmbH)
4. Stickoxide (NO_x)
   - SIDOR (Fa. SICK AG)
   - VISIT 03H (Fa. Messtechnik EHEIM GmbH)

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

5. Schwefeldioxid (SO_2) - SIDOR (Fa. SICK AG)
   - VISIT 03H (Fa. Messtechnik EHEIM GmbH)

Die Messergebnisse sind in nachfolgender Abbildung 1-61 als Trendgrafik über dem Versuchszeitraum dargestellt. Dabei sind qualitative und quantitative Unterschiede erkennbar.

Der Anlagenbetrieb in dem betrachteten Zeitraum erfolgte kontinuierlich bei gleichbleibenden Anlagen-Leistungsparametern. Anlagenbedingte Stillstände sind am 16.05.2018 von 16:00 Uhr – 16:26 Uhr sowie am 17.05.2018 von 04:14 Uhr – 08:23 Uhr zu verzeichnen.

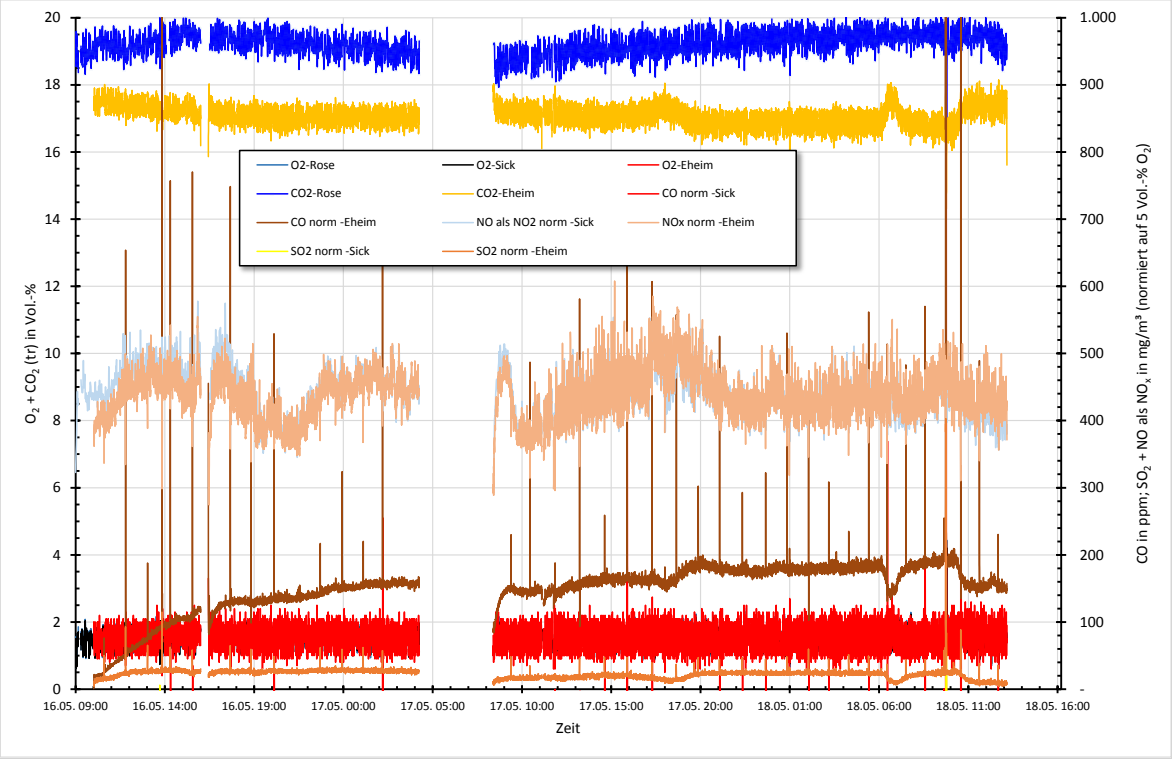

Abbildung 1-61: Vergleich Gasanalysemsysteme – Trend der gemessenen Motorabgaskomponenten

Markante Differenzen sind bei der Messung von Kohlendioxid (CO_2) festzustellen. Das Gasanalysensystem der Fa. EHEIM weist ca. 2 Vol.-% geringere Messwerte aus als die Messgeräte der Fa. ROSEMOUNT und Fa. SICK.

Für die Bestimmung der Kohlenmonoxid- (CO-)Konzentrationen im Motorabgas konnten nur die Messergebnisse des Systems EHEIM verwendet werden, da das Vergleichsgerät SIDOR bei den geringen CO-Konzentration aufgrund des wesentlich größeren Messberei-

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

ches diese geringen CO-Emissionen nicht detektieren kann. Die von dem EHEIM-System ausgegebenen Konzentrationen von CO im Motorabgas weisen mit laufendem Versuchsbetrieb einen kontinuierlichen Anstieg auf, dessen Ursache in einer Drift des Analysensystems oder auch durch sich verändernde Parameter im angestrebten stationären Versuchsanlagenbetrieb zu suchen ist.

Für die drei Versuchstage sind in Tabelle 1-10 die ermittelten Tagesmittelwerte der einzelnen Gaskomponenten sowie Analysensysteme aufgeführt.

Tabelle 1-10: Vergleich Gasanalysensysteme - Tagesmittelwerte

Datum	O_2-Rose Vol.-%	CO_2-Rose Vol.-%	O2-Sick Vol.-%	CO norm -Sick ppm	NO als NO_2 norm -Sic mg/m³	SO_2 norm -Sick mg/m³
16.05.2018	1,50	19,26	1,49	0	450	0
17.05.2018	1,53	19,07	1,51	0	443	0
18.05.2018	1,55	19,41	1,52	0	426	0
Gesamt	**1,53**	**19,25**	**1,51**	**0**	**440**	**0**

Datum		CO_2-Eheim Vol.-%	O_2-Eheim Vol.-%	CO norm -Eheim ppm	NO_x norm -Eheim mg/m³	SO_2 norm -Eheim mg/m³
16.05.2018		17,18	1,57	109	425	26
17.05.2018		17,05	1,56	162	441	21
18.05.2018		16,99	1,58	181	429	21
Gesamt		**17,07**	**1,57**	**151**	**431**	**22**

Die Differenzen der Tagesmittelwerte der verschiedenen Analysensysteme für die ausgewählten Motorabgaskomponenten weist Tabelle 1-11 aus. Hierbei stehen die Kürzel „R“ für ROSEMOUNT, „S“ für SICK und „E“ für EHEIM.

Tabelle 1-11: Vergleich Gasanalysensysteme – Differenz Tagesmittelwerte

Datum	O_2 (R-E) Vol.-% (tr)	O_2 (S-E) Vol.-% (tr)	CO_2 (S-E) Vol.-% (tr)	CO norm (S-E) ppm	NO_x norm (S-E) mg/m³	SO_2 norm (S-E) mg/m³
16.05.2018	-0,06	-0,08	2,08	-109	26	-26
17.05.2018	-0,03	-0,04	2,01	-162	2	-21
18.05.2018	-0,04	-0,06	2,43	-181	-3	-21
Gesamt	**-0,04**	**-0,06**	**2,17**	**-151**	**8**	**-22**

Der Vergleich der Gasanalysensysteme zeigt, unter Berücksichtigung der gerätebedingten Messfehler, eine größtenteils qualitative und quantitative Übereinstimmung der Messergebnisse, lediglich bei der Messung der Kohlendioxid-Emissionen sind größere Abweichungen zu verzeichnen (EHEIM-System).

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Validierung aller im Zuge des Gesamtprojektes ermittelten Zusammensetzungen des Motorabgases als eine Grundlage für die Bewertung des verfahrenstechnischen Gesamtsystems „Biomasse-Festbettvergasung mit BHKW“.

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

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

2 Andere wesentliche Ereignisse

- regelmäßig (aller 2 Wochen) stattfindende Abstimmungen der unterschiedlichen Arbeitsgruppen (AG) in Form von AG-Verantwortlichen-Treffen
- Teilnahme am Herstellertreffen der AG „Vergasung von Biomasse“ der FEE e.V vom 7. bis 8.7.17 in Fulda, (Fr. Weidner, Hr. Salomo)
- Teilnahme an der Session 3: „Innovative technologies for small scale wood based energy systems“ des Symposiums „Optimization of wood-based process chains in small scale forestry in Eastern Africa“ am 22.8.17 an der TU Dresden, (Prof. Zschunke, Hr. Schneider)
- Beratung mit Dr. Bernhardt (TU Dresden) zur Simulation und Modellentwicklung thermochemischer Vorgänge am 4.9.17 in Dresden, (Dr. Sénéchal)
- Teilnahme am Workshop der AG „Vergasung von Biomasse“ der FEE e.V am 11.9.17 in Freiberg, (Fr. Weidner)
- TCV-Anlagenbesichtigung mit Mitarbeitern der TU Dresden (Dr. Treppe, Fr. Hack) am 21.9.17, Zittau, (Dr. Sénéchal, Hr. Salomo, Hr. Schneider)
- Teilnahme am 18. Fachkongress Holzenergie des Fachverbandes Holzenergie im BBE am 28.-29.9.17 in Würzburg, (Dr. Sénéchal)
- Gemeinsame Messfahrt an Biomassevergasungsanlage des DBFZ und Vergleich der Gasanalytik am 12.10.17 in Leipzig, (Hr. Schneider, Hr. Grusla)
- Durchführung eines Statusseminars zum Bearbeitungsstand des Projektes TCV III bei der SAB in Dresden am 16.10.17, (Dr. Sénéchal, Hr. Titze)
- Besichtigung einer Klärschlammverbrennungsanlage am 20.10.17, Bitterfeld-Wolfen, (Prof. Zschunke, Dr. Sénéchal)
- Teilnahme an Verteidigung der Dissertation von Hr. Kunick an der TU Dresden inkl. Diskussion der Fachthemen Simulation und Modellierung am 23.10.17 in Dresden, (Dr. Sénéchal, Hr. Salomo, Fr. Weidner)
- Teilnahme an der Abschlusssitzung der VDI-Arbeitsgruppe zur Erarbeitung der VDI 3461 am 9.-10.11.17 in Rosenheim, (Hr. Schneider)
- Projekttreffen mit dem GF des Gut Krauscha, Hr. Hans Joachim Mautschke mit Diskussion zur Reststoffproblematik der Holzvergasung am 11.12.17 in Krauscha, (Dr. Sénéchal)
- Projekttreffen mit Vertretern der Fa. CeH4 technologies GmbH am 24.11.17, Zittau, (Prof. Zschunke, Dr. Sénéchal, Hr. Salomo, Hr. Schneider)
- Treffen mit Vertreter der Fa. Sick zur Motorabgasanalytik am 5.12.17 in Zittau, (Hr. Pohl, Hr. Salomo, Hr. Schneider)
- Teilnahme am Sächsischen Biomassetag des LfULG am 16.1.18, Nossen, (Dr. Sénéchal)

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

- Beratung mit Dr. Bernhardt zur Besichtigung der Prozessgasanalytik (FTIR) der Fa. Ansyco und Diskussion der Simulation und Modellentwicklung am 23.2.18 in Dresden, (Dr. Sénéchal)
- Besichtigung der Biofabrik mit anschließender Diskussion der möglichen Zusammenarbeit am 27.2.18 in Rossendorf, (Dr. Sénéchal)
- Einstellung Herr Dr.-Ing. Sven Synowzik zum 1.4.18 mit 0,5 VZÄ
- Einstellung Frau Dipl.-Ing. (FH) Stella Silbermann zum 1.4.18 mit 0,5 VZÄ
- Besichtigung diverser Versuchsstände zur energetischen Nutzung von Biomasse im Zentrum für Energietechnik der TU Dresden inkl. Vorstellung und Diskussion der dort vorhandenen Prozessgasanalytik (FTIR) der Fa. Ansyco am 4.4.18 in Dresden, (Dr. Sénéchal, Hr. Titze, Hr. Grusla, Hr. Salomo, Hr. Schneider)
- Einstellung Herr Dipl.-Ing. Steffen Grusla zum 1.5.18 mit 0,7 VZÄ
- ZKWL-Besichtigung der Versuchsanlagen im Rahmen der Tagung „Biomass to Power and Heat“ mit diversen Firmenvertretern am 7.6.18

Veröffentlichungen

- Weidner, M.: Rückstände von Holzvergasungsanlagen – erste Bewertungen analytischer Untersuchungen, Vortrag zum FEE-Herstellertreffen, Fulda, 07.07.2017
- Schneider, R., Weidner, M.: Forschungsbericht: Parametervariation Reformerrost am Holzvergaser-BHKW des TCV, Zittau., 17.08.2017, Online verfügbar unter: http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/Bericht_Rostparameter_final.pdf
- Zschunke, T, Schneider, R.: Analysis of a wood chip gasifier in a thermochemical test area, Vortrag zum Symposium „Optimization of wood-based process chains in small scale forestry in Eastern Africa“, Dresden, 22.08.2017
- Zschunke, T.; Weidner, M.; Schneider, R.: Tagungsband zum Fachkolloquium „Biomass to Power and Heat 2017“, Herausgegeben von der Hochschule Zittau/Görlitz, Wissenschaftliche Berichte Heft 131 – 2017, Nr. 2713 - 2727, ISBN 978-3-941521-26-1, Zittau
- Vakalis, S., Moustakas, K., Sénéchal, U., Schneider, R., Salomo, B., Kurz, M., Malamis, D., Zschunke, T.: Development of a two-phase model for the calculation of potassium, gaseous products and char yields in the after-burner of a small-scale biomass gasifier, Journal of Cleaner production 2017, Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.148
- Zschunke, T.: Konzept einer differenziellen Ressourcenbesteuerung, Qucosa-SLUB, Online verfügbar unter: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-166442, 2017
- Zschunke, T.: Entropie der Primärenergie – Zur Bedeutung dissipativer Vorgänge in der Natur für die Energienutzung, GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis - Ausgabe 05, Online verfügbar unter: https://www.di-verlag.de/de/Zeitschriften/GI-GebaeudeTechnik-InnenraumKlima/2017/05, 2017

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

- Meinert, J., Ebermann, C., Titze, E.: Latente Speicher für die Wärmeversorgung von Gebäuden - Zwischen Simulation und Technikum, GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis - Ausgabe 05, Online verfügbar unter: https://www.di-verlag.de/de/Zeitschriften/GI-GebaeudeTechnik-InnenraumKlima/2017/05, 2017
- Titze, E.: PCM-Latentwärmespeicher – Überblick und Anwendung im Projekt TCV III –, Vortrag zum IPM-Kolloquium, Zittau, 07.03.2018
- Titze, E.: Überblick zu Wärmespeichertechnologien der dezentralen Energieversorgung, Vortrag zum Dies Academicus, Ökohof-Wobst Mittelherwigsdorf, 06.06.2018
- Durchführung einer internationalen Fachtagung „Biomass to Power and Heat“ in Zittau, 06.06.-07.06.18 (Prof. Zschunke, Hr. Schneider, Fr. Weidner)
- Titze, E.: PCM-Latentwärmespeicher-Systeme, Poster zum Fachkolloquium „Biomass to Power and Heat 2018“, Zittau, 06.06.2018
- Sénéchal, U.: Theoretische Untersuchungen und numerische Berechnungen am thermochemischen Versuchsfeld (TCV), Poster zum Fachkolloquium „Biomass to Power and Heat 2018“, Zittau, 06.06.2018
- Schneider, R.: Rundumschlag zu „Biomass to Power and Heat“, Artikel in „Energie aus Pflanzen“, Ausgabe 03/2018, Juni 2018

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

3 Stand des Vorhabens

Mit dem Änderungsbescheid der SAB vom 05.06.2018 wurde die beantragte kostenneutrale Verlängerung des Bewilligungszeitraumes bis zum 30.04.2019 genehmigt.

AP/MS	**Zeitplan**	**aktueller Stand**
AE1.1	01/16 bis 06/16	**Abgeschlossen**
AE1.2	06/16 bis 12/18	**in Bearbeitung**
AE1.3	02/16 bis 04/19	**in Bearbeitung**
AE2.1	04/16 bis 05/17	**Abgeschlossen**
AE2.2	12/16 bis 12/18	**in Bearbeitung**
AE2.3	10/18 bis 02/19	**offen**
AE3.1	01/16 bis 09/18	**in Bearbeitung**
AE3.2	07/17 bis 09/18	**offen**
AE3.3	08/17 bis 06/18	**offen**
Meilensteine		
M 1	06/2016	**erfolgt**
M 2	12/2018	**offen**
M 3	01/2019	**offen**

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

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

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

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

Literaturverzeichnis

[1] Weidner, M., Schneider, R., Sénéchal, U., Titze, E., Pohl, R., Zschunke, T.: *2. Zwischenbericht zum Projekt Thermochemisches Versuchsfeld*, Zittau., 29.08.2017, Online verfügbar unter: http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/2.Zwischenbericht_final.pdf. GmbH.

[2] Scherer, T.: *telefonische Auskunft am 26.07.2017*. S&Ü Hydraulik und Maschinenbau GmbH, Marienmünster.

[3] Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG: *Betriebsanleitung MultiGasAnalyser MGA 09*, Markranstädt, 2010.

[4] Gnielinski, V.: Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt und im ebenen Spalt. In: VDI-Wärmeatlas, Kapitel G2, 11. Auflage, Springer, Berlin

[5] Seidel,T.: *Abschlussbericht zum Angebot 52-KLE1704*, Fraunhofer-Institut IFAM, Dresden, 2018.

[6] Zeymer, M., Herrmann, A., Oehmichen, K., Schneider, R., Heidecke, P., Ling, H., Volz, F.: *DBFZ-Report Nr. 18: Die kleintechnische Biomassevergasung als Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung*, Leipzig, 11/2013

[7] Borchardt, L.: *Kohlenstoffseparierung aus Vergasungsreststoff*, Informationen per Mail am 20.11.17, TU Dresden, Dresden.

[8] Brandhuber, J.: *Auslegung und Konstruktion der KAT-Strecke*, Informationen per Mail am 6.10.17 und 11.10.17, Spanner Re² GmbH, Neufahrn i.NB.