Hochschule Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik
IPM HOCHSCHULE ZITTAU/GÖRLITZ

Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik

SACHBERICHT
THERMOCHEMISCHES VERSUCHSFELD III

Autoren
Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider
Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze
Dr.-Ing. Ulf Sénéchal
Dipl.-Ing. (FH) Bert Salomo
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Pohl
Dipl.-Ing. Steffen Grusla
Dipl.-Ing. (FH) Mareike Schneider
Dr.-Ing. Sven Synowzik
M.Eng. Stella Silbermann
Dipl.-Ing. (FH) Fred Haaser
Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert
Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke

Ausgabe 30.10.2019

Revision 4

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik
Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik

Hochschule Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sachbericht

THERMOCHEMISCHES VERSUCHSFELD III

<Thermodynamische und fluiddynamische Optimierung einer Biomasse-Festbettvergasung mit BHKW>

Oktober 2019

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Autoren	Roman Schneider, Enrico Titze, Dr. Ulf Sénéchal, Ralf Pohl, Bert Salomo, Steffen Grusla, Mareike Schneider, Dr. Sven Synowzik, Stella Silbermann, Fred Haaser, Prof. Jens Meinert, Prof. Tobias Zschunke
Projektlaufzeit	01.01.2016 – 30.04.2019
Dienststelle	Hochschule Zittau/Görlitz, University of Applied Sciences Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM) Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau
Thema	Biomassevergasung

Europäische Union
Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Abstract

Das Projekt „Thermochemisches Versuchsfeld III“ (TCV III) hatte zum Ziel, ausgehend von einer bestehenden Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kopplung – mit Biomasse als Energierohstoff und thermochemischer Vergasung als zentralem Verfahrensschritt – die thermochemischen und fluiddynamischen Herausforderungen bei der Flexibilisierung des Anlagenbetriebs zu lösen sowie gleichzeitig die Umweltverträglichkeit und den Brennstoffausnutzungsgrad deutlich zu verbessern. Denn die grundlegende Voraussetzung für die zukünftig verstärkte Integration von Blockheizkraftwerken (BHKW) mit regenerativen Brennstoffen in lokale Energiesysteme ist deren energetisch und ökonomisch effizienter Betrieb. Dies bedingt eine Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades (Minimierung energetischer Verluste), eine flexible Anpassung der lieferbaren Energien nach Art (Strom, Wärme) und Menge sowie Leistung an vorgegebene Bedarfe und darüber hinaus umweltverträgliche Emissionen.

Ein Projektziel war folglich, die auftretenden Stoff- und Energieströme zuverlässig zu erfassen und zu analysieren. Einen Schwerpunkt hierbei nahm die Integration einer berührungslosen Volumenstrommessung mit Laser-Doppler-Anemometer im Produktgas ein. Ein weiteres wichtiges Teilziel bestand in der Entwicklung thermischer Speicherkomponenten für unterschiedliche Einsatzszenarien im System. Dazu zählt neben der Abwärmenutzung insbesondere das Speichern von momentan nicht benötigter Wärme unterschiedlicher Temperaturniveaus aus den Energieumwandlungsprozessen und deren zeitversetzte Nutzung innerhalb oder außerhalb der Anlage. Ein weiterer Aspekt der Speicherentwicklung orientierte auf stoffliche Speicher (Gasspeicher), die in gewissen Grenzen eine zeitliche Entkopplung von Teilprozessen der energetischen Umwandlungskette ermöglichen sollen. Mit Hilfe der messtechnisch erfassten Anlagenparameter wurde darüber hinaus die signifikante Reduzierung von Schadstoffemissionen untersucht.

FREIGABE

Autor(en)	Geprüft
	Freigegeben

Änderungen

Rev	Datum	Name	Änderung(en)
0	03.05.2019	Schneider	Erster Entwurf
1	13.08.2019	Schneider	Einarbeitung der wiss. und techn. Ergebnisse
2	28.08.2019	Schneider	Einarbeitung Stand von Wissenschaft u. Technik
3	29.10.2019	Schneider	Abschluss der Textbearbeitung
4	30.10.2019	Schneider	Abschließende Formatierung

Inhaltsverzeichnis

1 Teil 1: Kurzfassung 11

1.1 Zielstellung 11
1.2 Realisierte Ergebnisse 11
1.3 Anwendungsmöglichkeiten 12

2 Teil 2: Ausführlicher Sachbericht 13

2.1 Ziel des Vorhabens 13
2.2 Stand der Wissenschaft und Technik 28
2.2.1 Biomasse-Vergasungs-BHKW 28
2.2.2 Speichertechnologien 33
2.3 Darstellung und Wertung 38
2.3.1 Erzielte wissenschaftliche und technische Ergebnisse 38
2.3.2 Vergleich zu Fortschritten bei anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen 131
2.4 Verwertungspotenzial der Vorhabensergebnisse 132
2.4.1 Beiträge des Vorhabens zur Erhöhung der eigenen wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit 132
2.4.2 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der eigenen wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit 133
2.4.3 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der Wirtschaft im Freistaat Sachsen 135
2.4.4 Angabe der bereits erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse 136
2.5 Beiträge des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen 138
2.6 Einschätzung des Finanzierungs- und Zeitplanes 139
2.7 Angabe der Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 140
2.8 Angabe eventuell bereits angefallener Nettoeinnahmen 141
2.9 Ausführungen zur bisherigen Nutzung der geförderten Investitionsgegenstände 142
2.10 Ableitung zukünftiger Untersuchungsschwerpunkte 142

Literaturverzeichnis 144

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 Versuchsanlage Biomassevergasung (TCV) an der HSZG 29
Abb. 2-2 Holzvergasungskarte der FEE e.V. 31
Abb. 2-3 Installierte Leistung und Anzahl der Anlagen in Deutschland und international [10] 32
Abb. 2-4 Speicherdichten (in kWh/m3) unterschiedlicher thermischer Speicher 35
Abb. 2-5 Speicherdichten und Schmelztemperaturen typischer PCM 37
Abb. 2-6 Zellulare Metallstrukturen für den Einsatz in Latentwärmespeichern 37
Abb. 2-7 HHS-Transportsystem zur Befüllung des Schubbodencontainers 39
Abb. 2-8 durch Zugwirkung der Kette verformtes Gehäuseteil des Kratzkettenförderers 39
Abb. 2-9 Prinzipskizze Übergabetrog Kratzkettenförderer 40
Abb. 2-10 neu installiertes Schneckenfördersystem 41
Abb. 2-19 Gaslaufplan der bisherigen Permanentgasanalyse inkl. Gasaufbereitung, eigene Darstellung nach [27] 47
Abb. 2-20 Gaslaufplan der überarbeiteten Permanentgasanalyse inkl. Gasaufbereitung, eigene Darstellung nach [27] 47
Abb. 2-21 Mikro-Gaschromatograph I-GRAPH XS der Firma INRAG AG 48
Abb. 2-22 Messwagen mit FTIR im TCV 50
Abb. 2-23 Strahleintritt und Reflexionen (links) müssen bei senkrechtem Eintritt auf derselben Horizontalen (rote Linie) liegen (rechts) 51
Abb. 2-24 Symmetrie der eintretenden und reflektierten Strahlen beim Blick vom Rohrboden aus 52
Abb. 2-25 Bestimmung der Wandstärke am Schauglas mithilfe des Anodenstromes . 52
Abb. 2-26 Geschwindigkeitsprofile während des Spülvorganges im Vergleich mit Messreihe des Testsystems 53
Abb. 2-30 Rohdaten in LDV-Suite 57
Abb. 2-31 Geschwindigkeitsprofile nach Filterung 58
Abb. 2-32 Installierter LDA-Versuchsstand mit ausgerichtetem, betriebsbereitem Laser 60
Tab. 2-24 Elementarzusammensetzung und Heizwert der eingesetzten Brennstoffe . 90
Abb. 2-59 zerkleinere Rückstande aus der MDF Produktion (links) und Gärrestpellets (rechts) 90
Abb. 2-60 Temperaturverläufe der Reformerluft vor dem Reformereintritt 91
Abb. 2-61 Verlauf der Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator und ohne Abgasrezirkulation (AGR) 97
Abb. 2-62 Verlauf der Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator und mit Abgasrezirkulation (AGR) 97
Abb. 2-63 Vergleich der Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator ohne/mit Abgasrezirkulation (AGR) 98
Abb. 2-64 Darstellung ausgewählter gemittelter Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator mit Abgasrezirkulation (AGR) 98
Abb. 2-65 Motorabgasemissionen nach Katalysator bei 5 % Bezugs-O_2 100
Abb. 2-66 Motorabgasemissionen vor/nach Aktivierung der Abgasrezirkulation (AGR) 101
Abb. 2-67 Motorabgasmessionen nach KAT mit AGR 102
Abb. 2-68 Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung 103
Abb. 2-69 Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung bei Anlieferung 103

Abb. 2-70 Zeitliches Signal an der Wärmeleitfähigkeitsmesszelle (WLD) während einer Messung 105
Abb. 2-81 Verfahrensfließschema der Systemsimulation 119
Abb. 2-82 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf in der Produktgasstrecke....121
Abb. 2-83 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf in der Reformerluftstrecke ...122
Abb. 2-84 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf im Kühlkreislauf des Vergasers 122
Abb. 2-85 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf an drei Messstellen im Pufferspeicher....123
Abb. 2-86 Geometrie und Gitternetz für die Simulation mit Comsol 124
Abb. 2-87 Geschwindigkeits- und Druckverteilung entlang der mittleren Schnittebene an ausgewählten Zeitpunkten für die Simulation mit Comsol....125
Abb. 2-88 Zeitlicher Verlauf der Einlass- und Auslassgeschwindigkeit der Simulationen von COMSOL und OpenFOAM 125
Abb. 2-89 Geometrie und Spannungen sowie Verschiebung des konstruierten Behälters und der Rahmenkonstruktion des Speicherprototypes 126
Abb. 2-90 Zeitlicher Verlauf des Volumenstromes des Vergasungsmittels an der Messstelle F1201 127
Abb. 2-91 Zeitlicher Verlauf des Messsignals des Drucksensors....127
Abb. 2-92 Frequenzspektrum des Messsignals des Drucksensors....128
Abb. 2-93 Prinzip der Wirbelfeuerung nach [26] 129
Abb. 2-94 Aufbau stationäre Wirbelschicht....130

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Grenzwerte der Emissionen (alles bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Bio- oder Klärgas, FWL <3MW, in Anlehnung an [11]... 33
Tab. 2-2 Erreichbare Emissionswerte (alles bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Produktgas nach [13] ... 33
Tab. 2-3 Auswahl möglicher Transportsysteme mit Vor- bzw. Nachteilen... 41
Tab. 2-4 Auswirkung der Modifizierungsmaßnahmen nach Variante 1 auf den Volumenstrom ... 58
Tab. 2-5 Auswirkung der Modifizierungsmaßnahmen nach Variante 2 auf den Volumenstrom ... 59
Tab. 2-6 Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit bei der Durchflussbestimmung 59
Tab. 2-7 Arbeitsschritte zur Installation des LDA-Systems ... 60
Tab. 2-25 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten im Rahmen der Brennstoffvariationen ... 92
Tab. 2-26 Brennstoffausnutzungsgrade bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume ... 93
Tab. 2-27 Bewertung der Zumischungen von MDF, GR und HP ... 94
Tab. 2-28 Schadstoffemissionen ohne und mit Zumischungen von MDF, GR und HP 95
Tab. 2-29 Übersicht der zur Verfügung stehenden Messtechnik für die Motorabgasemissionen ... 96
Tab. 2-30 Erreichbare Emissionswerte (bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Produktgas nach VDI 3461 [28] ... 99
Tab. 2-31 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten vom 08.02.2019 für den stationären Auswertungszeitraum ... 110
Tab. 2-32 Daten der Stoffstrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum in kg/h ... 111
Tab. 2-33 Daten der Energiestrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum in kW... 111
Tab. 2-37 Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung nach Änderungsbescheid ... 139

Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN

A	Aschegehalt
AGR	Abgasrezirkulation
AE	Arbeitsetappe
ATE	Acute Toxicity Estimates
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Kohlenstoff
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH_2O	Formaldehyd
C_2H_4	Ethen (Ethylen)
C_2H_6	Ethan
C_6H_6	Benzol
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
DG	Dämpfungsgrad
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CH_4	Methan
DIN	Deutsches Institut für Normung
dP	Differenzdruck
E	Elektrische Leistung (KKS)
EC	Elektrochemisch
EPA	Environmental Protection Agency
F	Volumenstrom (KKS)
FEE	Fördergesellschaft für Erneuerbare Energien
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GC	Gaschromatograph
GR	Gärrest
H	Elementarer Wasserstoff
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
HC	Langkettige Kohlenwasserstoffe
HHS	Holzhackschnitzel
HP	Holzpellets
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
HVG	Holzvergaser (Vergaser)
IFAM	Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
IPM	Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
ITN	Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung
KAT	Katalytisches Material
Kat	Katalysator (Abgasnachbehandlung)

KK	Kühlkreislauf
KKS	Kraftwerk-Kennzeichensystem
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Q	Zusammensetzung (KKS)
LDA	Laser-Doppler-Anemometer
LuVo	Luftvorwärmung
LV	Laborversuche
LWS	Latentwärmespeicher
M	Feuchte/Wassergehalt (KKS)
MDF	Mitteldichte Holzfaserplatte
MF	Messfahrt
MGA	Messgasanalysator
MS	Messstelle
n	Probenanzahl
N	Elementarer Stickstoff
N_2	Stickstoff
NH_3	Ammoniak
NOx	Stickoxide
O	Elementarer Sauerstoff
O_2	Sauerstoff
P	Druck (KKS)
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCM	Phase-Change-Material
PG	Produktgas
PM	Paramagnetismus
PTFE	Polytetrafluorethylen
RB	Rohrbündel
RKW	Rückkühlwerk
RME	Rapsmethylester
R&I	Rohrleitungs- und Intrumentenfließschema
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S	Schwefel
SO_2	Schwefeldioxid
T	Temperatur (KKS)
TC	Gesamtkohlenstoff
TCV	Thermochemisches Versuchsfeld
TDMS	Technical Data Management Streaming
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TRL	Rücklauftemperatur
TS	Trockensubstanz
TU	Umgebungstemperatur
Tu	Turbulenzgrad
TVL	Vorlauftemperatur
U	Thermische Leistung (KKS)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor
WRG	Wärmerückgewinnung
WÜ	Wärmeübertrager
WT	Wärmeübertrager (Wärmetauscher)

1 Teil 1: Kurzfassung

1.1 Zielstellung

Gesamtziel des Vorhabens war es, ausgehend von einer bestehenden Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kopplung – mit Biomasse als Energierohstoff und thermochemischer Vergasung als zentralem Verfahrensschritt – die thermochemischen und fluiddynamischen Probleme bei der Flexibilisierung des Anlagenbetriebs zu lösen und gleichzeitig die Umweltverträglichkeit und den Brennstoffausnutzungsgrad deutlich zu verbessern. Denn die grundlegende Voraussetzung für die zukünftig verstärkte Integration von Blockheizkraftwerken (BHKW) mit regenerativen Brennstoffen in lokale Energiesysteme ist deren energetisch und ökonomisch effizienter Betrieb. Dies bedingt eine Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades (Minimierung energetischer Verluste), eine flexible Anpassung der lieferbaren Energien nach Art (Strom, Wärme) und Menge sowie Leistung an vorgegebene Bedarfe und darüber hinaus umweltverträgliche Emissionen.

1.2 Realisierte Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes TCV III wurde die Versuchsanlage inkl. der Messtechnik durch eine fortwährende Systemanalyse stetig weiterentwickelt, sodass vorhandene Schwachstellen überarbeitet sowie zusätzliche Möglichkeiten zur Systembewertung aufgebaut werden konnten. In diesem Zusammenhang konnte zur berührungslosen Volumenstrombestimmung des Produktgases ein Laser-Doppler-Anemometer erfolgreich eingesetzt werden. Darüber hinaus steht nun zur Bestimmung der Motorabgaszusammensetzung zusätzlich eine Heißgasanalytik zur Verfügung, die es erlaubt, kondensierbare Stoffe im Abgas wie z.B. Formaldehyd, Ammoniak oder Benzol zu erfassen.

Weiterhin wurden diverse Parametervariationen am Biomasse-Vergasungs-BHKW durchgeführt und die Prozessauswirkungen dokumentiert. Neben den Brennstoffvariationen hin zum Einsatz von Rest- und Abfallstoffen, wurde katalytisches Material zur Beeinflussung der thermochemischen Reaktionen hinzugegeben, die Betriebsparameter des Drehrostes im Reformer variiert und eine zusätzliche Vorwärmstrecke für das Vergasungsmittel Luft konzipiert, die es zukünftig erlauben soll, das Vergasungsmittel mit einer definierten Temperatur dem Reformer zuzuführen.

In Bezug auf die Speichertechnologien wurden thermische Speichersysteme für ihren Einsatz im Biomasse-Vergasungs-BHKW ausgelegt und experimentell validiert. Vorzugsweise sind hierzu Latentwärme-Speichersysteme betrachtet worden. Bezüglich der Vorwärmstrecke für das Vergasungsmittel wurde darüber hinaus die Integration eines sensiblen Wärmespeichers auf Basis keramischen Materials vorbereitet. Neben den thermischen Speichern sollte außerdem ein Produktgasspeicher als stofflicher Speicher integriert werden, der die Gasproduktion über den Vergaser und die Produktgasnutzung des Gasmotors zeitlich entkoppelt. Ausgehend hiervon wurde ein Pulsationsdämpfer entworfen, der die stark schwankende Quantität und Qualität des Produktgasstromes ausgleichen soll, um die Umweltverträglichkeit der Motorabgas-emissionen zu verbessern. In diesem Zusammenhang wurden Emissionsminderungs-maßnahmen (z.B. Abgasrezirkulation) getestet, die im Vergleich mit den ursprünglichen Emissionen zu einer signifikanten Emissionsreduzierung führten. Zur weiteren Senkung der Emissionen wurde eine Messstrecke konzipiert, die zukünftig die Kombination verschiedener sekundärer Emissionsminderungsmaßnahmen erlaubt.

Im Analytiklabor konnten zur Bewertung der anfallenden festen Reststoffe stark vereinfachte Analysemethoden abgeleitet werden. Durch die im Rahmen von umfangreichen Messreihen festgestellten Abhängigkeiten ist es nun möglich, den Aschegehalt, den Gehalt an fixem Kohlenstoff, flüchtigen Bestandteilen und des Gesamtkohlenstoffes sowie den Brennwert nur über die relativ einfache Analyse des Glühverlustes zu ermitteln.

In Bezug auf die Stoff- und Energiestrombilanzierung wurden verschiedene Messfahrten ausgewertet und dies für den Bericht am Beispiel einer Messfahrt dargestellt. Hierbei wurde u.a. ein Kaltgaswirkungsgrad von ca. 70 % und ein Brennstoffausnutzungsgrad von 71 % ermittelt. Außerdem erfolgten Messfahrten zur Quantifizierung der Oberflächenwärmeverluste sowohl von Anlagenkomponenten als auch der Gesamtanlage.

Zur Simulation der Vorgänge im Reformer wurde ein räumlich eindimensionales Modell in der Programmiersprache Modelica entwickelt und unter Nutzung von OpenModelica implementiert. Parallel zu der detaillierten Simulation der Prozesse im Reformer, wurde ein Modell der gesamten Anlage inklusive der angeschlossenen Wärmequellen und -senken erstellt und parametrisiert sowie verschiedene CFD-Simulationen ausgewählter Komponenten erstellt, um Erkenntnisse zu Detailprozessen der Strömung und des Energietransportes zu erhalten.

1.3 Anwendungsmöglichkeiten

Potenzielle Anwendungsbereiche sind die Erweiterung der Wärmeversorgung von kommunalen und gewerblichen Wärmeversorgungsanlagen (ohne Stromerzeugung) zu Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Der KWK-Betrieb ist bei Betrachtung der Energiebilanzen ein sehr wertvoller Beitrag zur Energieversorgung. Es ist damit zu rechnen, dass sich angesichts der Anforderungen der Transformation des Energiesystems die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so weiterentwickeln werden, dass sie dieser technischen Eigenschaft gerecht werden. Dies kann durch Weiterentwicklung der Marktbedingungen geschehen, die selbst wiederum durch politische Steuerinstrumente angeregt werden.

Besonders unter dem Aspekt der spezifischen Eigenschaften der Brennstoffe und Zwischenprodukte des betrachteten Prozesses und unter dem Aspekt der Vielstufigkeit der Verfahren wurden weitere vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Mess- und Analysetechnik generiert. So konnten die Fähigkeiten des Teams und seiner Mitglieder weiterentwickelt werden, um komplexe energieverfahrenstechnische Prozesse noch umfangreicher als bisher zu diagnostizieren, zu beherrschen und zu verbessern. Insbesondere gilt dies für die Emissionsminderung und die Effizienzsteigerung bei energietechnischen Anlagen.

Die Projektergebnisse im Bereich der Wärmespeicherentwicklung kommen Unternehmen aus der Region z.B. in Form häufig stattfindender Beratungsgespräche zwischen den beteiligten Wissenschaftlern und Vertretern der regionalen Wirtschaft zugute. Dies betrifft nicht nur die Entwicklung von Wärmespeichern, sondern aktuell in zunehmendem Maße auch die Erstellung von Abwärmenutzungskonzepten für industrielle Anlagen. Darüber hinaus bietet das im Projekt erworbene wissenschaftliche Knowhow die Möglichkeit der Einwerbung von Dienstleistungsaufträgen z.B. zur Auslegung wärmetechnischer Komponenten (Wärmespeicher, Wärmeübertrager) oder zu deren strömungs- und wärmetechnischen Charakterisierung.

2 Teil 2: Ausführlicher Sachbericht

2.1 Ziel des Vorhabens

Gesamtziel des Vorhabens war es, ausgehend von einer bestehenden Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kopplung – mit Biomasse als Energierohstoff und thermochemischer Vergasung als zentralem Verfahrensschritt – die thermochemischen und fluiddynamischen Probleme bei der Flexibilisierung des Anlagenbetriebs zu lösen und gleichzeitig die Umweltverträglichkeit und den Brennstoffausnutzungsgrad deutlich zu verbessern. Denn die grundlegende Voraussetzung für die zukünftig verstärkte Integration von Blockheizkraftwerken (BHKW) mit regenerativen Brennstoffen in lokale Energiesysteme ist deren energetisch und ökonomisch effizienter Betrieb. Dies bedingt eine Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades (Minimierung energetischer Verluste), eine flexible Anpassung der lieferbaren Energien nach Art (Strom, Wärme) und Menge sowie Leistung an vorgegebene Bedarfe und darüber hinaus umweltverträgliche Emissionen.

Grundvoraussetzung zum Erreichen dieser Ziele ist die genaue Analyse der Stoff- und Energieströme im System durch eine zuverlässige messtechnische Erfassung von Bilanzgrößen und eine zielgerichtete Datenaufbereitung. Dies schließt die Messungen integraler Geschwindigkeits- und Temperaturwerte und deren Profile in Strömungskanälen ebenso ein, wie die stoffliche Analyse von Brennstoff-, Luft-, Brenngas- und Rauchgasströmen.

Ein wichtiges Teilziel bestand in der Entwicklung thermischer Speicherkomponenten (Wärmespeicher) für unterschiedliche Einsatzszenarien im System. Dazu zählt neben der Abwärmenutzung insbesondere das Speichern von thermodynamisch bedingt entstehender, jedoch momentan nicht benötigter Wärme unterschiedlicher Temperaturniveaus aus den Energieumwandlungsprozessen (Abgas, Kühlwasser) bei stromgeführter Betriebsweise und deren zeitversetzte, exergetisch effiziente Nutzung innerhalb (Brennstofftrocknung, thermische Abgasnachbehandlung, Warmhaltebetrieb) oder außerhalb der Anlage (Heiz-, Prozesswärme). Ein weiterer Aspekt der Speicherentwicklung orientierte auf stoffliche Speicher (Gasspeicher), die in gewissen Grenzen eine zeitliche Entkopplung von Teilprozessen der energetischen Umwandlungskette ermöglichen sollen. Im Biomasse-Vergasungs-BHKW bezieht sich dies insbesondere auf die Entkopplung der Brenngaserzeugung im Holzvergaser (thermochemische Umwandlung) vom Brenngasverbrauch im Gasmotor (thermomechanische Umwandlung) durch einen Brenngasspeicher. Dies würde energetisch effizientere als auch emissionsoptimierte Betriebszustände beider Anlagenkomponenten ermöglichen.

Die messtechnisch erfassten Anlagenparameter sollten darüber hinaus eine weitere Reduzierung der beim Anlagenbetrieb entstehenden Umweltbelastungen erlauben, z. B. durch Primärmaßnahmen gegen die Entstehung von Stickoxiden.

Die Integration der entwickelten Mess- und Regelungsprozesse sowie der Komponenten zur Wärmespeicherung, Gasspeicherung, Emissionsminderung in das System und der detaillierte Nachweis deren Funktionalität im Betrieb stellten einen wesentlichen Teil der zu leistenden FuE-Arbeiten dar und bildeten die unmittelbare Voraussetzung für eine erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse.

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.2.1 Biomasse-Vergasungs-BHKW

Zur thermochemischen Vergasung fester regenerativer Brennstoffe (i. d. R. Holz in Form von Pellets oder Hackschnitzel) werden diese mit einem gasförmigen Reaktionspartner (Vergasungsmittel) bei erhöhten Temperaturen ab etwa 600 °C in ein Produktgas mit den brennbaren Hauptbestandteilen Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff und in geringerem Umfang Methan (teil-)umgesetzt. Daneben entstehen auch höher molekulare Kohlenwasserstoffe, deren kondensierbare Anteile als Teere bezeichnet werden. Je nach eingesetztem Vergasungsmittel sind auch (quasi-)inerte Gasbestandteile, wie Stickstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid in unterschiedlichen Konzentrationen im Gas vorhanden. Die direkte Umwandlung des Produktgases in Strom und Wärme erfolgt in der Praxis fast ausschließlich über Hubkolbenmotor-BHKW (Gasmotoren). Der verbleibende Feststoff, meist nach dem Ort des Anfalls als Vergaserrückstand oder Filterstaub bezeichnet, besteht aus den im Brennstoff enthaltenen mineralischen Bestandteilen (Asche) und dem nicht in die Gasphase überführten brennbaren Bestandteilen, im Wesentlichen dem unvergasten, fixen Kohlenstoff. Durch einige Anlagenhersteller werden diese festen Rückstände in gesonderten Prozessschritten thermisch nachbehandelt, um Menge und Schadstoffgehalte zu reduzieren.

Die thermochemische Vergasung stellt eine Möglichkeit der Schonung fossiler Ressourcen dar und bietet die Möglichkeit im Sinne der Ressourcenschonung und Klimaneutralität zu wirken. Die Technologie hat in mehreren Bereichen Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren zur Nutzung fester Biomasse. Die Besonderheit besteht vor allem darin, dass aus einem festen Energieträger ein brennbares Gas erzeugt wird. Anstelle der technisch aufwändigen Umwandlung von Wärme in Strom in einem extern befeuerten Dampfkraft- oder ORC-Prozess (ORC … Organic Rankine Cycle, Dampfkraftprozesse mit organischen Arbeitsmitteln), kann dieses brennbare Gas in Motoren unmittelbar zur Stromerzeugung genutzt werden. Das führt als entscheidender Vorteil der Vergasung dazu, dass bereits bei kleinen elektrischen Leistungen ab 30 kW die Energieeffizienz der Gesamtanlagen gleich oder höher sein kann als bei Wärmekraftanlagen im Megawattbereich. Die energetische Nutzung des Produktgases (o.a. Holzgas) über den Einsatz von Mikrogasturbinen ist für diesen Leistungsbereich bisher nicht Stand der Technik.

Die Effizienz der Gesamtanlage lässt sich durch den Brennstoffausnutzungsgrad beschreiben. Dieser entspricht dem Verhältnis der elektrischen und thermischen Nutzenergie bezogen auf die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes. Durch die vergleichsweise hohen elektrischen Wirkungsgrade sind Vergasungsanlagen besonders für den dezentralen Einsatz prädestiniert. Darüber hinaus bieten diese eine optimale Wärmenutzung durch vorhandene Wärmeverbraucher (Kraft-Wärme-Kopplung), eine regionale Wertschöpfung und einen künftig an Bedeutung gewinnenden Beitrag zur Netzstabilität. Die komplexe Verfahrenstechnik von der Gaserzeugung über die Gasreinigung bis zur Gasnutzung führt noch zu spezifisch hohen Investitionskosten. Die Wirtschaftlichkeit wird auch aus volkswirtschaftlicher Sicht nur erreicht, wenn durch entsprechende Auslegung eine Anlage zumindest etwa 5.000 Stunden pro Jahr (Volllastbenutzungsdauer) betrieben und die dabei entstehende Wärme möglichst vollständig auch mit kommerziellem Gegenwert genutzt werden kann. In Verbindung mit geeigneten Wärmespeicherkonzepten können die Anlagen kurzfristig vom Stromnetz genommen werden und so durch die Bereitstellung negativer Regelleistung einen wertvollen Beitrag zur Netzstabilität leisten.

Im Rahmen eines Verbundprojektes zur Weiterentwicklung der kleintechnischen Biomassevergasung (siehe [1]) kristallisierten sich während des projektbezogenen Anlagen-Monitorings folgende Aspekte als derzeitige Schwachstellen bei der Anlagentechnik zur Biomassevergasung mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) heraus:

- Regelkonzept und messtechnische Ausstattung,
- Aufwändige Gesamtkonstruktion,
- Zusammensetzung und Verwertbarkeit fester Reststoffe,
- Dauerstandfestigkeit der Hauptkomponenten.

Als Ergebnis des Projektes wurde mit einer beim Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) erschienenen Broschüre [2] eine zusammenfassende Einordung der kleintechnischen Biomassevergasung als Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung veröffentlicht. Als Schlussfolgerung daraus wurde im Projekt Zittauer Kraftwerkslabor – Thermochemisches Versuchsfeld [3] eine marktübliche Biomassevergasungsanlage inklusive der notwendigen Peripherie (vgl. Abb. 2-1) und einer vorgeschalteten Biomassetrocknungsanlage als Versuchsanlage aufgebaut, betrieben sowie sukzessive durch zusätzliche Messtechnik ergänzt. Wesentliche Anlagenkomponenten der Versuchsanlage sind – in der Reihenfolge des Stoffstromes durch die Anlage – zunächst die Brennstoffkonditionierung, bestehend aus dem Brennstofflager und der Trocknungsanlage, der Holzhackschnitzel (HHS)-Tagesbehälter, der Vergasungsreaktor zur thermochemischen Umwandlung des Brennstoffes, das Produktgasreinigungs- und -abkühlungssystem sowie das BHKW. Die HHS werden in der vollautomatischen Trocknungsanlage auf einen geforderten Wassergehalt getrocknet, danach im Tagesbehälter zwischengespeichert und anschließend über ein Transportschnecken- und Schleusensystem dem Vergasungsprozess zur Verfügung gestellt. Hier wird die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes in thermische und chemische Energie des Produktgases umgewandelt. Im BHKW wird wiederum die chemische Energie des Produktgases in thermische und elektrische Energie umgewandelt und zur Nutzung bereitgestellt. Die aus dem Prozess zur Verfügung stehende Nutzwärme wird in einem Pufferspeicher zwischengespeichert und kann anschließend im Trocknungsprozess, im Nahwärmenetz und zur Erwärmung der Hallenbelüftung genutzt werden. Die Fackel dient dazu, dass während der Anfahrphase des Vergasungsprozesses entstehende Produktgas minderer Qualität sicher thermisch zu entsorgen.

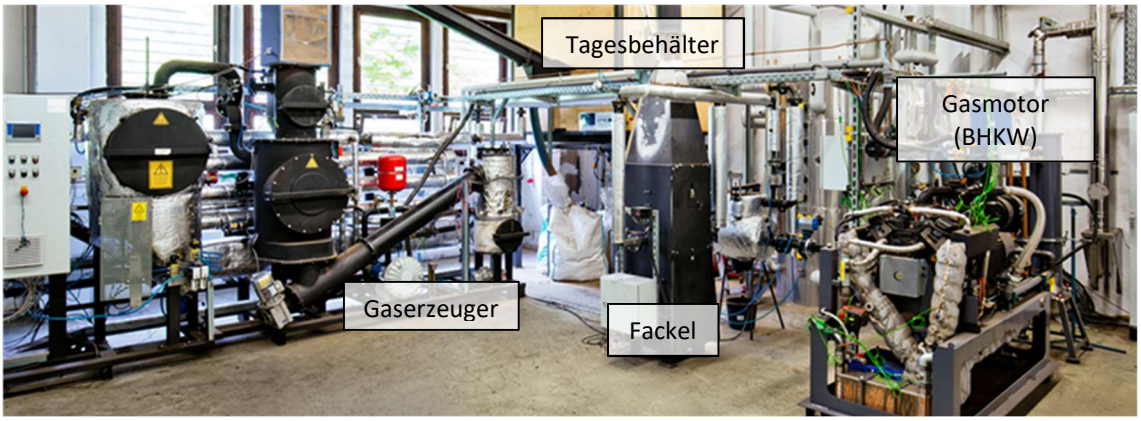


Abb. 2-1 Versuchsanlage Biomassevergasung (TCV) an der HSZG

Im Rahmen zurückliegender Projektarbeiten konnten folgende Erkenntnisse erarbeitet werden, die auch den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik der kleintechnischen Biomassevergasung beschreiben:

- Der Einsatz von Katalysatoren zur Beeinflussung der chemischen Vergasungsreaktionen wurde bei diesen Anlagen bisher nur im Rahmen von Forschungsarbeiten durchgeführt und hatte primär die Gasreinigung zum Ziel [4]. Die Versuche im TCV III zur katalytische Vergasung unter Nutzung der zur Verfügung stehenden Katalysatoren hat zu Prozessveränderungen, jedoch zu keiner Steigerung der Prozesseffizienz geführt. Daher konnte keine Einsatzeignung der entsprechenden Katalysatoren empfohlen werden. Darüber hinaus war der Aufwand für die Mischung von Brennstoff und Katalysatormaterial sehr hoch. Die Versuchsergebnisse zur katalytischen Vergasung werden in [5] zusammenfassend erläutert.
- Die Änderung von Prozessparametern führt zu einem dynamisch reagierenden System, wobei die Prozesseffizienz des stationären Betriebszustandes bei davon abweichenden Zuständen gegenwärtig noch nicht erreichbar ist.
- Die Anlagen sind hinsichtlich ihrer elektrischen Leistung nicht regelbar. Das relativ schnelle An- und Abfahren der Anlage und damit die Bereitstellung von Netzdienstleistungen sind jedoch möglich.
- Es konnte bisher keine Brennstoffflexibilität hinsichtlich Art und Qualität erreicht werden. Üblicherweise werden die Anlagen auf einen Brennstoff ausgelegt und empfohlen dessen Qualität möglichst konstant, entsprechend der Herstellervorgaben, einzuhalten. Bei ersten Einsatztests alternativer Brennstoffe (Rest- und Abfallstoffe) wurde außerdem festgestellt, dass die Stickstoffoxidemissionen im Motorabgas deutlich über dem Emissionsniveau bei Verwendung des Standardbrennstoffes liegen. Somit ist es notwendig, dass geeignete zusätzliche Emissionsminderungsmaßnahmen eingesetzt werden. Die bisherigen Ergebnisse der Brennstoffvariationen sind in zwei Forschungsberichten dargestellt [6], [7].
- Mit Hilfe der Vorwärmung des Vergasungsmittels, die nach dem Stand der Technik bei den Anlagen in der Regel eingesetzt wird, können höhere Kaltgaswirkungsgrade erreicht werden [8]. Eine definierte bzw. regulierbare Vorwärmung des Vergasungsmittels ist jedoch nicht Stand der Technik.
- Die an den marktverfügbaren Anlagen nach dem derzeitigen Stand installierte Sensorik (nur Druck und Temperatur, keine Gasanalytik) ist für eine energetische Optimierung noch nicht ausreichend.
- Der diskontinuierliche Transport der waldfrischen und damit nassen Holzhackschnitzel (Wassergehalt ca. 50 Ma.-%) mit einem Kratzkettenförderer ist aufgrund der bestehenden Korrosionsgefahr der Kettenglieder ungeeignet und ein Schneckensystem vorzuziehen. Die Korrosion der Kettenglieder kann zu einer Versteifung der Verbindungsstellen führen. Dadurch wird die Kette an den Umlenkstellen ausgeschlagen, wodurch Schäden an Umlenkungsritzel, Kette und Gehäuse entstehen. In einem Forschungsbericht [9] wird dieser Sachverhalt umfassend erläutert.

Des Weiteren konnten im Projekt TCV III folgende Verbesserungen der messtechnischen Ausstattung erreicht werden:

- Die berührungslose Erfassung des Produktgasvolumenstromes mittels Laser-Doppler-Anemometer wurde erfolgreich im TCV eingesetzt, bedarf jedoch noch weiterer Anpassungen v.a. hinsichtlich der Software zur Traversenbewegung und Datenauswertung. Diese Qualifizierungen sind im Kapitel 2.3.1 beschrieben.
- Mit dem Einsatz der zusätzlich integrierten Gasmesstechnik (Mikro-GC, FTIR) wurde eine deutlich verbesserte Analysequalität der Gaszusammensetzung von

Produkt- und Motorabgas erreicht. Dies bezieht sich sowohl auf die Messsicherheit als auch auf die Anzahl der erfassbaren Gase. Diese Analytik steht für dieses Vorhaben ebenfalls zur Verfügung und wird entsprechend für die Analysen von Produkt- und Motorabgas eingesetzt.

Hinsichtlich der derzeitigen praktischen Anwendung kleintechnischer Biomassevergasungsanlagen im europäischen deutschsprachigen Raum kann die Abb. 2-2 der Fördergesellschaft Erneuerbare Energien (FEE) e.V. dienen. Darüber hinaus werden diese dezentralen Anlagen an mehreren Standorten in Großbritannien sowie in Form von Anlagenparks im Baltikum und in Japan betrieben. In Nordeuropa (Schweden, Finnland) werden derzeit v.a. großtechnische Biomassevergasungsanlagen mit Methanisierung des Synthesegases entwickelt und betrieben (z.B. GoBiGas der Göteburg Energi, Meva Energy AB).

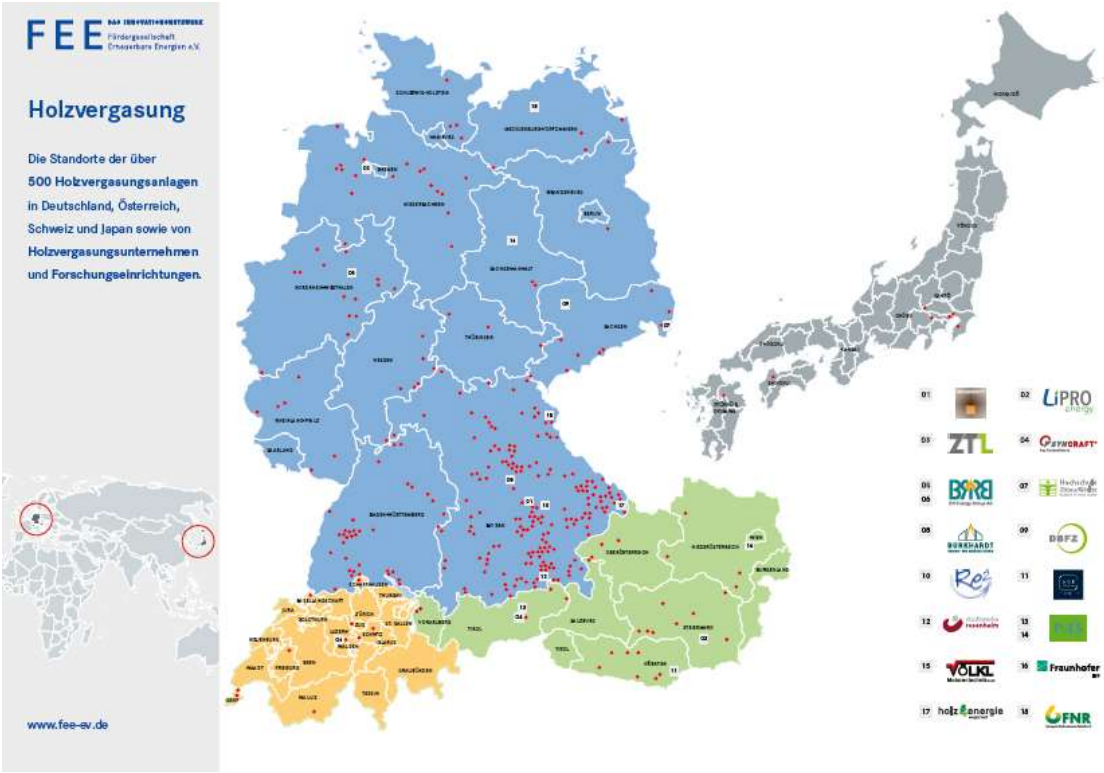


Abb. 2-2 Holzvergasungskarte der FEE e.V.

Die Entwicklung der Anlagenanzahl des hier betrachteten Anlagentyps (Biomassevergasungs-BHKW) und der entsprechend installierten elektrischen Leistung ist in Abb. 2-3 ersichtlich. Dabei wird deutlich, dass bis 2014 vor allem in Deutschland ein starker Anstieg der installierten Biomasse-Vergasungs-BHKW zu verzeichnen war. Mit Änderung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland durch die Novellierung des EEG, verbunden mit einer reduzierten Einspeisevergütung konnte nur noch ein geringer Anstieg der Anlagenanzahl festgestellt werden. Die Anlagenhersteller intensivierten in Folge dessen den Export, sodass der internationale Markt im Vergleich zum deutschen Markt mit einem stärkeren Wachstum verbunden ist.

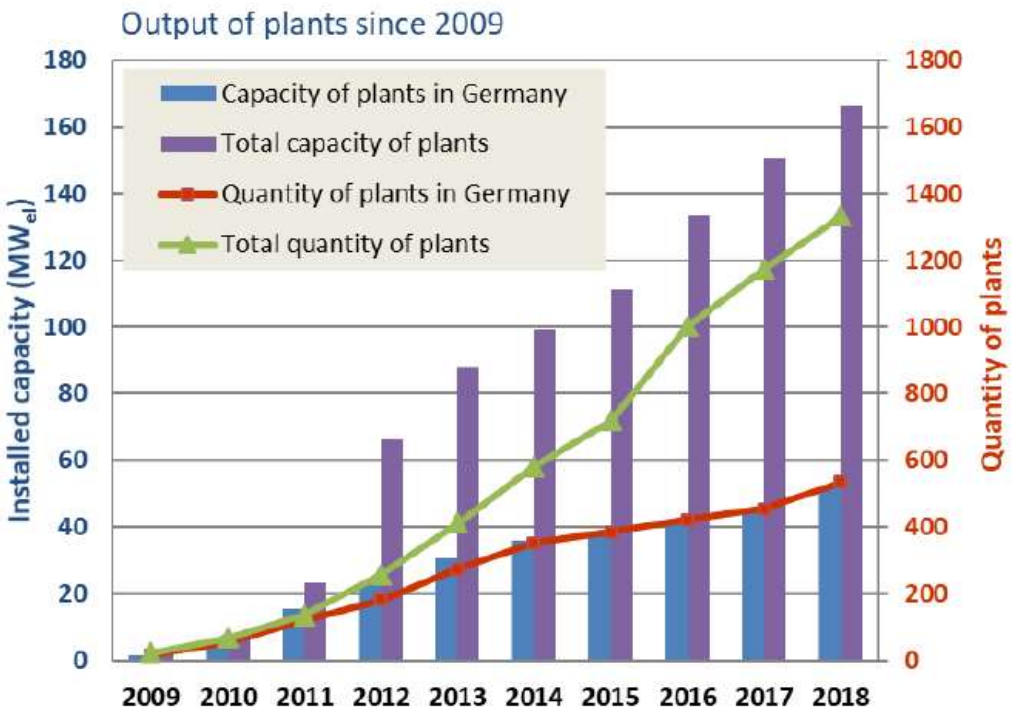


Abb. 2-3 Installierte Leistung und Anzahl der Anlagen in Deutschland und international [10]

Aus thermochemischen Anlagen zur Vergasung von Biomasse 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 [11] für Verbrennungsmotoren mit einer Feuerungswärmeleistung <3 MW beim Einsatz von Bio- oder Klärgas, gilt als Anhaltspunkt) nach Tab. 2-1 lassen sich nur einhalten, wenn sowohl Primär- als auch Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung ergriffen werden.

Tab. 2-1 Grenzwerte der Emissionen (alles bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Bio- oder Klärgas, FWL <3MW, in Anlehnung an [11]

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

Durch die Berücksichtigung dieser Maßnahmen sind günstige Emissionsverhältnisse erreichbar, sodass nachteilige Umwelteinwirkungen verhindert werden können. Wird der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt und die Anwendung der Möglichkeiten zur Emissionsminderung unterstellt, können auch bei motorischer Nutzung von Produktgasen aus der Biomassevergasung die in Tab. 2-2 genannten Emissionswerte von Anlagen in allen Leistungsklassen unterschritten werden [12]. Diese berücksichtigen die Weiterentwicklung des Standes der Technik sowohl der Anlagen zur kleintechnischen Biomassevergasung als auch der Emissionsminderungsmaßnahmen und beschreiben folglich die erreichbaren Emissionswerte der nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen in der Leistungsklasse < 1 MW Feuerungswärmeleistung.

Tab. 2-2 Erreichbare Emissionswerte (alles bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Produktgas nach [13]

Motorart	Fremdzündungsmotoren (Ottomotoren)	Zündstrahlmotoren (Dieselmotoren)
Kohlenstoffmonoxid in g/m³	< 0,30	< 0,30
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid in g/m³	< 0,75[a)]	< 0,75 [a)]
Formaldehyd in mg/m³	< 10	< 10
Gesamtstaub in mg/m³	< 10	< 20
Benzol in mg/m³	< 1	< 1
Organische Stoffe, angegeben als Gesamt-C in mg/m³	< 50	< 50

[a)] BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung < 1 MW. Für BHKW, die einer Genehmigung nach BImSchG bedürfen (Feuerungswärmeleistung ≥ 1 MW), ist eine Emissionsbegrenzung von 0,50 g/m³ einhaltbar

Gerade im Kontext der aktuellen Diskussion um die Grenzwerte für z.B. Stickstoffoxide, scheint es jedoch angebracht, die diesbezüglichen Emissionswerte bei der motorischen Nutzung des Produktgases nach dem Stand der Technik weiter zu minimieren. Dies bedarf im Bereich der KWK auf Basis von Biomasse weiterer Forschungsaktivitäten hinsichtlich der primären und sekundären Emissionsminderung.

2.2.2 Speichertechnologien

Derzeit werden in Biomasse-Vergasungs-BHKW weder thermische noch stoffliche Speicher anlagenintern und prozessunterstützend eingesetzt. Diese Tatsache ist nicht zuletzt der geringen Verfügbarkeit geeigneter thermischer Speichersysteme geschuldet, da diese in jedem Fall an die konkreten Betriebsbedingungen der Anlagen angepasst werden müssen und damit nicht „von der Stange“ beschaffbar sind. Stoffliche Speicher

sind dagegen als energietechnische (Einzel-)Komponenten in großer Auswahl Stand der Technik (z.B. Behälter und Tanks als Gleich- bzw. Gleitdruckspeicher), hier besteht die konkrete wissenschaftliche Herausforderung in der Implementierung eines geeigneten Speichers in die vorhandene Anlage und die damit zusammenhängende Ableitung allgemeiner Modellierungs- und Planungsprinzipien. Jedoch müssen für eine Integration gewisse Randbedingungen und Regularien eingehalten werden, welche in Hinblick auf die Brennbarkeit (Explosivität) und Toxizität des Produktgases sehr umfangreich sind.

Einen sehr detaillierten Überblick über alle Formen von Energiespeichern liefern unterschiedliche Quellen (z.B. [14] – [16]). Darin werden sowohl mechanische als auch elektrische, thermische und chemische (= stoffliche) Speicher klassifiziert und hinsichtlich der physikalischen bzw. chemischen Wirkmechanismen und Einsatzszenarien beschrieben.

Thermische Speicher speichern Energie in Form von thermodynamischer innerer Energie bei Temperaturen oberhalb ("Wärme") oder unterhalb ("Kälte") der Umgebungstemperatur. Letzteres stellt einen sehr etablierten Begriff dar, muss jedoch als Pseudo-Energie betrachtet werden, da es sich bei „Kälte“ im Grunde nur um Wärme bei Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur handelt. Im Folgenden wird auch mit Blick auf die Arbeitsinhalte des geplanten Projektes nur die Wärme betrachtet. Thermische Speicher werden in zahlreichen speziellen Veröffentlichungen (z. B. [17] – [20]) klassifiziert und hinsichtlich des aktuellen Entwicklungsstandes beschrieben. Im Kontext der Dezentralisierung der Energieversorgung erhält die Forschung an innovativen thermischen Speichertechnologien seit 2011 einen enormen Auftrieb aufgrund des riesigen Potenzials erschließbarer Einsatzfelder.

Für die Bewertung unterschiedlicher thermischer Speichertechnologien werden die nachfolgenden Kriterien herangezogen, die sich auf die drei Teile eines allgemeinen Speicherprozesses (Laden – Speichern – Nutzentladen) beziehen:

- die speicherbare Energie (**Speicherkapazität**, in MJ bzw. kWh), in der Regel bezogen auf die Masse oder das Volumen des Speichers bzw. Speichermediums (sog. Speicherdichte, in kWh/m^3),
- die pro Zeiteinheit beim Be- bzw. Entladen übertragbare Energie (**Speicherleistung**, in kW), teilweise auch als masse-/volumenbezogene Leistungsdichte,
- die beim Be- und Entladen sowie während des Speicherns (Bereitschaftsphase) auftretenden energetischen Verluste (**Speichereffizienz**),
- die für den Speichervorgang anfallenden **Speicherkosten** (in €/kWh), die mit den Gestehungskosten der gespeicherten Wärme verglichen werden müssen.

Zur Bewertung der Effizienz eines Wärmespeichers sollte die stark temperaturabhängige Exergie der Wärme herangezogen werden, da der energetische Aufwand zu deren Erzeugung mit der Temperatur steigt. Damit erweist sich Hochtemperatur- bzw. Prozesswärme als besonders wertvoll. Thermische Speicher können entsprechend des Speicherprinzips wie folgt eingeteilt werden und weisen die angegebenen Vor- und Nachteile auf.

Sensible thermische Speicher nutzen die Wärmekapazität eines flüssigen oder festen Speichermediums durch Aufprägen einer Temperaturdifferenz (sensibel = fühlbar). Typische Speichermedien sind Wasser, Thermoöle, Flüssigsalze, Metalle, Keramik oder Beton. Insbesondere die Speicherdichten sind typischerweise gering (siehe Abb. 2-4), allerdings auch der technologische Aufwand und damit die Speicherkosten. Technologisch am weitesten verbreitet sind Warm-/Heißwasserspeicher, die zur Vermeidung des Verdampfens bei Temperaturen oberhalb 100 °C nur bei hohen

Systemdrücken und damit in kostenintensiven Behälterkonstruktionen betrieben werden können. Thermoöle weisen sehr geringe Speicherdichten (nur etwa 4,5 kWh/m^3 pro 10 K Temperaturdifferenz) auf, Salzschmelzen sind für dezentrale Systeme nicht handhabbar (dürfen nicht abkühlen und erstarren), feste Speichermedien verfügen über moderate Speicherdichten. Mit Gesteinen oder Keramik gefüllte Wärmespeicher werden bspw. für die Speicherung von Heiz- und Prozesswärme genutzt. In Kombination mit dem Wärmeträger Luft kann somit ein sehr breites Temperaturfeld abgedeckt werden. Als Kurzzeitspeicher findet diese Technologie bereits in Regeneratoren Anwendung [21]. Bei den bisherigen Untersuchungen zur sensiblen Wärmespeicherung, konnten keramische Speichersegmente entwickelt und erprobt werden (siehe 8.3.2). Diese Speichersegmente basieren auf keramischen Platten (z.B. Fliesen) und können nach eigenen Untersuchungen auch zur Vorwärmung des Vergasungsmittels am Biomasse-Vergasungs-BHKW eingesetzt werden.

Im Projekt werden wissenschaftliche Aspekte sowohl hinsichtlich der Nutzung innovativer sensibler Speicher als auch des verstärkten Einsatzes latenter thermischer Speicher verfolgt, wobei der Fokus bei beiden Technologien auf der Optimierung von thermischer Kapazität und Leistung liegen soll. Die praktische Erprobung erfolgt in der genutzten Versuchsanlage, das Anwendungsfeld betrifft die gesamte Energieverfahrenstechnik.

Latente thermische Speicher nutzen (meist) die Phasenwechselenthalpie beim Schmelzen und Erstarren eines Speichermediums (spezifische Schmelzwärme) und arbeiten damit bei nahezu konstanter Schmelztemperatur (latent = versteckt). Dies ist für die Erreichung eines hohen exergetischen Wirkungsgrades von Vorteil. Die Speichermedien bezeichnet man als Phasenwechselmaterialien (PCM … Phase Change Materials), typische Vertreter sind Wasser(-eis), Paraffine, Salzhydrate, Salze und andere. Es lassen sich deutlich höhere Speicherdichten auf einem nahezu konstanten Temperaturniveau erreichen (siehe Abb. 2-4). Die realisierbaren Speicherleistungen sind jedoch gering und die Speicherkosten in der Regel deutlich höher als bei sensiblen Speichern.

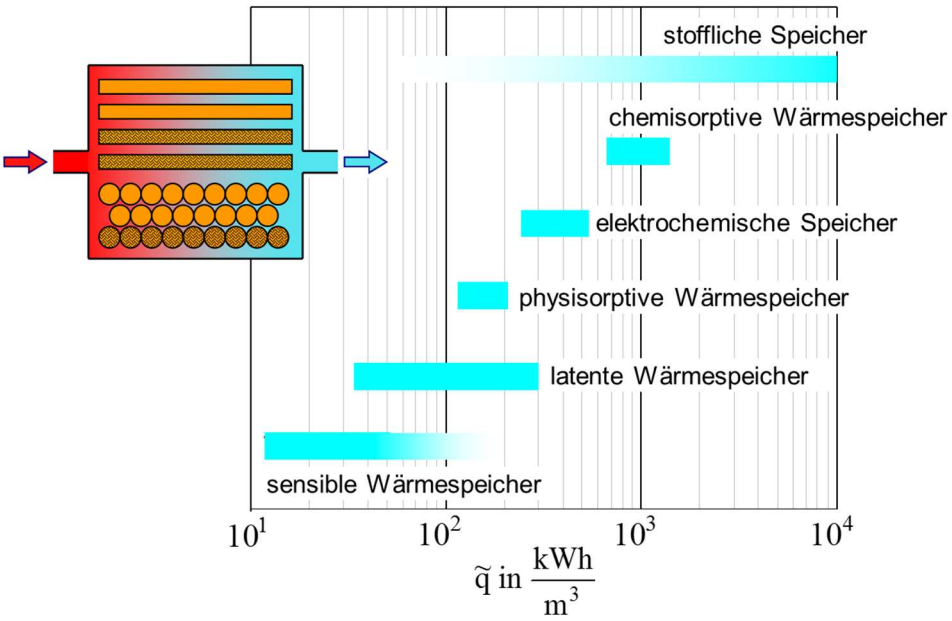


Abb. 2-4 Speicherdichten (in kWh/m3) unterschiedlicher thermischer Speicher

Sorptive und thermochemische Wärmespeicher stellen immer Zweistoffsysteme dar und nutzen entweder einen physikalischen An- bzw. Einlagerungseffekt (Sorptionswärme) oder eine direkte chemische Reaktion (thermochemisch, Reaktionswärme). Die sehr hohen Speicherdichten stehen jedoch einem enormen technologischen Aufwand (Speicherkosten) gegenüber, der Entwicklungsstand ist eher gering, deren Entwicklung für den Einsatz im Biomasse-Vergasungs-BHKW im Rahmen des geplanten Projektes nicht leistbar. Ein großer Vorteil besteht in minimalen Bereitschaftsverlusten (Langzeitspeicher), da die gespeicherte Wärme physikalisch oder chemisch gebunden ist. Dieser Vorteil könnte jedoch im vorliegenden Einsatzfall nicht genutzt werden, da die Flexibilisierung des Anlagenbetriebes eines BHKW lediglich eine thermische Kurzzeitspeicherung erfordert.

Latente thermische Speicher stellen demnach einen exzellenten Kompromiss zwischen Speicherdichte und Speicherkosten dar und rücken daher – nicht nur im beantragten Projekt – in den Fokus energietechnischer Entwicklungen. Einer der wichtigsten Nachteile besteht in den unter Normalbedingungen sehr geringen Speicherleistungen aufgrund des schlechten Wärmeleitvermögens aller PCM. Hieraus ergibt sich der wissenschaftliche Anspruch bei der Adaptierung dieser Speichertechnologie für den Einsatz in BHKW unterschiedlicher Größenordnung.

Grundsätzlich ist die Nutzung des Phasenwechsels fest/flüssig nur eine der Varianten, alternativ kann auch der Phasenwechsel flüssig/gasförmig (Verdampfen/Kondensieren, in sog. Gefälle- bzw. Ruths-Speichern = Nassdampfspeichern) genutzt werden. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn Wasser als Arbeitsmittel in einem thermischen System verwendet wird (z.B. in Dampfkraftwerken, nicht in gasmotorischen BHKW).

Der Vorteil der Nutzung von PCM liegt in der großen Auswahl verfügbarer Stoffe und in der – im Vergleich zum Verdampfen – relativ geringen und damit technisch gut handhabbaren Volumenänderung beim Phasenwechsel. Abb. 2-5 zeigt typische PCM und deren Einsatzbereiche (Schmelztemperaturen, volumenbezogene Schmelzwärmen). Der Einsatz der mit Strichlinien gekennzeichneten PCM ist grundsätzlich denkbar, jedoch weit entfernt von einer technischen Umsetzung. Im Fokus der aktuellen Entwicklungen für Wärmespeicher bei Temperaturen im Prozesswärmebereich stehen deshalb Nitrat- und Nitritsalze und deren Mischungen (Temperaturbereich 135 … 380 °C, siehe [20]). Diese PCM verfügen über sehr hohe Speicherdichten (volumenbezogene Schmelzwärme bis 180 kWh/m^3 zzgl. einer hohen sensiblen Wärme von etwa 8,0 kWh/m^3 pro 10 K Temperaturdifferenz) und sind dabei preiswert und umweltverträglich (z.T. Düngemittel). Nachteilig wirken sich die schlechte Wärmeleitfähigkeit, die Korrosivität gegenüber Metallen und die (teilweise) Explosivität der Substanzen aus.

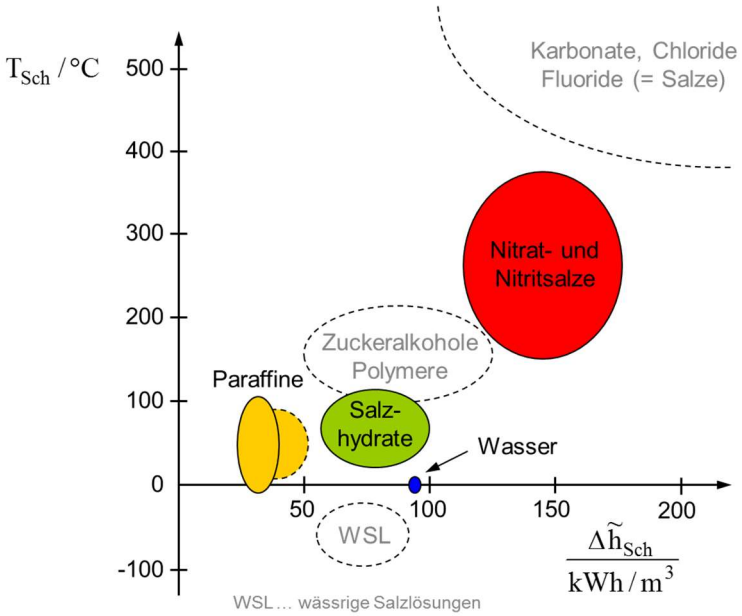


Abb. 2-5 Speicherdichten und Schmelztemperaturen typischer PCM

In den letzten Jahren rückten hybride Wärmespeichersysteme immer mehr in den Vordergrund. Hybridspeicher vereinen Eigenschaften von sensiblen und latenten Speichern, indem bspw. verkapselte PCM als Schüttung in einen sensiblen Warmwasserspeicher gegeben werden. Hierbei wirkt das sensible Speichermedium gleichzeitig als Wärmeträgermedium für die PCM-Verkapselungen, wobei die Temperaturniveaus der beiden Speichermedien aufeinander abgestimmt sein müssen. Mit Hybridwärmespeichern bieten sich somit neue Möglichkeiten der Speicherkonfiguration durch Kombination der hohen latenten Speicherkapazität mit der hohen Leistung durch direktes Be-/Entladen des sensiblen Speichermediums.

Das Problem der geringen Speicherleistung kann durch Einsatz wärmeleitender Strukturen im PCM oder durch ein Speicherdesign unter Realisierung kurzer Wärmetransportwege gelöst werden. Als Wärmeleitstrukturen können Graphit bzw. hochporöse zellulare Metalle (siehe Abb. 2-6 – v. l. n. r.: Metalldraht-, Metallfaser-, Metallschaumstruktur) verwendet werden, dazu gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Dresden (siehe [22] – [24]).

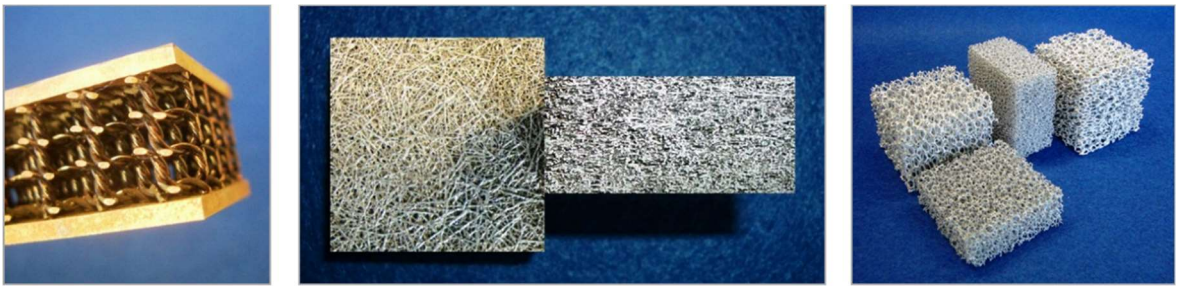


Abb. 2-6 Zellulare Metallstrukturen für den Einsatz in Latentwärmespeichern

Für BHKW-Latentwärmespeicher mit hoher Speicherkapazität und moderater Speicherleistung wird sich jedoch der Einsatz der zellularen Metalle als zu kostenintensiv erweisen. Aus diesem Grund sollen die PCM in einer der geforderten Leistung entsprechenden Verkapselungsgeometrie (in Platten, in Rohren bzw. Rohrzwischenräumen von Rohrbündeln, in Kugeln) eingesetzt werden. Zur Optimierung

der Kostenstruktur besteht das Ziel in der Adaptierung verfügbarer Wärmeübertrager (Platten- bzw. Rohrbündel-Rekuperatoren, siehe z. B. [25], [26]). Im TCV wird ein Standard-Rohrbündel-Wärmeübertrager als Paraffin-Latentwärmespeicher (Speichertemperatur 44 °C) für studentische Praktika genutzt, dessen effektive Speicherdichte beträgt bei 20 K Temperaturspreizung (Wärmeträger) etwa 30 kWh/m^3. Diese Technologie verfügt noch über ein hohes Optimierungspotenzial.

2.3 Darstellung und Wertung

2.3.1 Erzielte wissenschaftliche und technische Ergebnisse

1. Weiterqualifizierung des TCV

Im Rahmen des Projektes wurde das Thermochemische Versuchsfeld (TCV) hinsichtlich der Anlagen- und Messtechnik weiterentwickelt. Neben notwendigen Reparaturen konnten zusätzliche Apparaturen entwickelt und integriert, die Leittechnik angepasst sowie weitere Messtechnik angeschafft und eingesetzt werden. Beispielhaft hierfür werden folgend einige dieser Qualifizierungsmaßnahmen im TCV aufgeführt und erläutert.

Leitstand

Ein Festplattendefekt 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. Daraufhin wurde das Datenbankformat von Access auf ein TDMS (Technical Data Management Streaming) -System umgestellt. Mit dem entsprechenden Umbau der Programmierung und dem Einsatz des TDMS-Dateiformats konnte dieser Fehler behoben werden und das Messwerterfassungssystem wieder störungsfrei eingesetzt werden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projektes laufend Änderungen bzw. Anpassungen an der Datenerfassung und -visualisierung durchgeführt. So wurden z.B. neue Messstellen integriert und schon bestehende Messstellen aufgrund neuer Messtechnik in der Programmierung des Messdatenerfassungssystems neu konfiguriert. Außerdem können nun sowohl die einzelnen Rohrdurchmesser der verschiedenen Volumenstrommessstellen als auch die für die punktuellen Differenzdruckmessungen in den Stoffströmen notwendigen Korrekturfaktoren vor jeder Messfahrt manuell verändert werden.

Befülltrog und Schneckensystem

Bisher mussten die in Big Bags angelieferten HHS mit Hilfe eines Staplers personell und maschinell aufwendig in den Schubbodencontainer eingebracht werden. Durch die Installation eines HHS-Transportsystems (vgl. Abb. 2-7) kann nun die Befüllung des Schubbodencontainers ohne Stapler durchgeführt werden. Die Big Bags werden mit Hilfe eines manuell zu bedienenden Hubwagens an den Schneckentrog transportiert und

dieser nachfolgend mit den HHS befüllt. Durch die Kombination der Horizontal- und Vertikalschnecke werden nun die HHS in den Schubbodencontainer transportiert. Darüber hinaus besteht jetzt die Möglichkeit, verschiedene Online-Messverfahren zur Qualitätsüberwachung der HHS (v.a. Wassergehalt) in Form einer Teststrecke an der Vertikalschnecke einzusetzen.

Abb. 2-7 HHS-Transportsystem zur Befüllung des Schubbodencontainers

Umrüstung eines Kratzkettenförderers zu einem Schneckensystem

Während einer Messfahrt kam es zu einem Totalschaden am ersten Kratzkettenförderer der Biomassetrocknungsanlage. Zur Ermittlung der Schadensursache wurde der Hergang ausführlich analysiert und mündete schlussendlich in einer Ersatzbeschaffung mit alternativer Fördertechnologie.

Im Verlauf einer MF war der notwendige Leistungsbedarf des Getriebemotors so groß, dass mehrfach der Motorschutz auslöste, bis schließlich 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 (Abb. 2-8) aufgetreten waren. Außerdem war ersichtlich, dass die Mehrzahl der Mitnehmer stark verbogen war.

Abb. 2-8 durch Zugwirkung der Kette verformtes Gehäuseteil des Kratzkettenförderers

Aufgrund der schlechten Betriebserfahrungen in der Projektbearbeitung wurde für die Ersatzbeschaffung eine umfangreiche Bewertungsmatrix aufgestellt, die zukünftig einen wesentlich zuverlässigeren Betrieb sicherstellen soll. Für die Auswahl der Kriterien war es notwendig, zunächst eine exakte Bestimmung der primären Schadensursache

vorzunehmen. Nach eingehender Analyse konnten Korrosion an den Kettengliedern, die zu deren Versteifung und schlechter Gebrauchstauglichkeit im Bereich der Umlenkungen führte, sowie eine konstruktive Schwachstelle am Übergabetrog zwischen Schubbodencontainer und Kratzkettenförderer (Abb. 2-9) als schadensursächlich identifiziert werden.

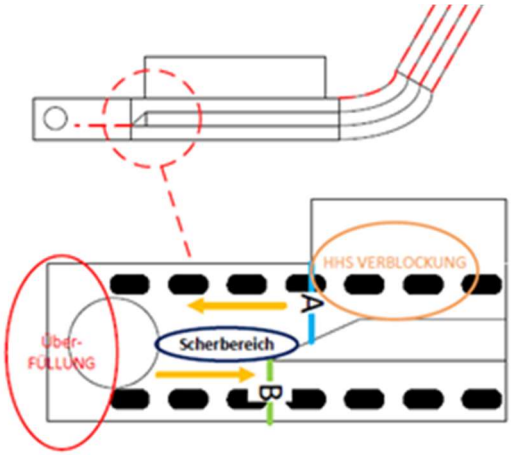


Abb. 2-9 Prinzipskizze Übergabetrog Kratzkettenförderer

Da der offene Kanalquerschnitt beim Austritt aus dem Übergabetrog (Bereich A) größer war als der Querschnitt nach der Kettenumlenkung (Bereich B), gelangen mehr HHS in den Umlenkungsbereich, als zum Silotrockner abgeführt werden können. Dadurch stauten sich in diesem Bereich die HHS zurück, sodass diese zwischen dem oberen und dem unteren Kettenabschnitt verdichtet wurden. Die durch die entgegengesetzt laufenden Ketten entstehenden Scherkräfte wirken ebenfalls direkt auf Mitnehmer und deren Kettenglieder. Um die möglichen Transportvarianten für die HHS vom Schubbodencontainer zum Silotrockner miteinander zu vergleichen, sind diese in Tab. 2-3 mit deren Vor- und Nachteile bezüglich der vorhandenen Aufgabe aufgeführt.

Tab. 2-3 Auswahl möglicher Transportsysteme mit Vor- bzw. Nachteilen

Komponente	Vorteile	Nachteile
Kratzkettenförderer	Geschlossenes System, flache Bauweise (Befüllung aus Schubbodencontainer möglich), Befüllung des Silotrockners unkritisch	Keine Überschüttung des Übergabetrogs akzeptabel, Korrosionsanfälligkeit (v.a. bei Stillstand), hohe mechanische Belastung der Anlagenteile
Wellkantenförderer*	Geringer Leistungsbedarf, keine Schmierung notwendig, Zugänglichkeit bei Störungen, keine Korrosionsgefahr, selbstreinigend, Probenahme möglich	Hohe Bauweise (Befüllung aus Schubbodencontainer möglich), offenes System (Staubemissionen), keine Schleuse für Befüllung Silotrockner vorhanden, Keine Überschüttung des Übergabetrogs akzeptabel,
Schneckensystem	Geschlossenes System, keine Verblockung im Übergabetrog, Überschüttung des Übergabetrogs unkritisch, Befüllung des Silotrockners unkritisch	Anzahl der Einzelsysteme (Antrieb, Übergabestellen), Zugänglichkeit, aufwendige Montage, keine Probenahme möglich
Gebläse	Trennung von Partikelgrößen	Zusätzliche Ableitung des Fördermediums notwendig, Hoher Leistungsbedarf, für schwere (nasse) Transportgüter ungeeignet

* einfaches Förderband durch hohen Anstiegswinkel nicht einsetzbar

Nach eingehender Diskussionen wurde beschlossen, ein Schneckenfördersystem zu installieren (Abb. 2-10). Die ausschlaggebenden Vorteile des Schneckenfördersystems im Vergleich zur bisherigen Transporteinrichtung waren folgende:

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

Abb. 2-10 neu installiertes Schneckenfördersystem

Umbau und Optimierung des HHS-Übergabetrog

Aufgrund des zuvor dargestellten Totalschadens des Kratzkettenfördersystems musste eine neue Transportmöglichkeit für die HHS vom Schubbodencontainer zum Silotrockner gefunden werden. Basierend auf der erstellten Bewertungsmatrix gemäß Tab. 2-3 wurde ein Schneckensystem als beste Transportvariante identifiziert und infolgedessen installiert (siehe Abb. 2-11).

Abb. 2-11 Übergabetrog mit Schubboden, Schwingpaddel und Schneckenfördersystem

Die Übergabe der HHS vom Schubbodencontainer an das Scheckenfördersystem stellt dabei eine wichtige Schnittstelle in der gesamten Transportkette der Versuchsanlage dar. Um eine möglichst zeitnahe Wiederinbetriebnahme der Gesamtanlage zu realisieren, erfolgte der Aufbau des Übergabetrogs zunächst als provisorische Holzkonstruktion (siehe Abb. 2-12).

Abb. 2-12 Übergabetrog als provisorische Holzkonstruktion

Konstruktiv bedingt kam es im Betrieb der Anlage - insbesondere bei Verwendung sehr feuchter HHS - zu einer unerwünschten Verkantung und anschließenden massiven Verdichtung der Biomasse in den Eckbereichen des Übergabetrogs. Infolge dieser Aufstauung in den Randbereichen konnte kein ausreichender Abtransport der HHS durch das Schneckensystem realisiert werden, sodass sich der Effekt der Verkantung zunehmend verstärkte.

Für die Regelung des Füllstandes im Übergabetrog waren „Schwingpaddel“ installiert, die bei Erreichen einer maximalen Füllhöhe mittels einer 2-Punkt-Schaltung ein Abschalten des Schubbodens gewährleisten sollten. Die Verkantung der HHS sorgte

allerdings für einen Ausfall der Überwachung. Das dadurch bedingte unkontrollierte Nachschieben von HHS durch den Schubboden führte infolge zu hoher mechanischer Kräfte zu einem Aufbrechen der Holzkonstruktion.

Resultierend aus dem Schaden am Übergabetrog wurde dieser anschließend als stabile Stahlkonstruktion ausgeführt (siehe Abb. 2-13). Infolgedessen wurden auch Modifikationen bzgl. der Füllstandsüberwachung vorgenommen, die zu einer merklichen Verbesserung der Regelung führten. So konnte bereits durch den Umstieg auf Stahl und einer damit einhergehenden deutlichen Reduzierung von Reibungswiderständen ein kritisches Aufstauen und Verpressen der HHS in den Randbereichen des Trogs unterbunden werden. Des Weiteren führte auch die Höhenanpassung der Querstange zu einer erheblich zuverlässigeren Funktionsweise der 2-Punkt-Regelung.

Gleichzeitig erfolgte eine Recherche zu alternativen Möglichkeiten der Füllstandsmessung. Hierbei zeigte sich vor allem eine Ultraschallmessung als vielversprechende Variante. Allerdings wurde die Idee aufgrund des - nach dem Umbau auf die Stahlkonstruktion - zufriedenstellenden Betriebes mit den „Schwingpaddeln“ nicht weiterverfolgt.

Abb. 2-13 Umbau Übergabetrog als Stahlkonstruktion

Luftvorwärmung Reformer

Zur detaillierteren Betrachtung des Einflussparameters Temperatur auf den Vergasungs- und letztlich Gesamtprozess wurde der Einbau eines elektrischen Lufterhitzers forciert, der die Vergasungsluft über die zuvor erreichbaren 300 °C hinaus vorwärmen kann. In Anlehnung an vorangegangene Untersuchungen und theoretische Betrachtungen nach [8] wird damit - wie auch mit der Trocknung der Biomasse - eine effektive Ausnutzung der in der Biomasse gespeicherten Energie bei höherem Ausbrand, eine erhöhte chemische Energie des Brenngases und letztlich die Erhöhung der Stromausbeute bezweckt. Auch könne aus kinetischer Sicht die Baugröße des Reformers bei gleichbleibender Leistung reduziert werden.

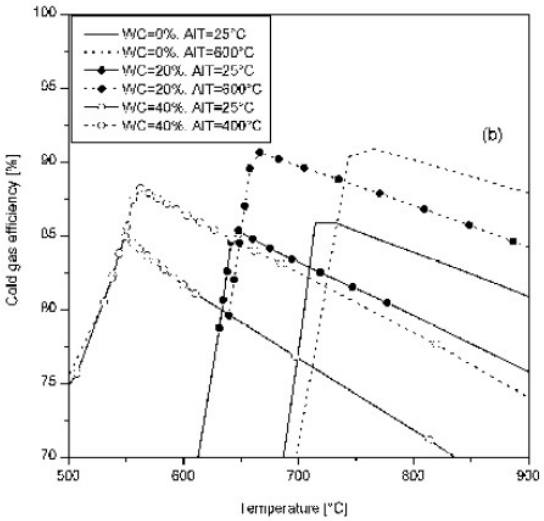


Abb. 2-14 Kaltgaswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Vergasungslufttemperaturen [8], WC…Wassergehalt Brennstoff, AIT…Temperatur Vergasungsmittel

Unter Berücksichtigung der Kompatibilität mit bestehenden Anlagenkomponenten (Verdichter etc.) hinsichtlich geforderter Randbedingungen (Prozessdrücke etc.) fiel die Wahl dabei auf den Lufterhitzer LE 10000 DF-R HT der Leister Technology AG, welcher mit einer maximalen Leistung in Höhe von Q=15 kW unter standardisierten Bedingungen Lufttemperaturen bis zu T=900 °C generiert. Aus Berechnungen, basierend auf experimentellen Arbeiten und den Herstellerangaben des Lufterhitzers, wurde der Volumenstrom zu V*≈980 l/min bei T≈300 °C Eintrittstemperatur und der dabei auftretende Druckverlust zu $\Delta p \approx 7$ mbar abgeschätzt.

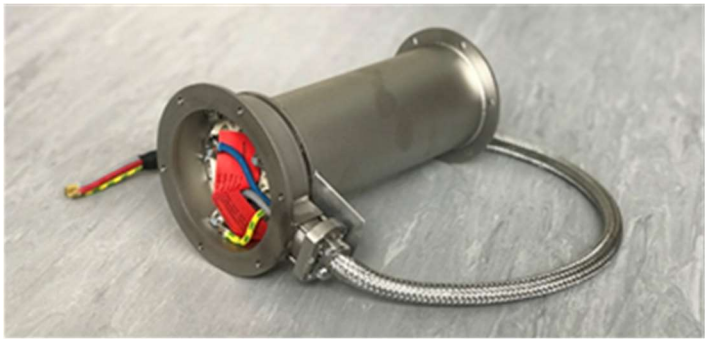


Abb. 2-15 Lufterhitzer LE 10000 DF-R HAT

Das Ziel war, einen entsprechenden Versuchsstrang in möglichst modularer Bauweise zu konzipieren und integrieren, sodass die Prozessstrecke in variabler Fahrweise getestet werden kann.

Abb. 2-16 Bisherige Vergasungsluftzufuhrstrecke (Flexschlauch) zwischen „Gas-Gas-Wärmeübertrager“ und Reformer

Die Lösung besteht darin, anstelle des eingebauten Flexschlauches wahlweise die Lufterhitzerkomponente zwischenzuschalten. Hierfür wird die im „Gas-Gas-Wärmeübertrager“ im stationären Betriebszustand bereits auf 300 °C vorgewärmte Luft durch eine dem Lufterhitzer vorgeschaltete Durchflussmessstrecke umgeleitet und nach Durchströmung des Lufterhitzers in den Reformer zurückgeführt.

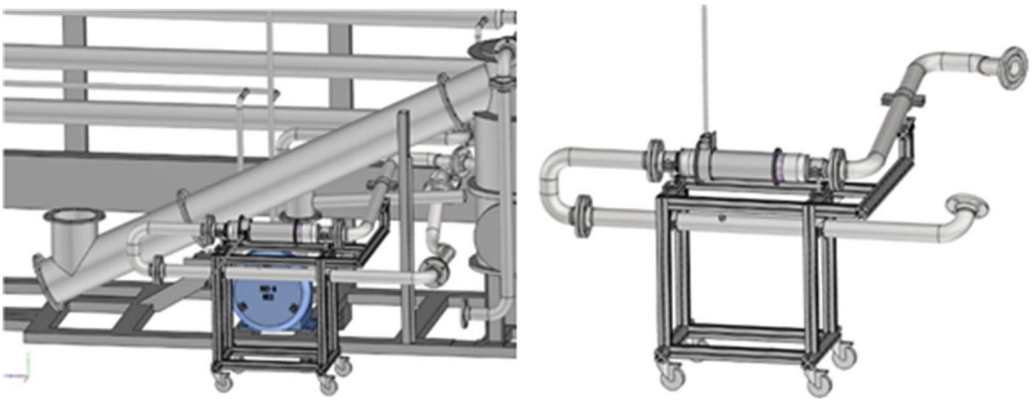


Abb. 2-17 Integrationskonzept und Detailansicht der modularen Lufterhitzerkomponente

Die Durchflussmessstrecke beinhaltet einen Luftstromwächter (Messprinzip: thermische Anemometrie), der nebst eines am Austritt des Lufterhitzers montierten Thermoelementes der Überwachung und Regelung des eigentlichen Erhitzungsprozesses dient. Der jeweils registrierte Wert des Volumenstromes respektive der Temperatur wird mit einem Sollwert abgeglichen und die Leistung entsprechend geregelt oder bei Überhitzungsgefahr vollends entzogen. Dabei bedingen strömungstechnische Aspekte notwendige Streckendimensionen.

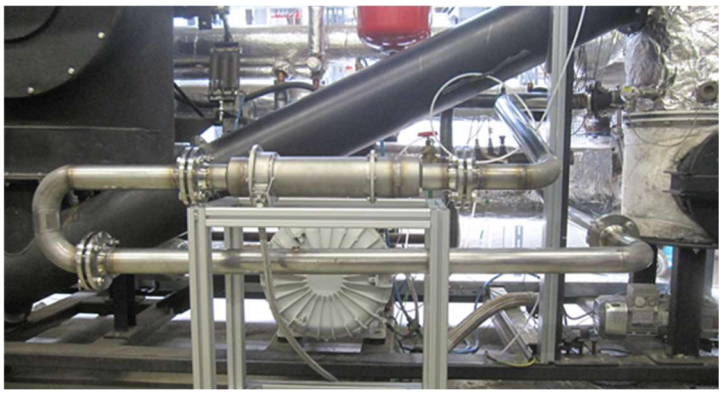


Abb. 2-18 fertiggestellte LuVo-Versuchseinheit (noch unisoliert und ohne Messtechnik)

Permanentgasanalyse mit Gasaufbereitung

Eine umfassende Reparatur der stationären Permanentgasanalyse wurde aufgrund eines Biodieseleinbruchs in die Analytik notwendig. Der Biodiesel stammte aus der Messgasaufbereitung (Gaswäsche) und gelangte in Folge einer Anlagenstörung durch die Saugwirkung der Gaspumpe mit in den Gasanalysator MGA09. Dadurch wurde die Infrarot (IR)-Bank mit den IR-Sensoren irreparabel geschädigt und der Analysator musste durch ein Neugerät ersetzt werden. Darüber hinaus mussten alle Gasschläuche inkl. Verbinder zwischen der Messgasaufbereitung und dem Analysator gewechselt bzw. gereinigt werden, um den Biodiesel aus dem System zu entfernen. Dies betraf ebenso die Gaspumpe, die gereinigt und deren Membran im Rahmen der Wartung gewechselt wurde. Anschließend wurde die bisherige Biodiesel-Gaswäsche, die direkt im Gasstrom abläuft, durch eine Waschflasche ersetzt, um einen Biodieseleintrag in die nachfolgenden Bauteile zu verhindern. Als weitere Sicherheitsmaßnahme wurden Kondensatbehälter am Gaskühler und direkt vor dem Analysator integriert, um evtl. noch vorhandene kondensierbare Flüssigkeiten abzuscheiden. Außerdem wurden die bisherigen Schlauchpumpen am Gaskühler durch zwei neue Schlauchpumpen ersetzt. Dadurch soll die große Häufigkeit an Undichtigkeiten im Bereich der bisherigen Schlauchpumpen vermieden werden. Diese Umbauten sind visuell (grün markiert) in der folgenden Abb. 2-20 im Vergleich zum bisherigen Aufbau gemäß Abb. 2-19 dargestellt.

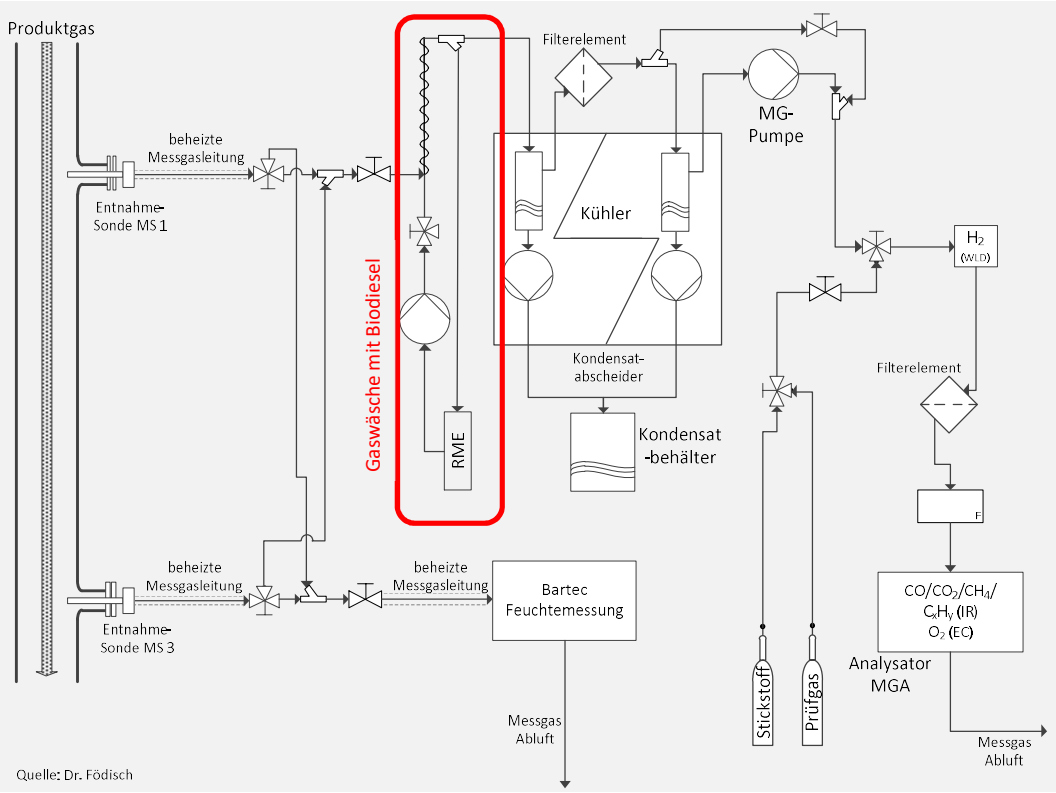


Abb. 2-19 Gaslaufplan der bisherigen Permanentgasanalyse inkl. Gasaufbereitung, eigene Darstellung nach [27]

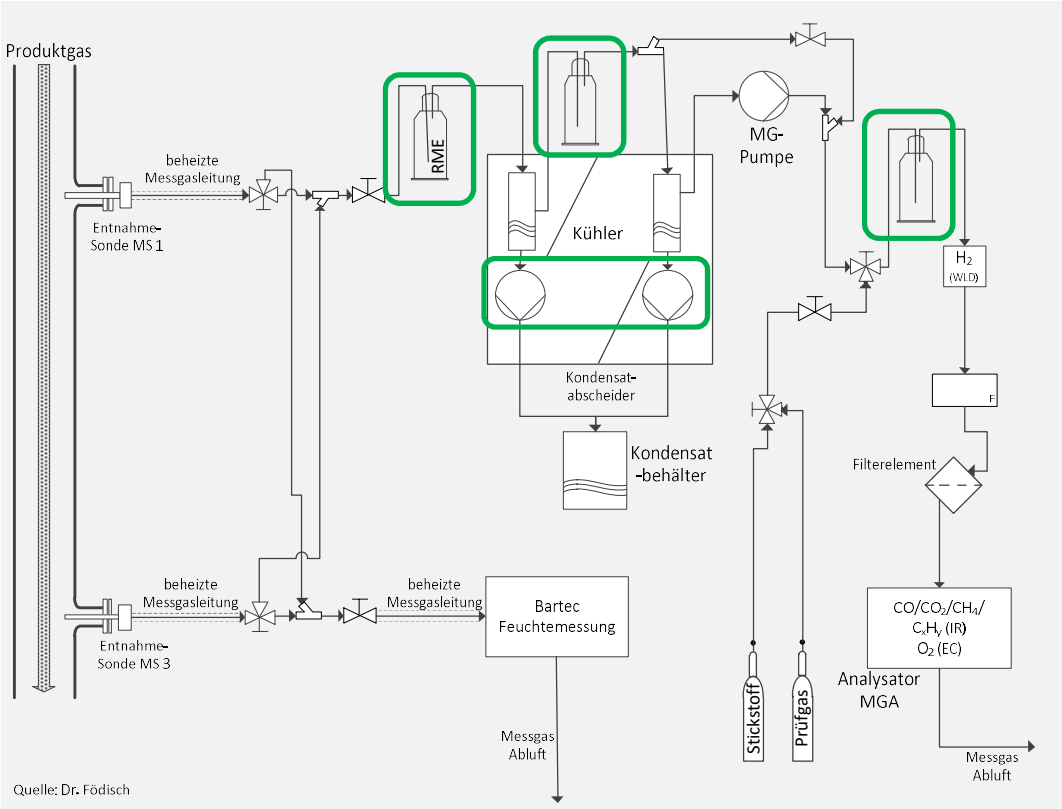


Abb. 2-20 Gaslaufplan der überarbeiteten Permanentgasanalyse inkl. Gasaufbereitung, eigene Darstellung nach [27]

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass in Folge der Anpassungen/Reparaturen keine Undichtigkeiten im Saugbereich der stationären Analytik mehr auftraten. Weiterhin konnte die Gefahr, dass ein direkter Biodieseleintrag aus der Gasaufbereitung in das nachfolgende Analysesystem auftritt, ausgeschlossen werden.

Um die vorhandene Messtechnik und dabei vor allem die Gasanalytik weiter zu validieren, wurde im Rahmen einiger 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. Dabei wurde besonders der große Einfluss der im Verlaufe der MF steigenden Raumtemperatur auf die Erfassung des CO-Gehaltes im Produktgas bei Einsatz der mobilen Messkoffer aufgearbeitet und die Bedeutung einer möglichst konstanten Raumtemperatur durch ein verbessertes Lüftungsmanagement verdeutlicht. Ebenso wurde die Abhängigkeit der O_2-Konzentration des jeweiligen Messsystems vom Differenzdruck über dem Gewebefilter herausgearbeitet. 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. Dies wurde bei der Anwendung des mobilen Mikro-Gaschromatographen (siehe nachfolgendes Kapitel) berücksichtigt und ein externer Kühler mit integrierter Gaspumpe dem Messsystem vorgeschaltet.

Mikro-Gaschromatograph

Bezüglich der Erfassung der Produktgaskonzentrationen der Vergasungsanlage wurde ein mobiler Mikro-Gaschromatograph (Mikro-GC) der Firma INRAG AG erworben. Herzstück des Systems ist ein Gaschromatographie-Modul, das mit einem Injektor, zwei Trennsäulen (Molsieve 13X und HayeSep A) und einem Mikro-Wärmeleitfähigkeitsdetektor bestückt ist. Das Gerät ist für die quantitative Bestimmung von Pyrolysegasen konfiguriert. Dazu wird eine gepackte Trennsäule verwendet, die einem Molsieb vergleichbar ist. Diese Säulen trennen Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und C1-C3 Kohlenwasserstoffe. Als Trägergas wird Argon 5.0 verwendet. Der Wärmeleitfähigkeitsdetektor reagiert nach Herstellerangaben auf Konzentrationen von 50 ppm. Ein Chromatogramm wird in 120 Sekunden erstellt, das gesamte Messintervall des Systems beträgt etwa vier Minuten. Folgende Gaskomponenten sind mit der vorhandenen Konfiguration des Mikro-GC messbar: Sauerstoff (O_2), Wasserstoff (H_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Ethen (C_2H_4), Ethan (C_2H_6), Stickstoff (N_2).

Abb. 2-21 Mikro-Gaschromatograph I-GRAPH XS der Firma INRAG AG

Für die Produktgasmessungen wird das Messgas durch ein mobiles Messgasaufbereitungssystem, bestehend aus Staubfilter und Gaskühler, angesaugt, getrocknet und gefiltert. Das aufbereitete Gas wird durch einen PTFE-Schlauch abgeleitet, welcher über ein T-Stück mit dem Mikro-GC in Verbindung steht. Das System aus Messgasaufbereitung und Mikro-GC benötigt nach dem Einschalten etwa eine Stunde, um einen stabilen Zustand zu erreichen. In dieser Zeit erfolgt auch eine Konditionierung (Ausheizen) des GC, um die Trennsäule von Verunreinigungen zu

befreien. Dann werden mindestens drei Prüfgasmessungen durchgeführt und bei stabilen Messwerten wird auf diese kalibriert. Danach erfolgen die Messungen im automatisierten Betrieb. Jede Messung beginnt damit, dass Messgas über die Probeschleife des GC mit der integrierten Vakuumpumpe gepumpt wird. Anschließend wird Messgas injiziert und ein Chromatogramm entsprechend der entwickelten Methode aufgenommen. Abschließend wird der GC wieder auf die Startemperatur gekühlt. Am Ende des Messtages wird die Kalibrierung mit weiteren Prüfgasmessungen überprüft.

Das Messgas wird über eine externe Gaspumpe aus der Messgasleitung angesaugt, von Partikeln über einem Glaswollfilter gereinigt und auf eine definierte Temperatur abgekühlt, um das im Gas enthaltende Wasser auszukondensieren. Da keine interne messtechnische Bestimmung des Wassergehalts erfolgt, muss je nach Kühlertemperatur der Gasaufbereitung die Gaszusammensetzung hinsichtlich des Restwassergehalts korrigiert werden, um Aussagen zu den Konzentrationen im trockenen Gas treffen zu können. Mit Hilfe der Messung der Kühltemperatur und der Magnus-Gleichung zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks kann die Restkonzentration von Wasserdampf im Messgas nach der Kühlung bestimmt und Konzentrationswerte des Mikro-GC auf trockenes Gas umgerechnet werden.

Da die einzelnen Komponenten mittels einer Trennsäule sauber aufgetrennt werden und bei der Konfiguration des Mikro-GC keine Peaküberschneidungen vorliegen, treten keine Querempfindlichkeiten bzw. andere Auswerteprobleme auf.

Darüber hinaus wurde gemeinsam mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) eine Messfahrt am Laborversuchsstand zur Biomassevergasung des DBFZ durchgeführt und die beiden baugleichen Mikro-GC der Einrichtungen (DBFZ und HSZG) 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.

Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR)

In [11] und [28] sind u.a. einzuhaltende Emissionswerte von Stoffen 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 folglich eine Heißgasmessung eingesetzt werden.

Nach eingehender Recherche wurde ein Abgasanalysesystem nach dem Prinzip der Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR) ausgeschrieben. Die Fa. ANSYCO GmbH mit dem angebotenen mobilen FTIR DX4000 erhielt den Zuschlag der Ausschreibung. Dieses System (vgl. Abb. 2-22) nutzt zur schnellen Messung von Gaskomponenten deren spezifische Infrarotspektren. Dies ermöglicht eine Identifizierung sowie Quantifizierung aller relevanten Abgasbestandteile. Der Vorteil der FTIR-Methode liegt in der gleichzeitigen Messung aller Infrarot-Wellenlängen, aus denen ein komplettes IR-Spektrum resultiert. Dadurch können alle Komponenten in einer Messung erfasst und Interferenzen kompensiert werden.

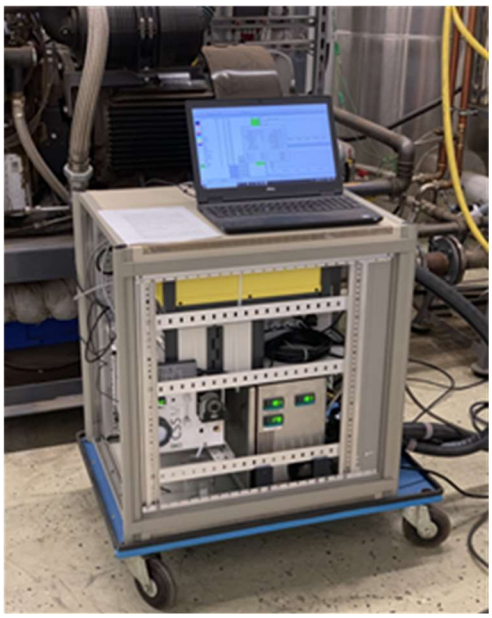


Abb. 2-22 Messwagen mit FTIR im TCV

Zusätzlich sind ein Messgaskühler, ein paramagnetischer Sauerstoffanalysator sowie beheizte Messgasschläuche und eine beheizte Entnahmesonde Bestandteil des Analysesystems. Der Messgaskühler ist zur Gasaufbereitung für die paramagnetische Sauerstoffanalyse notwendig.

Mit dem Gesamtsystem aus Sauerstoffanalysator und FTIR mit den vorhandenen Referenzdatenbanken für die Infrarotspektren können ca. 30 verschiedene Gaskomponenten erfasst werden, wobei die Konzentrationen der folgenden Gase spezifisch ausgewertet werden: Wasser (H_2O), Sauerstoff (O_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickoxide (NO und NO_2 als NOx), Methan (CH_4), Schwefeldioxid (SO_2), Ammoniak (NH_3), Formaldehyd (CH_2O) und Benzol (C_6H_6).

2. Berührungslose Volumenstrommessung mit Laser-Doppler-Anemometer

Im Folgenden werden die wesentlichen Arbeitsschritte zur Beschaffung und Installation des 2-Komponenten-Laser-Doppler-Anemometers (LDA) sowie erste Ergebnisse der damit durchgeführten Messungen am TCV dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass dieser Prozess in sieben ausführlichen Arbeitsprotokollen festgehalten wurde, welche es zukünftig ermöglichen, auf die dabei gemachten Erfahrungen zurückzugreifen.

Beschaffung und Installation

Für die nichtinvasive Messung des Produktgasvolumenstromes erfolgte im Rahmen des Projektes die Beschaffung eines 2-Komponenten-Laser-Doppler-Anemometers. Hiermit sind bei Vorhandensein eines optischen Zugangs und kleinen mit der Strömung transportierten Partikeln örtlich hochaufgelöste Messungen der Strömungsgeschwindigkeit möglich. Dafür werden zwei Laserstrahlen derselben Wellenlänge phasenverschoben über eine Sendelinse zur Interferenz gebracht. Durchquert nun ein Partikel das entstandene Messvolumen, so kann mithilfe einer Empfangslinse und zugehörigem Photomultiplier ein charakteristisches Signal detektiert werden, dessen Frequenz direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist. Wird die axiale Komponente dieser lokalen Strömungsgeschwindigkeit nun an mehreren repräsentativen Messpunkten desselben Strömungsquerschnittes abgegriffen, gelingt durch Integration die Bestimmung des Durchflusses. Aufgrund der Nichtinvasivität des

Systems ist dessen Einsatz auch in stark partikelbeladenen Strömungen möglich, in welchen konventionelle Messsysteme verschmutzt oder beschädigt werden.

Vor der Beschaffung wurden die Kriterien an ein derartiges Messsystem definiert. Folgende Komponenten bilden die Hauptbestandteile:

- Laser-Doppler-Anemometer (Laser mit 2 Wellenlängen, Lasersonde, Bragg-Zelle, Photomultiplier, Signal-Prozessor)
- Traverse zum Verfahren der Lasersonde (3x Translation, 1x Rotation)
- Seedinggenerator zum Erzeugen von Tracerpartikeln
- Div. Zubehör (Notebook inkl. Software, Arbeitstisch, Laserschutzbrillen/-justierbrillen, Atemschutz, wechselbare Sendeoptiken etc.)

Der in diesem Zusammenhang durchgeführte Ausschreibungsprozess wurde bereits ausführlich in [29] dokumentiert. Den Zuschlag erhielt die Dantec Dynamics GmbH. Am 01.10.2018 erfolgte die Anlieferung des LDA in die Versuchshallen der Hochschule Zittau/Görlitz. Mithilfe eines vereinfachten Testaufbaus konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems nachgewiesen werden. Hieran schloss sich die Umsetzung der Komponenten im TCV an. Als optischer Zugang diente eine kreisrunde Schauglasarmatur (Innendurchmesser: 61,6 mm), welche zwischen Gasreinigung und BHKW installiert ist (siehe [30]). Nach Aufbau aller Komponenten erfolgten hieran zunächst punktuelle Messungen während des Anfahrvorgangs der Anlage. Jene Phase zeichnet sich durch starke Kondensatbildung aus. Die dabei entstehenden Tröpfchen konnten zeitweise als Tracerpartikel genutzt werden und die Größenordnung der erhaltenen Messwerte war plausibel (Gasgeschwindigkeit ca. 10 m/s). Allerdings konnte aufgrund softwareseitiger Fehlermeldungen der Traverse zu diesem Zeitpunkt noch kein Profil vermessen werden. Nachdem die Anlage durchgewärmt war und die Kondensationseffekte verschwanden, erschien es nicht mehr möglich, prozessinterne Partikel für die Signalgenerierung zu nutzen. Aufgrund der prozessinternen Gegebenheiten darf das Hinzuführen von Partikeln nur mit einem Inertgas (Stickstoff) erfolgen.

Nach Abschluss des ersten Installationstermins war festzustellen, dass einige Anpassungen für den problemlosen Betrieb des Messsystems erforderlich waren, welche im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Anpassungen

Wichtiges Augenmerk musste auf die Ausrichtung der Strahlen gelegt werden. Dazu wurde die traversierbare Lasersonde gemäß Abb. 2-23 so eingestellt, dass deren in das Schauglas eintretende Strahlen auf selber Höhe wie die zugehörigen Reflexionen lagen. Auch ein Blick vom Rohrboden aus konnte Aufschluss über die Symmetrie der eintretenden Strahlen geben (s. Abb. 2-24).

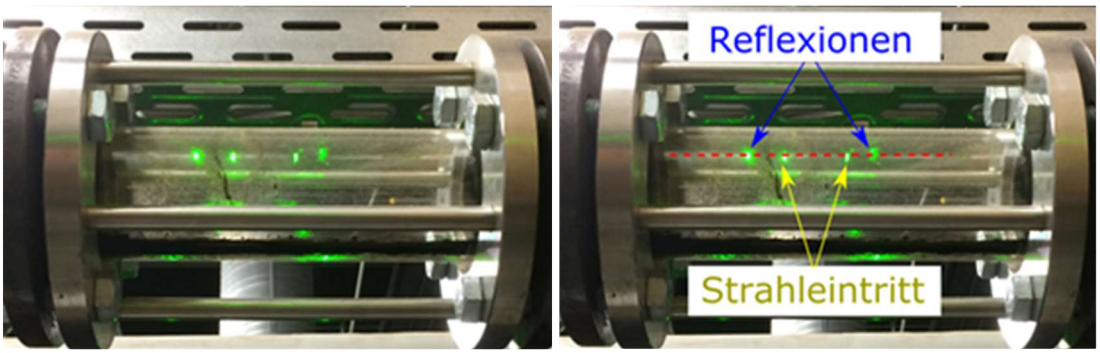


Abb. 2-23 Strahleintritt und Reflexionen (links) müssen bei senkrechtem Eintritt auf derselben Horizontalen (rote Linie) liegen (rechts)

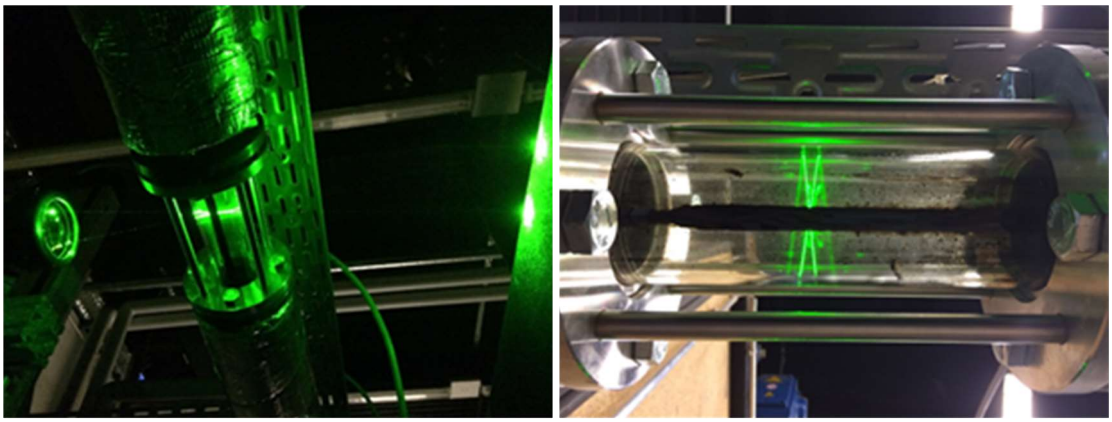


Abb. 2-24 Symmetrie der eintretenden und reflektierten Strahlen beim Blick vom Rohrboden aus

Weiterhin wurde die wichtige Bestimmung des Rohrmittelpunktes mithilfe des Anodenstromes der Photomultiplier durchgeführt. Dieser ist dann besonders hoch, wenn Reflexionen von Grenzflächen (Rohrinnenfläche, Rohraußenfläche) auf die Empfangslinse treffen. Der Anodenstrom erreicht demnach sein Maximum, wenn das Zentrum des Messvolumens in der Grenzfläche liegt. Somit gelingt die Festlegung eines Koordinatenursprunges (x=0 mm, y=0 mm) im Zentrum des kreisrunden Messquerschnittes. Die dabei aufgenommenen Profile an laserzugewandter (Vorderseite) und laserabgewandter (Rückseite) Seite sind in Abb. 2-25 in normierter Form zu sehen. Einerseits wurde der jeweilige Verfahrweg (y-Position) auf dessen Endpunkt bezogen und andererseits stehen die am jeweiligen Messpunkt gemessenen Anodenströme im Verhältnis mit dem an Vorder- bzw. Rückseite gemessenen maximalen Anodenstrom.

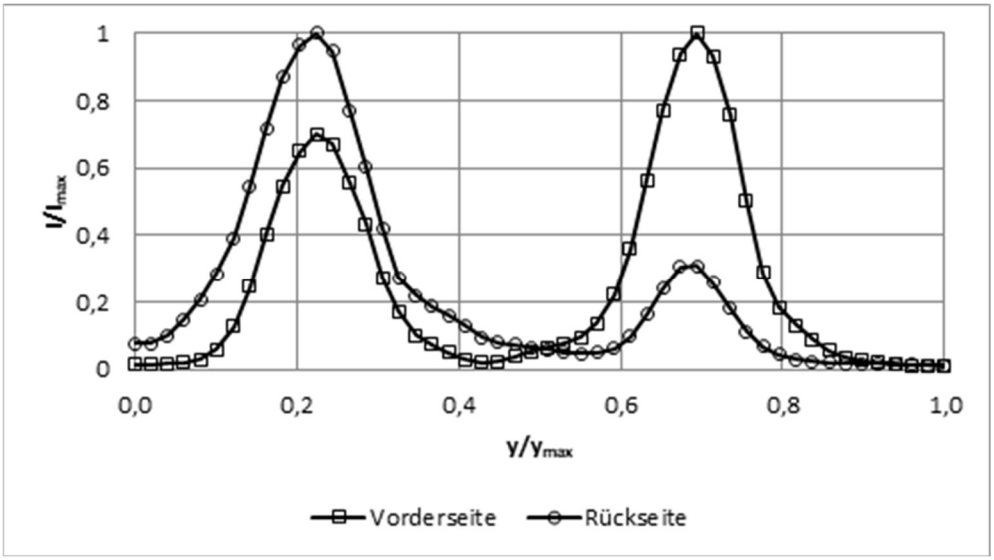


Abb. 2-25 Bestimmung der Wandstärke am Schauglas mithilfe des Anodenstromes

Es ist erkennbar, dass sich sowohl auf der laserzugewandten als auch auf der laserabgewandten Seite ein Sattel ausprägt. Die Peaks liegen dabei jeweils 2,87 mm auseinander. Der Rohrinnendurchmesser wurde mithilfe dieser Methode auf D_i = 61,1 mm bestimmt, was 0,5 mm vom vorgegebenen Innendurchmesser D_i = 61,6 mm abweicht. Allerdings wurde seitens des Herstellers auch eine Toleranz von ±1,5 mm angegeben, weswegen das Ergebnis als durchaus realistisch angesehen werden kann.

Bevor das LDA während des Nennbetriebes eingesetzt wurde, erfolgten Messungen während des Spülvorganges. Unter Variation der Seedinggeneratoren wurden mehrere Geschwindigkeitsprofile aufgenommen. Hierbei wurde das Seeding in zwei Messreihen mittels des Aerosolgenerators AGF 2.0 i.P. und bei der dritten Messreihe mithilfe des Dantec-Generators realisiert. Die erhaltenen Ergebnisse zeigt Abb. 2-26.

Es wird deutlich, dass die beiden ersten Messreihen niedrigere Geschwindigkeiten und ein symmetrischeres Profil zeigen, als Messreihe 3. Grund hierfür ist der signifikante Volumenstromeintrag des Dantec-Generators, welcher im Verhältnis zum Durchfluss der Spülung einen durchaus relevanten Anteil besitzt und somit die Ausprägung eines Profils zumindest während des Spülbetriebes deutlich beeinträchtigt. Für den Nennbetrieb wird dieser Einfluss aufgrund des deutlich höheren Durchflusses an Produktgas jedoch keine Rolle spielen.

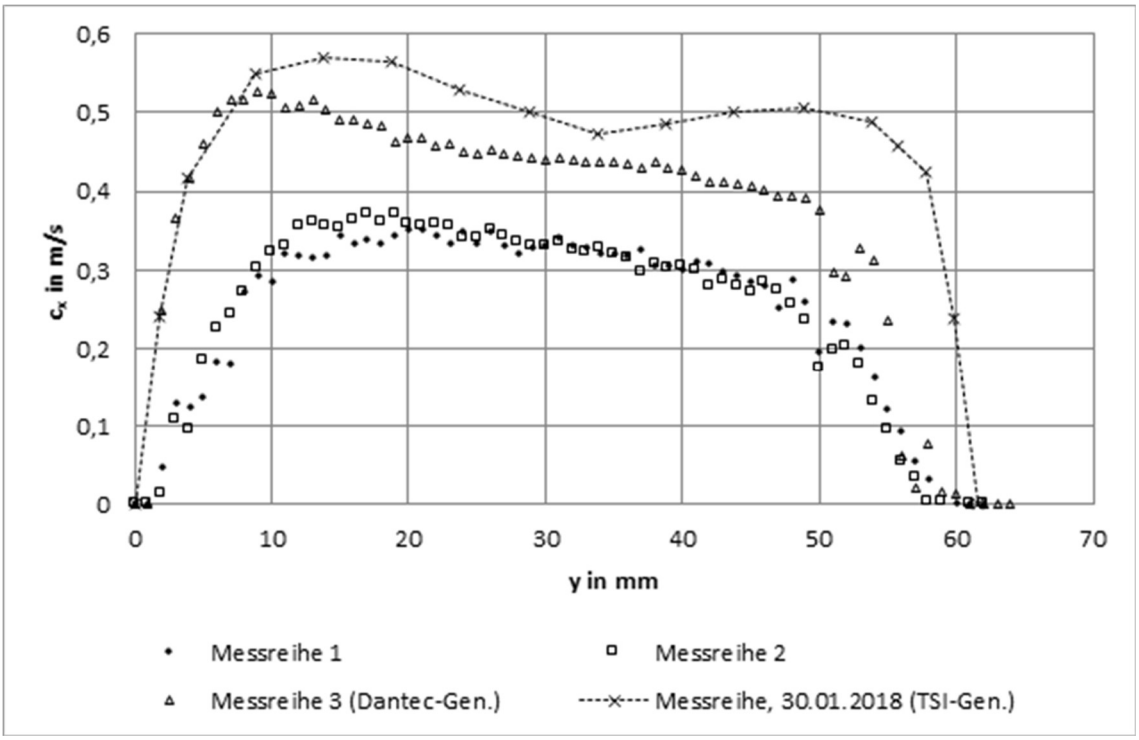


Abb. 2-26 Geschwindigkeitsprofile während des Spülvorganges im Vergleich mit Messreihe des Testsystems

Beim Vergleich mit dem im Januar 2018 verwendeten TSI-Testsystem inkl. TSI-Generator wird diese Beeinträchtigung durch das Seeding ebenfalls deutlich. Auch damals wurde das gemessene Geschwindigkeitsprofil stark durch den eingetragenen Stickstoff-Partikel-Strom zu höheren Durchflüssen und einem gestörten Profil hin beeinflusst.

Messungen im Nennbetrieb

Im Fokus der Untersuchungen standen die Messungen während des Nennbetriebes. Die Aufnahme von Geschwindigkeitsprofilen unter Nutzung von

- Kondensattröpfchen während des Anfahrvorgangs,
- prozessinterner Staubpartikel während der Abreinigung des Gewebefilters sowie
- extern mittels Seeding-Generator zugeführter DEHS-Partikel

wurden deshalb intensiv untersucht.

Während des Anfahrvorgangs gelang unter Nutzung von Kondensat das Abtasten des in Abb. 2-27 dargestellten Profils (Rohsignal).

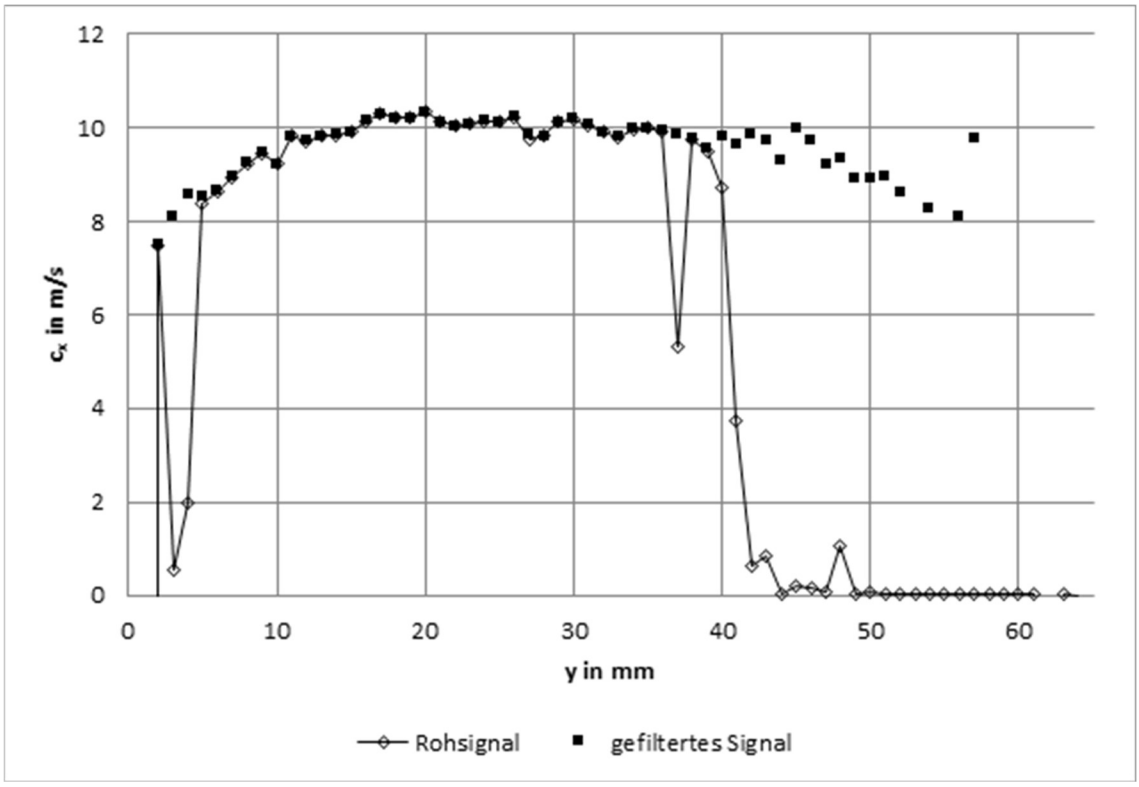


Abb. 2-27 Abgetastetes Geschwindigkeitsprofil während des Anfahrvorgangs mit Kondensattröpfchen als Seedingmaterial vor und nach Filterung

Ein Geschwindigkeitsniveau von c_x=10 m/s kann ähnlich zu den bisherigen Erkenntnissen ausgemacht werden. Allerdings fällt auf, dass das Profil teilweise durch Einbrüche gestört und im hinteren Drittel (laserabgewandte Seite) keine sinnvollen Ergebnisse widerspiegelt. Diese Effekte lassen sich mithilfe der Häufigkeitsverteilungen in Abb. 2-28 erklären.

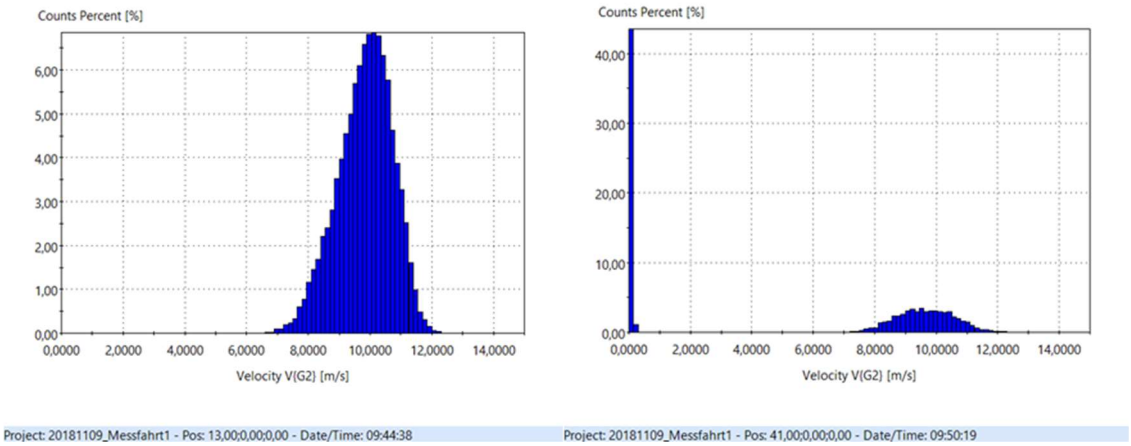


Abb. 2-28 Unbeeinträchtigtes Histogramm an Position y=13 mm (links) und durch Reflexionen gestörtes Histogramm bei y=41 mm (rechts)

Darin wird deutlich, dass es Messwerte gibt, welche normalverteilt vorliegen. Andererseits existieren Messpunkte, an welchen starke Störungen durch Reflexionen

die Normalverteilung beeinträchtigen. Dies führt zu einer enorm hohen Anzahl an Messwerten bei c_x=0 m/s, was wiederum eine Herabsetzung des Mittelwertes an diesen Stellen nach sich zieht. Derart beeinträchtigte Datensätze müssen einer Aufbereitung unterzogen werden, so dass nur jene Daten in den Mittelwert des jeweiligen Messpunktes eingehen, welche unter Ausschluss von Reflexionen aufgenommen wurden. Geschieht dies, erweitert sich das gemessene Geschwindigkeitsprofil gemäß des ebenfalls in Abb. 2-28 dargestellten Ergebnisses. Somit ist nachgewiesen, dass es im Anfahrvorgang durchaus auch ohne externes Seeding gelingen kann, Geschwindigkeitsprofile aufzunehmen. Allerdings ist das Zeitfenster hierfür relativ kurz (ca. 75 min). Mit zunehmender Durchwärmung der Anlage verringert sich die Bildung von Kondensattröpfchen, was zur Verschlechterung der Signaldichte führt und diese schließlich vollends zum Erliegen kommt. Diese Tatsache trägt dazu bei, dass die statistische Sicherheit auf der laserabgewandten Seite, also jener Seite, welche zu fortgeschrittener Zeit vermessen wird, nicht mehr in ausreichendem Maße gegeben ist.

Der Versuch, prozessinterne Partikel während des stationären Zustandes zu nutzen, schlug demgegenüber fehl. Lediglich während der Abreinigungszyklen des Gewebefilters können für einen sehr kleinen Zeitraum (ca. 10 min) Signale detektiert werden. Für eine durchgehende Netzmessung innerhalb des Messquerschnittes ist diese Dauer zu gering.

Unter Zuhilfenahme des Seeding-Generators mit Stickstoff als Treibmittel konnten weitere Geschwindigkeitsprofile aufgenommen werden. Ein Vergleich mit den vormals mit dem Testsystem der Firma TSI durchgeführten Messungen im Nennbetrieb ist beispielhaft in Abb. 2-29 zu erkennen.

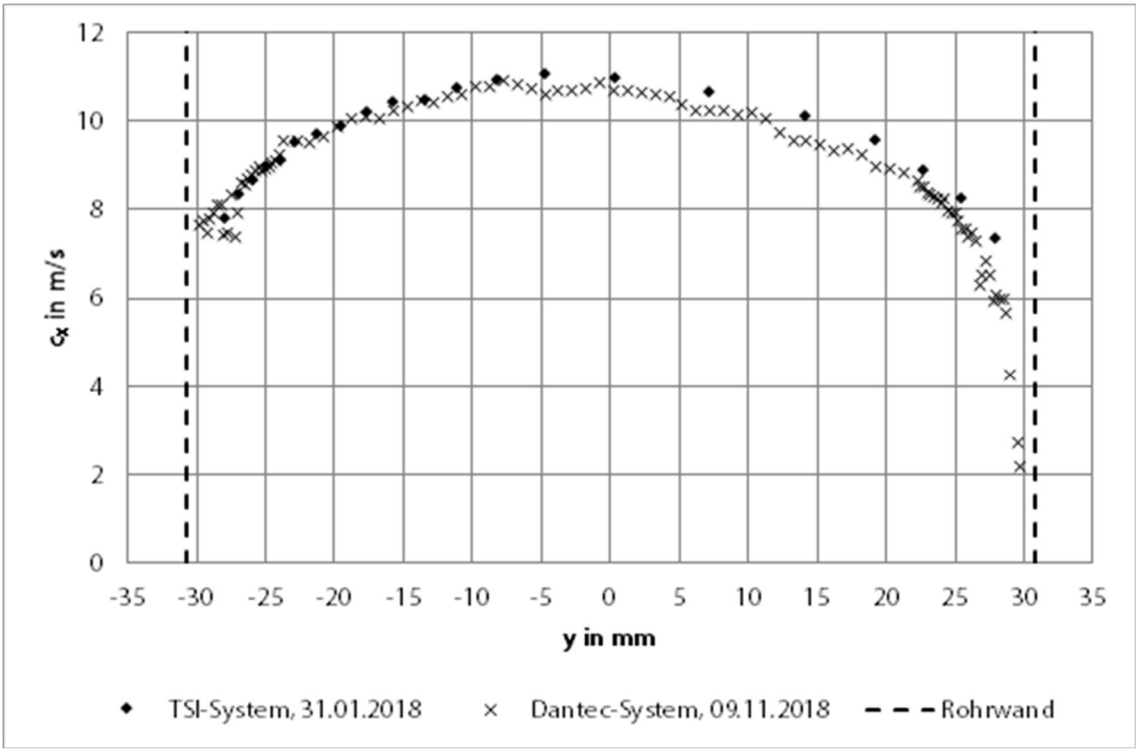


Abb. 2-29 Vergleich zweier im Nennbetrieb aufgenommener Messreihen mit dem TSI-Test-Systemsowie dem Dantec-System

Beide Messreihen bilden dasselbe Geschwindigkeitsniveau ab. Die im Januar 2018 aufgenommenen Messergebnisse ließen sich zehn Monate später trotz Verwendung eines anderen Messsystems und Seeding-Generators sehr gut reproduzieren. Das mittels des Dantec-Systems aufgenommene Profil wurde mit deutlich kleineren

Schrittweiten durchgeführt (1 mm im Kernbereich und 0,25 mm im Randbereich). Es ist darüber hinaus erkennbar, dass auf der laserabgewandten Seite (positive y-Koordinaten) ein besseres Auflösen der Grenzschicht gelingt.

Die Integration liefert nach Modellierung der wandnähsten Schicht mithilfe eines Potenzansatzes in beiden Fällen Produktgasvolumenströme, welche in der Größenordnung von 100 m³/h liegen. Der Unterschied liegt lediglich bei (1…2) %.

Die bis hierhin verwendeten Auswerteskripte wurden in Anlehnung an VDI/VDE 2640 in Matlab programmiert. Unter Annahme einer Rotationssymmetrie konnte damit auf einfache Weise eine Abschätzung der Volumenströme erzielt werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass für eine erhöhte Genauigkeit das Vermessen eines einzelnen Profils nicht ausreichend ist und auf eine kommerzielle Software zurückgegriffen werden sollte. Gemäß dem Angebot GV 0502/2018 der Optolution Messtechnik GmbH vom 09.05.2018 erfolgte im Rahmen des Projektes die Beschaffung der Zusatzsoftware „LDV-Suite“, welche eine erprobte Messdurchführung (Berücksichtigung der Strahlbrechung) sowie Auswertung gemessener Geschwindigkeitsprofile hin zu Durchflussbestimmungen erlaubt. Der wesentliche Unterschied zur bisherigen Vorgehensweise ist, dass nun Ganzfeldmessungen durchgeführt und einbezogen werden können. Die Software beinhaltet insbesondere folgende Funktionalitäten:

- Strahlverfolgung für LDA-Messungen in kreisrunden Rohrleitungen
- Bestimmung des Rohrmittelpunktes
- Ermittlung des Volumenstromes in kreisrunden Rohrleitungen aus LDA-Messdaten

Seitens Optolution erfolgte die Lieferung einer speziell auf den Datenaustausch mit der Dantec-Software angepassten Version. Die Messgitter werden in der „LDV-Suite“ erstellt und nach Datenexport in der BSA Software von Dantec verwendet. Die so erzielten Ergebnisse werden zur Auswertung wieder in die „LDV-Suite“ portiert. Während der Messfahrten vom 17.12.2018, 16.01.2019 sowie 22.01.2019 wurde diese nun im Zusammenspiel mit dem LDA-System getestet und mehrere Geschwindigkeitsprofile innerhalb desselben Messquerschnittes aufgenommen. Bedeutend war hierbei, dass mithilfe der Strahlverfolgung der Mittelpunkt des Messquerschnittes genauer bestimmt werden konnte, sodass diese Methode fortan stets in Kombination mit der Anodenstrom-Methode eingesetzt wurde. Darüber hinaus erwies sich ein schräg angestelltes Messgitter als günstig, um Störsignale durch direkte Reflexionen zu minimieren.

Auswertung

Für die Auswertung müssen die aufgenommenen Profile aus der Software „BSA Flow“ exportiert und in die Software „LDV-Suite“ importiert werden (siehe Abb. 2-30).

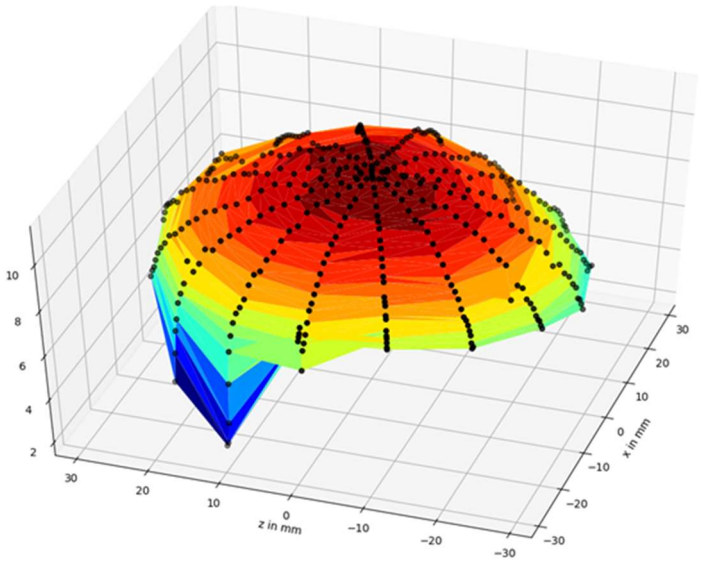


Abb. 2-30 Rohdaten in LDV-Suite

Die Angabe von Dichte und kinematischer Viskosität des Produktgases sowie des Rohrinnendurchmessers sind erforderlich. Erstere sind unter Angabe von Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung über die Stoffwertbibliothek „LibIdGasMix“ der HSZG ermittelbar.

Nach diversen Möglichkeiten der Filterung (Punktausschluss, Glättung, Wandfunktion) wurden diese Profile, welche in Abb. 2-31 beispielhaft für eine Messung mit acht Messpfaden dargestellt sind, einer Auswertung mithilfe der Software „LDV-Suite“ unterzogen.

Es ist anzumerken, dass innerhalb der LDV-Suite beim Ausschluss von Messpunkten nur einer der beiden folgenden Wege gewählt werden kann:

Variante 1: Durch die Verringerung der „Wall Point Uncertainty“ U werden Punkte ausgeschlossen. Die Berechnung erfolgt mithilfe des Turbulenzgrades Tu sowie der Anzahl detektierter Burst-Signale N_{Burst} über

$$U = \frac{2 * Tu}{\sqrt{N_{Burst}}}$$

Variante 2: Mithilfe einer manuellen Selektion auszuschließender Punkte, beginnend von linker bzw. rechter Profilflanke, wird das Profil auf einen zulässigen Kernbereich beschränkt.

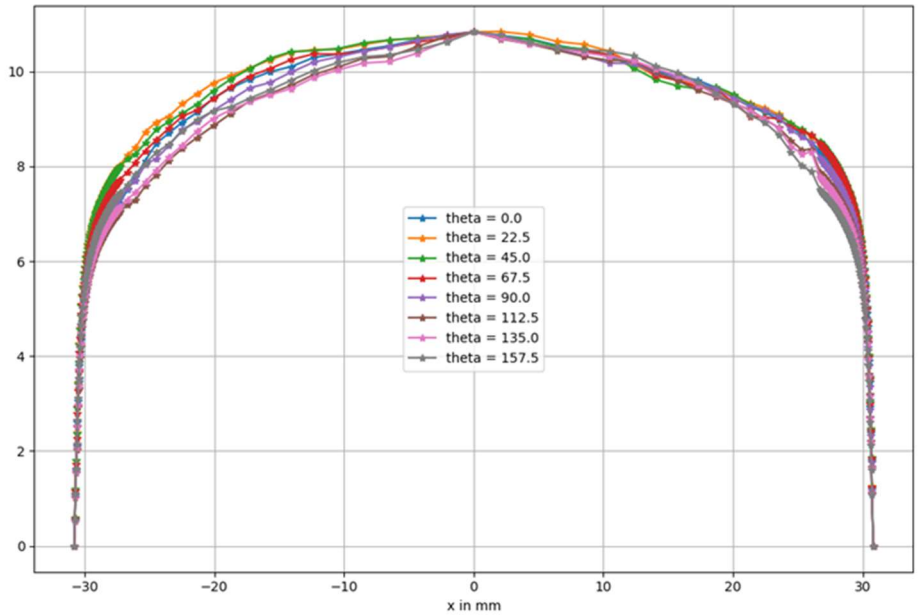


Abb. 2-31 Geschwindigkeitsprofile nach Filterung

Dementsprechend unterscheiden sich auch die Ergebnisse, welche für Variante 1 in Tab. 2-4 zusammengefasst und mit den Werten vorangegangener Messungen verglichen sind.

Tab. 2-4 Auswirkung der Modifizierungsmaßnahmen nach Variante 1 auf den Volumenstrom

Maßnahme	Beschreibung	Volumenstrom in m³/h mit Seeding
1	Rohdaten	90,019
2	Wall Point Uncertainty U=5 %	90,064
3	Wandgesetz nach [31]	92,332
4	Einmalige Anwendung des Tiefpassfilters	91,495
	Relative Abweichung zur Messung vom 17.12.2018 in %	-0,3
	Relative Abweichung zur Messung vom 16.01.2019 in %	-1,3

Der Vergleich mit den als Referenz dienenden Messungen vom 17.12.2018 und dem 16.01.2019 liefert gemäß

$$f_{rel} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{Ref}} - 1\right) * 100\%$$

Abweichungen im Bereich von $|f_{rel}|<2$ %.

Die Abweichungen nach Variante 2 sind Tab. 2-5 zu entnehmen und fallen dabei in ähnlicher Größenordnung aus. Der Unterschied zwischen beiden Auswertemethoden verhält sich mit $|f_{rel}|=1{,}8$ % ebenfalls gering.

Tab. 2-5 Auswirkung der Modifizierungsmaßnahmen nach Variante 2 auf den Volumenstrom

Maßnahme	Beschreibung	Volumenstrom in m³/h mit Seeding
1	Rohdaten	90,019
2	Wall Point Left: 6; Wall Point Right: 7	86,781
3	Wandgesetz nach [31]	92,924
4	Einmalige Anwendung des Tiefpassfilters	93,149
	Relative Abweichung zur Messung vom 17.12.2018 in %	1,6
	Relative Abweichung zur Messung vom 16.01.2019 in %	-0,5
	Relative Abweichung zu Variante 1 in %	1,8

Jene Maßnahmen, welche eine Erhöhung der Genauigkeit von Messung und Auswertung mit sich bringen, sind in Tab. 2-6 zusammengefasst.

Tab. 2-6 Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit bei der Durchflussbestimmung

ID	Art	Maßnahme
1	Messung	Verwendung der Anodenstrommethode in Kombination mit der Strahlverfolgungsrechnung zur Rohrmittenbestimmung
2	Messung	Verwendung eines schrägen Messgitters, um Reflexionen auszuschließen
3	Messung	Erhöhung der Anzahl an Messpfaden und Messpunkten pro Pfad
4	Messung	Einsatz eines sinnvollen Abbruchkriteriums pro Messpunkt
5	Auswertung	Verwendung eines effektiven Filters zur Bereinigung von Störsignalen
6	Auswertung	Verwendung eines sinnvollen Interpolationsverfahrens zwischen den Messpunkten
7	Auswertung	Ausschluss von Punkten im Randbereich
8	Auswertung	Modellierung der Grenzschicht durch Wandfunktionen (z.B. [31])

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Installation des LDA-Systems erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Es erfolgte die Gestaltung eines funktionalen Mess- und Auswerteablaufes sowie die ausführliche Dokumentation innerhalb von Protokollen. Die bestimmten Durchflüsse lagen bei etwa (91…94) m³/h und deren Reproduzierbarkeit erwies sich als sehr gut. Der Vergleich zwischen den Messungen zweier unterschiedlicher LDA-Systeme sichert der Vorgehensweise eine hohe Genauigkeit zu. Eine Bestimmung des Produktgasvolumenstromes gelingt unter Zulassung einer etwas höheren Unsicherheit sogar ohne Seeding während der Anfahrphase. Für eine Verbesserung der Genauigkeit müsste eine höhere Messdauer pro Messpunkt zugestanden werden, was zu einer Erhöhung der Gesamtmesszeit führt. Dies ist dahingehend kritisch, dass sich über längere Zeiträume eine Änderung des Durchflusses ergeben kann. Die Justage zwischen Zeitaufwand und Genauigkeit bedarf noch weiterer Untersuchungen innerhalb des Folgeprojektes.

Tab. 2-7 Arbeitsschritte zur Installation des LDA-Systems

ID	Termin	Arbeitsschritt
1	01.10.2018	Anlieferung des Systems; Prüfung auf Vollständigkeit
2	02.10.2018	Aufbau eines provisorischen Unterstandes für die Traverse; Aufbau des Systems im TCV; Punktuelle Testmessungen während einer Messfahrt; Rohrmittenbestimmung mithilfe Anodenstrom-Methode (Test)
3	08.11.2018	Aufmaß des Unterbaus; Ausrichtung der Strahlen; Messung der optischen Strahlleistung; Rohrmittenbestimmung mithilfe Anodenstrom-Methode; Installation neuer Traversentreiber; Vermessung dreier Geschwindigkeitsprofile während des Spülvorgangs; Test der Empfangsoptik in Seitwärtsstreuung
4	09.11.2018	Aufnahme eines Geschwindigkeitsprofils unter Nutzung von Kondensattröpfchen; Filtereinstellungen zum Ausschluss von durch Reflexionen erzeugten Signalen; Aufnahme eines Zeitverlaufes nach Abreinigung des Gewebefilters; Aufnahme von Geschwindigkeitsprofilen mit externem Seeding
5	05.12.2018	Aufbau des Untergestells; Inbetriebnahme der Rotationseinheit; Erneutes Ausrichten der Traverse zum Schauglas
6	17.12.2018	Integration der Optolution-Software zur Vorbereitung und Auswertung von Ganzfeldmessungen; Durchführung von Ganzfeldmessungen
7	16.01.2019	Durchführung von Ganzfeldmessungen; Fehlersuche der Traversierung
8	22.01.2019	Durchführung von Ganzfeldmessungen; Fehlersuche der Traversierung
9	16.04.2019	Fehlersuche der Traversierung; Test des Beam Translators
10	30.04.2019	Installation eines neuen isel-Treibers behebt Traversenfehler; Abschluss der Inbetriebnahme

Der fertig installierte, einsatzbereite Versuchsstand ist schließlich Abb. 2-32 zu entnehmen.

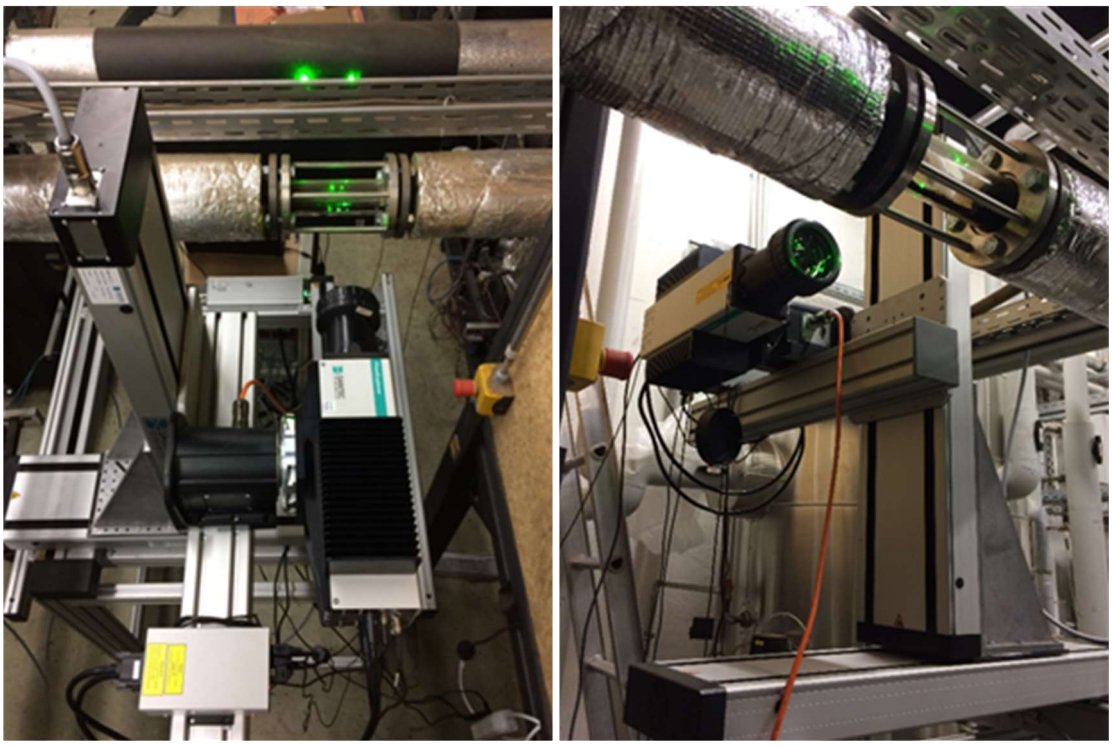


Abb. 2-32 Installierter LDA-Versuchsstand mit ausgerichtetem, betriebsbereitem Laser

3. Speichertechnologien

Ziel des Arbeitspaketes Speichertechnologien war es, sowohl Wärme- als auch stoffliche Speicher in einem dezentralen Biomasse-Vergasungs-BHKW zu etablieren. Dies erforderte die Entwicklung angepasster Speichersysteme, welche die Speicherung von Wärme und Brenngas ermöglichen. Mit diesen Maßnahmen soll die Anlage flexibilisiert und somit die Bereitstellung von bedarfsgerechten Netzdienstleistungen sichergestellt werden. Auf Grund einer verbesserten Kaltstartfähigkeit durch die genannten Maßnahmen können ein effizienter und schonender Anlagenbetrieb gewährleistet, die Anlagenlebensdauer erhöht und dadurch ein Beitrag zur Minimierung der Emissionen geleistet werden.

Ein Aspekt der Speicherentwicklung orientierte auf stoffliche Speicher (Gasspeicher), die in gewissen Grenzen eine zeitliche Entkopplung von Teilprozessen der energetischen Umwandlungskette ermöglichen sollen. Im Biomasse-Vergasungs-BHKW bezieht sich dies insbesondere auf die Entkopplung der Brenngaserzeugung im Holzvergaser (thermochemische Umwandlung) und des Brenngasverbrauches im Gasmotor (thermomechanische Umwandlung) durch einen Brenngasspeicher. Dieser sollte bei gleichbleibend hohen Sicherheitsstandards die Gewährleistung sowohl energetisch effizienter als auch emissionsoptimierter Betriebszustände beider Anlagenkomponenten ermöglichen.

Ein weiteres wissenschaftlich-technisches Arbeitsziel beinhaltete die wärme- und strömungstechnische Auslegung sowie experimentelle Validierung der thermischen Speichersysteme (prototypische Systeme für Untersuchungen im Technikum) mit einer optimalen Anpassung der Speicherkapazität, der Leistung und des Wirkungsgrades an die Erfordernisse des Biomasse-Vergasungs-BHKW. Die Grundlage dafür bildeten die Erkenntnisse aus der Systemanalyse. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der im Anlagenbetrieb thermodynamisch bedingt anfallenden überschüssigen Wärme (Produktgas-Kühlung). Nach Prüfung anlageninterner Verwertungspotenziale wurden geeignete thermische Speichersysteme entwickelt, ausgelegt und gefertigt. Ein geeignetes Verwertungspotenzial zeigte sich auf Grundlage der Systemanalyse in der Vorwärmung von Anlagenkomponenten. Diese Komponenten befinden sich hauptsächlich im Bereich der Gaskühlung. Bei diesen Komponenten handelt es sich im Wesentlichen um Wärmeübertrager und Rohrleitungen.

Vorzugsweise wurden Latentwärme-Speichersysteme eingesetzt, die den Phasenwechsel fest/flüssig eines Speichermediums zur Wärmespeicherung nutzen und dabei eine ideale Kombination zwischen energetisch effizientem und wirtschaftlichem Betrieb ermöglichen. Hohe Speicherkapazitäten, konstante und wählbare Temperaturniveaus sowie konstruktiv einstellbare Speicherleistungen garantieren optimale Eigenschaften zur Anpassung an die Anlagenparameter und das Erreichen hoher exergetischer Wirkungsgrade (Minimierung von Wärme- und Temperaturniveauverlusten). Damit soll ein entscheidender Schritt hin zur Etablierung dieser effizienten Speichertechnologie im Bereich der dezentralen Energieversorgungssysteme (Kraft-Wärme-Kopplung) initiiert werden.

Neben den thermischen Speichern sollte ein Brenngasspeicher (stofflicher Speicher) in das Biomasse-Vergasungs-BHKW integriert werden, der die Brenngasproduktion des Vergasers und den Brenngasbedarf des Gasmotors zeitlich entkoppelt und damit einen wichtigen innovativen Schritt zur Verbesserung insbesondere der Umweltverträglichkeit der Motorabgasemissionen derartiger Anlagen darstellt. Durch die Speicherwirkung („pneumatische Weiche“) können schwankende Brenngasqualitäten (speziell beim Anfahren) ebenso ausgeglichen werden wie schwankende Brenngasvolumenströme. Auf Grund hoher Sicherheitsstandards, welche im Zusammenhang mit der Brenngasspeicherung vorliegen, konnte jedoch die Entwicklung und vor allem die

Integration eines derartigen Speichers nicht im geplanten Umfang realisiert werden (siehe Abschnitt 5.3.2). Ausschließlich der Pulsationsdämpfer ist noch Bestandteil der Integrationsplanung.

Alle weiteren Projektziele im Zusammenhang mit der Energiespeicherung konnten im vollen Umfang erreicht und umgesetzt werden. Dies betrifft die Auswertung der Systemanalyse, die Erstellung der Anforderungsprofile der Speicher sowie Fertigung und Test von Speicherprototypen im Labormaßstab. Nach Auswertung dieser Tests konnten auf Basis der Ergebnisse Speicherdemonstratoren entwickelt und gefertigt werden, welche das Anlagenverhalten hinsichtlich der genannten Eigenschaften verbessern.

- Speichertechnische Systemanalyse

Zu Beginn des Projektes wurde eine speicherrelevante Systemanalyse des Biomasse-Vergasungs-BHKW durchgeführt. Diese hat Aufschlüsse über die an der Anlage anfallenden Wärmepotenziale (Mengen, Leistungen, Temperaturniveaus, Wärmeträger) und die in Frage kommenden anlageninternen Wärmebedarfe ergeben. Aufbauend darauf konnten für die Integration und Entwicklung von Speichern Anforderungsprofile erstellt werden. Dies geschah für einen latenten Wärme- und einen Produktgasspeicher.

Latenter Wärmespeicher

Die Systemanalyse umfasste hierbei die im Gesamtsystem anfallenden und für den Eigenbedarf benötigten bzw. extern verbrauchten Wärmemengen. Eine Zuordnung dieser Energien zu Anlagenkomponenten, Wärmeträgermedien (siehe R&I-Fließschema in Abb. 2-33) und deren Temperaturniveaus im stationären Zustand der Anlage wurde ebenso realisiert.

Hierbei wurde zwischen Winter- und Sommerbetrieb unterschieden, da im Winter verschiedene Wärmesenken wie z.B. die Fernwärmeeinspeisung in das Netz der Stadtwerke Zittau eine Wärmeabnahme gewährleisten, während im Sommer bisher viel Wärme an die Umgebung abgegeben werden muss. Daraus konnte ein Optimum hinsichtlich der Betriebsparameter der in die Anlage zu integrierenden Speichertechnologien für einen ganzjährigen Betrieb ermittelt werden. Abb. 2-33 zeigt das für die Speichertechnologien relevante R&I-Fließschema des Biomasse-Vergasungs-BHKW. Zusammen mit Tab. 2-8 kann eine Zuordnung der Wärmeströme erfolgen.

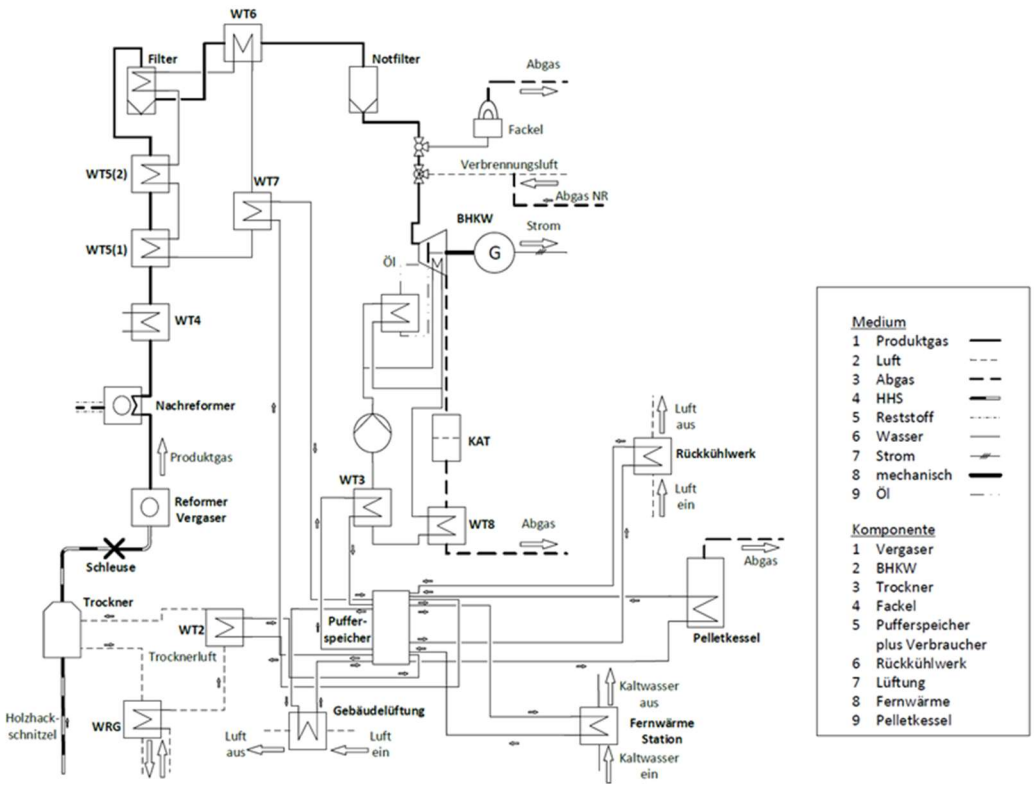


Abb. 2-33 Speicherrelevantes R&I-Fließschema der Biomasse-Vergasungs-Anlage

Tab. 2-8 Bilanzierung des Schichten-Pufferspeichers im stationären Zustand

	Komponente/Kreisl.	TVL in °C	TRL in °C	V* in m³/h	Q* in kW	Kommentar
Sommer-fahrt 02.09.2015	WT7	81,52	67,34	0,49	10,17	Von Gaskühlung.
	WT3	82,02	62,17	2,10	61,70	Von KK & WRG
	WT2 (Trockner)	79,70	70,39	1,70	-23,37	H_2O/Luft-WÜ
	Gebäudelüftung	26,37	23,24	0,00	0,00	Nur Winterbetrieb
	Fernwärmestation	46,98	45,70	0,23	-0,68	Nur Winterbetrieb
	Rückkühlwerk	80,22	46,99	1,02	-51,46	Nur Sommerbetrieb
	Summe	**5,54**		**-3,64**		Q*-Bilanzfehler
Winter-fahrt 19.02.2016	WT7	80,95	67,22	0,54	11,00	Von Gaskühlung.
	WT3	78,61	59,12	2,10	60,60	Von KK & WRG
	WT2 (Trockner)	75,30	66,42	1,70	-22,79	H_2O/Luft-WÜ
	Gebäudelüftung	33,60	26,87	1,12	-11,35	Nur Winterbetrieb
	Fernwärmestation	67,22	50,11	1,82	-46,26	Nur Winterbetrieb
	Rückkühlwerk	66,41	42,32	0,00	0,00	Nur Sommerbetrieb
	Summe	**7,28**		**-8,80**		Q*-Bilanzfehler
Mittelwert	WT7	81,24	67,28	0,52	10,56	Von Gaskühlung.
	WT3	80,32	60,65	2,10	61,45	Von KK & WRG
	WT2 (Trockner)	77,50	68,41	1,70	-23,08	H_2O/Luft-WÜ
	Gebäudelüftung	29,99	25,01	0,56	-5,86	Nur Winterbetrieb
	Fernwärmestation	57,10	47,91	1,03	-23,47	Nur Winterbetrieb
	Rückkühlwerk	73,32	44,66	0,51	-25,73	Nur Sommerbetrieb
	Summe	**6,42**		**-6,13**		Q*-Bilanzfehler

Zu erkennen ist, dass gerade im Bereich des Rückkühlwerks (RKW) ein erhebliches ungenutztes Wärmepotenzial vorhanden ist. Sogar im Winter muss, nach einer längeren Versuchsfahrt und moderaten Außentemperaturen, Wärme über das Rückkühlwerk an die Umgebung abgegeben werden. Hier verdeutlicht durch die stark erhöhten Vor- und

Rücklauftemperaturen (>T_U) am RKW im Winterbetrieb (siehe Tab. 2-8). Zu jedem Tag im Jahr können somit geringe (Winter) oder große (Sommer) Wärmemengen zurückgewonnen und über einen längeren Versuchszeitraum hinweg in einem Speicher eingespeichert werden.

Die zur Verfügung stehenden Wärmepotenziale sollen nun anlagenintern genutzt werden. Dahingehend musste sich die speicherrelevante Systemanalyse den anlageninternen Gegebenheiten zuwenden. Geprüft wurde die thermo- und fluiddynamische Integration eines Latentwärmespeichers (LWS) zur Vorwärmung des Produktgas-Kühlkreislaufes. Dieser soll, um überschüssige Wärme einer vorangegangenen Versuchsfahrt zu speichern, wie in Abb. 2-34 dargestellt in das Biomasse-Vergasungs-BHKW integriert werden. Anschließend soll diese Wärme zur Vorwärmung des Kreislaufes wiederverwendet werden.

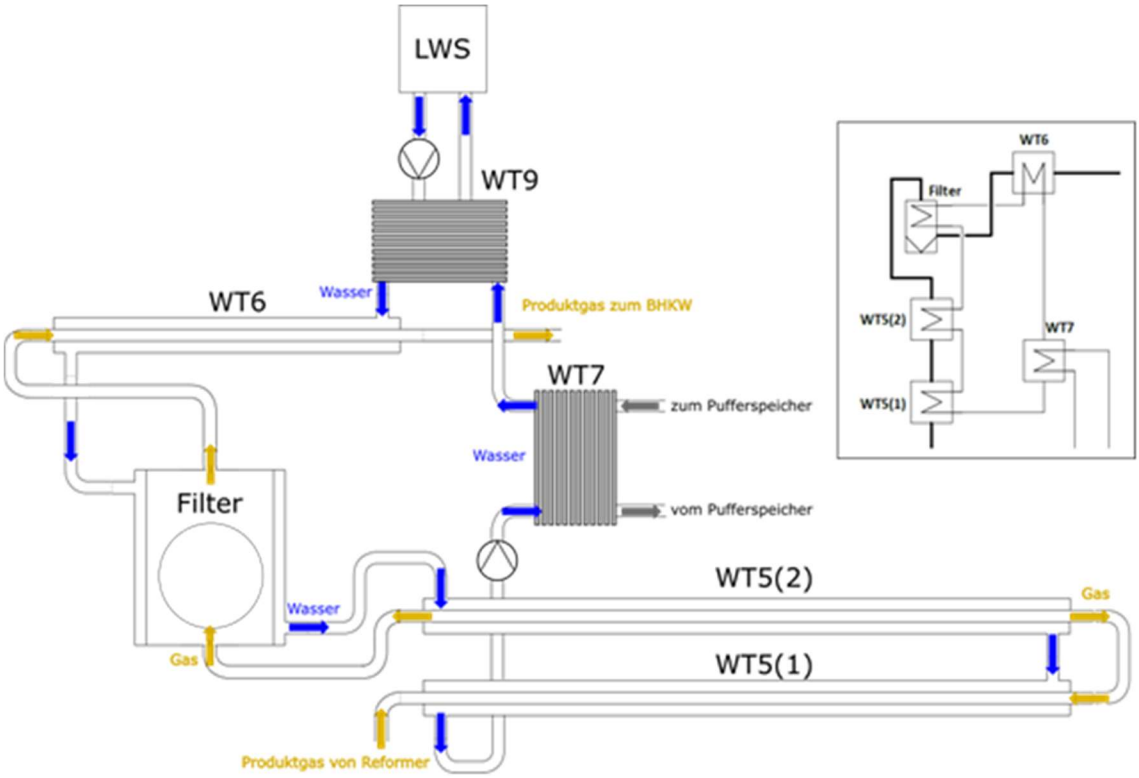


Abb. 2-34 Fließschema des Produktgas-Kühlkreislauf mit integriertem PCM-Speicherdemonstrator

Um die benötigte Wärmemenge und Leistung zu berechnen, wurden die geometrischen Abmessungen und die Massen der Komponenten und des enthaltenen Wassers ermittelt. Mit einer Simulation, welche die spezifischen Wärmekapazitäten, die Strömungsverhältnisse sowie Start- und Endtemperatur einer Vorwärmung im Kreislauf berücksichtigt, ergaben sich die in Abb. 2-35 und Abb. 2-36 dargestellten Aufwärmkurven und Wärmeleistungsbedarfe der einzelnen Komponenten.

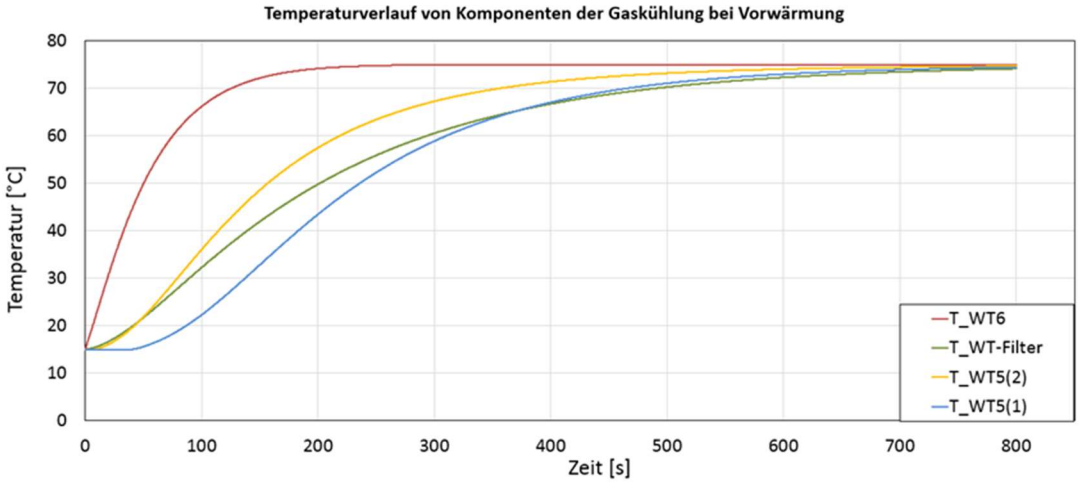


Abb. 2-35 Simulierter Temperaturverlauf von Komponenten der Gaskühlung bei Vorwärmung

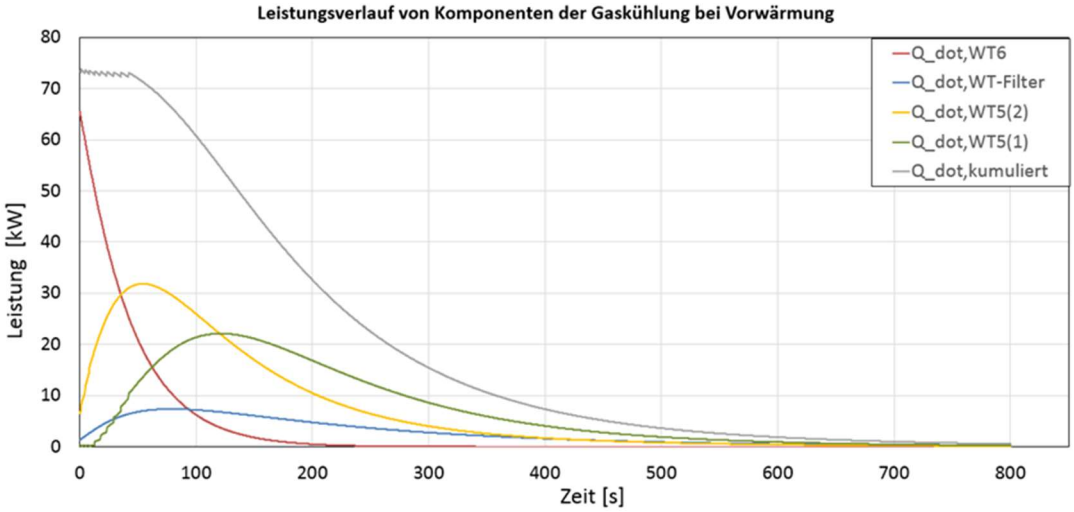


Abb. 2-36 Simulierter Verlauf des Leistungsbedarfes für Komponenten der Gaskühlung bei Vorwärmung

Dabei sollte der LWS eine Mindestbeladeleistung von 11 kW aufweisen, um eine ausreichende Gaskühlung, welche bisher über den WT7 und den nachgeschalteten Pufferspeicher gewährleistet wird, sicher zu stellen. Bei der Gesamtkapazität des Speichers muss zusätzlich die über die geplante Speicherdauer (72 h, entspricht einem Wochenende) zwangsläufig verlorengehende Wärme berücksichtigt werden. Trotz einer für den Speicher vorgesehenen Isolierung lassen sich Speicherverluste nicht gänzlich vermeiden. In Abb. 2-37 ist die Abkühlkurve für eine dem LWS ähnliche Größenordnung dargestellt. Darüber hinaus sind zum Vergleich die Abkühlung sowie die summierten Wärmeverluste eines Warmwasserspeichers mit äquivalenten Abmessungen dargestellt.

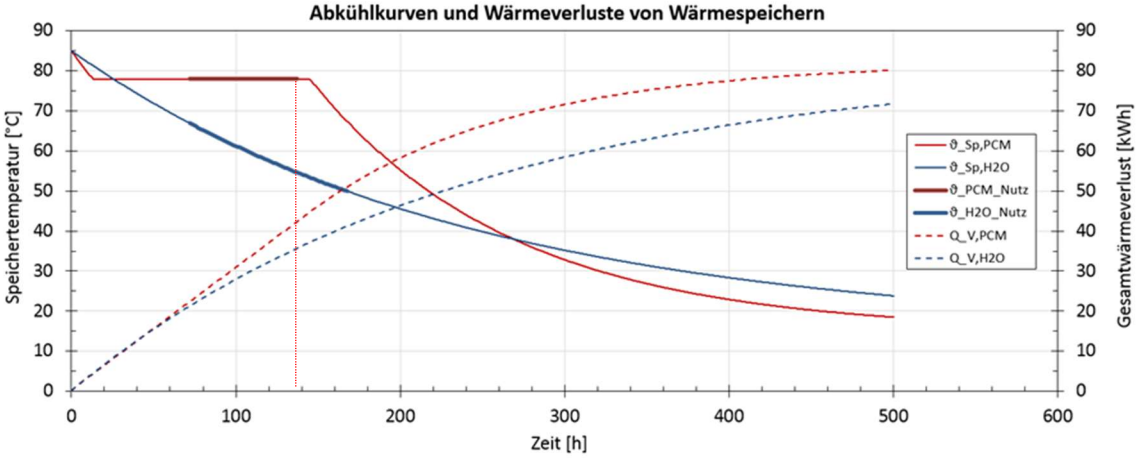


Abb. 2-37 Simulierte Abkühlkurven und Wärmeverluste von Wärmespeichern

Die der Simulation zu Grunde gelegten Randbedingungen waren folgende:

- Speicherkapazität (latente Wärme + Überhitzung) 40 kWh
- Beladetemperatur 85 °C
- Schmelztemperatur PCM (Paraffin) 78 °C
- Isolierdicke 100 mm
- Speichervolumen mit Isolierung 1,26 m³
- Umgebungstemperatur 15 °C
- Wärmeübergangskoeffizient für freie Konvektion 10 W/(m² K)

Auf Basis der Systemanalyse konnte nun das Anforderungsprofil für den LWS erstellt werden. Dieses enthält unter anderem die in Tab. 2-9 aufgeführten geforderten Parameter. Die maximal mögliche Entladeleistung ist jene Leistung, welche durch die geometrischen und fluiddynamischen (Volumenstrom, Geschwindigkeit) Eigenschaften des Produktgas-Kühlkreislaufes höchstens aufgenommen werden kann. Die Gesamtkapazität beinhaltet die latente Wärme und die sensible Wärme aus der Überhitzung des Phasenwechselmaterials (PCM) bis 80 °C. Im Fluid des Produktgaskühlkreislaufes stehen im Mittel Temperaturen um 82 °C zur Verfügung, mit denen der Speicher bis zu dieser Speichertemperatur geladen werden kann.

Tab. 2-9 Für den PCM-Speicherdemonstrator geforderte Parameter

Gesamtkapazität (inkl. Speicher-verluste)	min. Belade-leistung	max. Entlade-leistung	Speicher-temperatur	Schmelz-temperatur	Speicher-dauer
ca. 30 kWh	11 kW	73,8 kW	80 °C	70 °C	72 h

LuVo-Speicher

Mit Hilfe der in Abschnitt „Luftvorwärmung Reformer“ erläuterten Luftvorwärmstrecke soll das Systemverhalten des Biomasse-Vergasungs-BHKW auch mit einem integrierten Speicher zur zeitversetzten Luftvorwärmung untersucht werden. Mit diesem Speicher soll Wärme aus einer vorangegangenen Versuchsfahrt über Tage bevorratet werden. Die eingespeicherte Wärme dient dann der beschleunigten Startfähigkeit der Anlage. Mit dem vorgewärmten Vergasungsmittel Luft lassen sich darüber hinaus die thermochemischen Prozesse im Reformer positiv beeinflussen, sodass die Anlagenverfügbarkeit verbessert werden kann. Im laufenden Prozess wird die Vergasungsluft über die Wärmeübertrager mit Produktgas und Abgas erwärmt, was die

Prozesseffizienz im Vergaser erhöht. In Tab. 2-10 sind die benötigten Parameter des Speichers aufgeführt. Das Speichermaterial sollte für Hochtemperaturanwendungen bis 300 °C einsetzbar sein. Deshalb sollen hierfür sensible Speichermaterialien genutzt werden, wie z.B. Keramik, da diese bereits in Rekuperatoren zur Luftvorwärmung zum Einsatz kommen.

Tab. 2-10 Geforderte Parameter des LuVo-Speichers

Speicher-kapazität in kWh	Speicher-temperatur in °C	Speicher-leistung in kW	Luftmassestrom in kg/h	Speicherzeit in h
8	250	3,2	50	72

Produktgasspeicher

Die Systemanalyse zum Produktgasspeicher beinhaltete die Aufnahme und Auswertung von Volumenstromdaten des Produktgases zwischen Reformer und BHKW. Die Daten wurden dabei mit einer Staudrucksonde ermittelt und im Datenerfassungssystem aufgezeichnet. Bei der Auswertung der Werte, welche über mehrere Versuchsfahrten aufgenommen wurden, zeigte sich eine Pulsation des Produktgasvolumenstromes. Ob diese Pulsationen die Folge von Messunsicherheiten sind oder Rückkopplungen vom Kolbenmotor darstellen, wird gegenwärtig untersucht. Eine gewisse Restpulsation lässt sich bei einem derartigen Prozess jedenfalls nicht vollkommen ausschließen, selbst wenn Gegenmaßnahmen ergriffen werden. In Abb. 2-38 und Tab. 2-11 sind die Messwerte des Produktgasvolumenstromes unter Angabe diverser Schwankungsbreiten für einen 136-minütigen stationären Bereich aufgeführt.

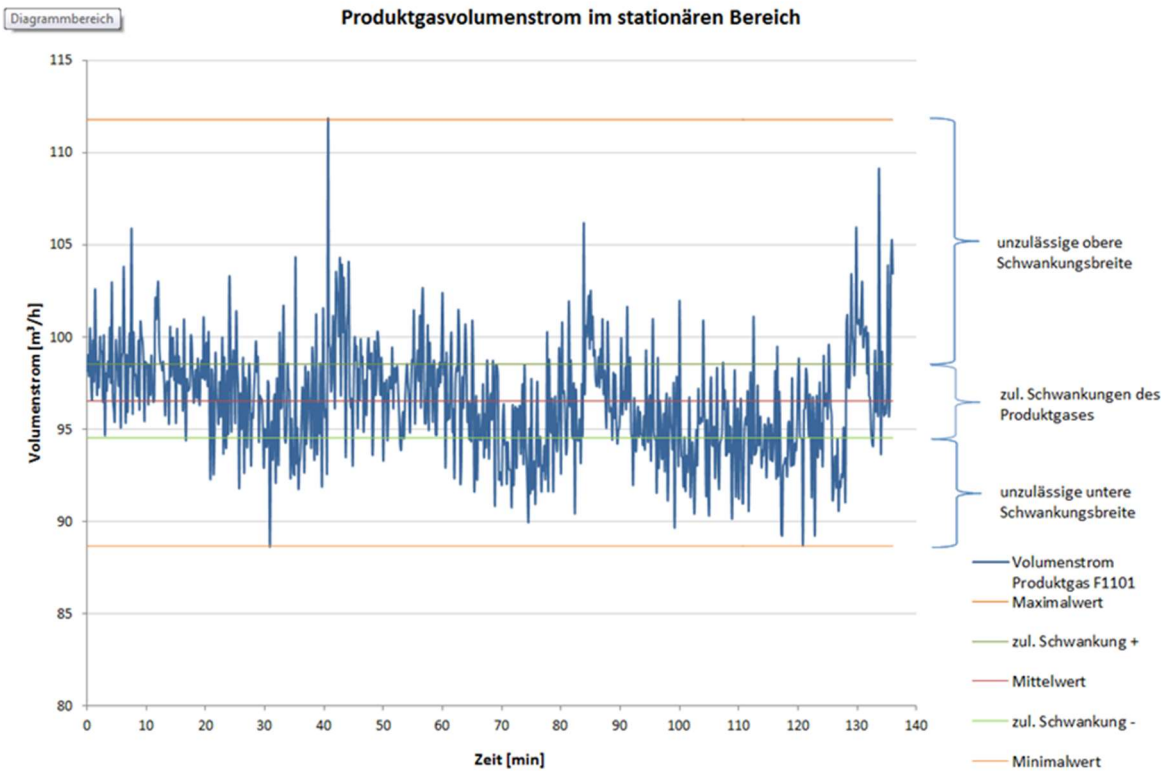


Abb. 2-38 Gemessene Produktgasvolumenstrom-Pulsation während Versuch

Tab. 2-11 Schwankungsbreiten des Produktgasvolumenstromes

Messfahrt insgesamt 136 min	Unzulässige negative Schwankung	Zulässige negative Schwankung	Mittelwert	Zulässige positive Schwankung	Unzulässige positive Schwankung
Volumenstrom in m³/h	-(7,86…2,0)	> -2,0	96,52	< +2,0	+(2,0…15,26)
Zeitl. Auftreten (Gesamtzeit) in min	35,7	68,2			32,3

Durch Reduzierung der Pulsation würde sich auch eine effizientere Lambda-Abgasregelung für das BHKW bewerkstelligen lassen. Die Lambda-Regelung misst den Restsauerstoff im Motorabgas und gibt ein Signal an die Gemischbildung aus Produktgas und Motorluft. Ist der Restsauerstoffgehalt zu hoch oder zu niedrig, wird die Zufuhr der Motorluft geregelt. So wird der Rauchgasstrom für die Nachbehandlung im Katalysator optimiert. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Reduzierung von Stickoxiden, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffverbindungen (siehe Abb. 2-39).

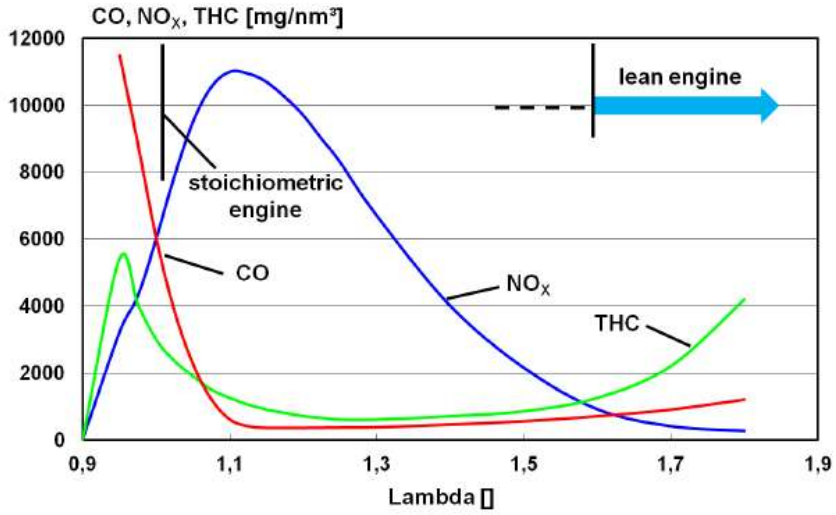


Abb. 2-39 Konzentrationen von Motorabgaskomponenten in Abhängigkeit vom Lambda-Wert und Konzeptgrenzen der NOx-Minderungsverfahren [32]

Neben den pulsationsdämpfenden Eigenschaften soll ein Produktgasspeicher zeitliche Diskrepanzen zwischen der Produktgaserzeugung und dessen Verbrauch kompensieren. Sobald der Reformer oder die Brennstofflogistik eine Störung ausweisen und kein Produktgas mehr produziert werden kann, soll der Motor aus einem Speicher gespeist werden. In Abb. 2-40 ist eine mögliche Einbindung des Gasspeichers in das R&I-Fließschema dargestellt.

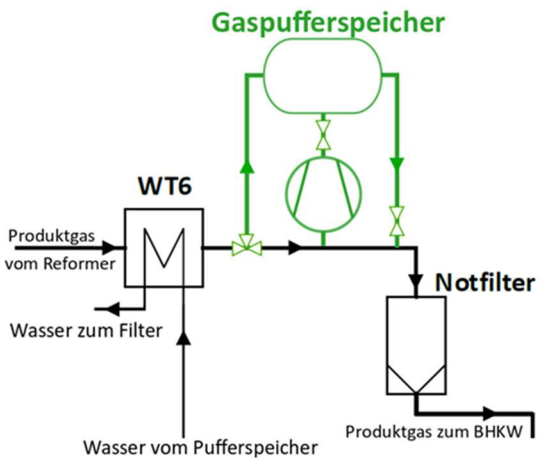


Abb. 2-40 Fließschema der Produktgasstrecke mit integriertem Gaspufferspeicher

Bei der Speicherung eines toxischen und brennbaren Gases müssen strikte Regularien hinsichtlich des Explosionsschutzes berücksichtigt werden. Diese sind in der ATEX-Richtlinie festgehalten [33]. Dazu gehören die Einhaltung von Primär-, Sekundär- und Tertiärmaßnahmen für den sicheren Umgang mit brennbaren Gasen im explosionsgefährdeten Bereich. Um dies gewährleisten zu können, mussten die Gasbestandteile (siehe Tab. 2-12) und deren spez. Zündtemperaturen und Zündgrenzen (siehe Tab. 2-13) bestimmt werden.

Tab. 2-12 Produktgasbestandteile und deren Anteil

Bestandteil	O_2	CO	CO_2	HC	CH_4	H_2	H_2O	N_2
Vol.-%	0,00	23,22	10,14	1,67	3,32	17,63	9,54	34,48

Tab. 2-13 Zündtemperaturen und Zündgrenzen der brennbaren Produktgasbestandteile

Gasbestandteil	Zündtemperatur in °C	Zündgrenzen in Vol.-% in Luft
Wasserstoff (H_2)	425-450	4…75
Ethylen (C_2H_4)	560	2,4…32,6
Methan (CH_4)	595	4,4…17
Kohlenmonoxid (CO)	620	10,9…76

Anschließend konnte die maximal zulässigen Sauerstoffgehalte im Produktgasgemisch – hier für das Beispiel Wasserstoff – festgelegt werden, die sich für die einzelnen Gaskomponenten berechnen lassen:

$$\sigma_{O_2,\max} = \frac{\left(100\% - \sigma_{H_2,\text{obere Zündgrenze}}\right) \cdot \sigma_{O_2,\text{Luft}}}{100\% \cdot f_S} = 2{,}625\%$$

Evtl. Ausfallzeiten von Reformer oder Brennstofflogistik bewegen sich bei schnellem Einschreiten meist in einem Bereich von 6 Minuten. Daher sollte der Gasspeicher den Motor über diese Zeitspanne hinweg versorgen können. Bei einem Verbrauch von 100 m³ Produktgas pro Stunde und einer Speichergröße von 0,5 m³, wie er in der Versuchshalle platzfinden würde, ergäbe das einen benötigten Speicherdruck von 20 bar. Wie in [34] dargestellt, wurde das Anforderungsprofil für den Laborgasspeicher erstellt, welcher rein dafür vorgesehen war, Erfahrungswerte bei der Produktgasspeicherung an der Anlage zu sammeln und Pulsationsdämpferversuche

durchzuführen. Die wichtigsten Parameter des Anforderungsprofiles sind in Tab. 2-14 aufgeführt.

Tab. 2-14 Für den Produktgasspeicher geforderte Parameter

Gasvolumen	Speicherdruck	max. Temperatur	max. O_2-Anteil im Produktgas	Speicherdauer
0,5 m³	20 bar	180 °C	2,623%	6 min

- Speichererprobung im Labormaßstab und Zyklentests

Rohrbündel-Latentwärmespeicher (hf)

Der Rohrbündel-Latentwärmespeicher (RB-LWS (hf)) basiert auf einem klassischen Rohrbündel-Wärmeübertrager und wurde für die Untersuchung der Wärmeübertragung in PCM-Speichern entwickelt. Mit dem Speicher wurde das Speicherverhalten für mehrere Speichervariationen untersucht. Auf Grund der Variationsmöglichkeiten der Bündelrohranordnung bekam er das Kürzel (hf=hochflexibel), da andere Rohrbündelspeicher nicht über diese Option verfügen. Bei diesen Speichern ist die Rohrbündelgeometrie fix und unlösbar mit dem Mantel verbunden/verschweißt.

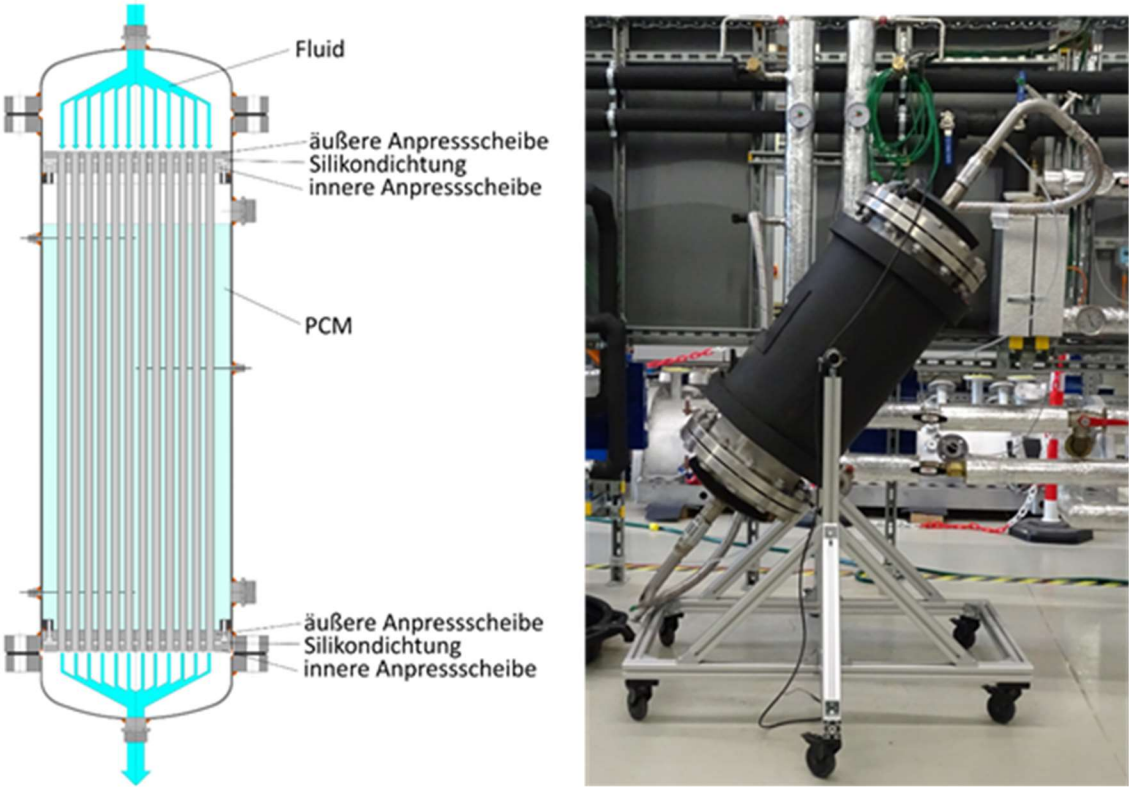


Abb. 2-41 Links: Skizze des RB-LWS (hf), Rechts: Foto des RB-LWS (hf) mit Ständerwerk

Der RB-LWS (hf) befindet sich im Kraftwerkslabor der HSZG (siehe Abb. 2-41) und wurde dort intensiv vermessen. Der Speicher beruht auf einem Abdichtungskonzept, bei dem jedes einzelne Bündelrohr in einer gelochten Silikondichtung Platz findet und durch Anpressen der Dichtung am Umfang abgedichtet wird. Jeweils eine dieser Anpress-Vorrichtungen, welche sich aus innerer und äußerer Anpressscheibe sowie Silikondichtung zusammensetzt, befindet sich an den Enden der Bündelrohre.

Gleichzeitig ist diese Vorrichtung für die Halterung der Rohre und die Abtrennung von Wärmeträgerfluid und Mantelraum (PCM-gefüllt) zuständig.

Sollen Bündelrohre entfernt werden, um z.B. die Rohrteilung zu vergrößern und damit PCM-Schichtdicken zu erhöhen, wird die Anpressung gelöst und ausgewählte Rohre durch kurze Bolzen ersetzt. Die Bolzen gewährleisten dann die Abtrennung von Fluid und PCM-Volumen innerhalb der gelochten Dichtung. Somit lassen sich bspw. die in Abb. 2-42 dargestellten Rohranordnungen realisieren. Für einen Umbau der Geometrie musste das PCM zuvor verflüssigt und ausgeschüttet werden. Unter Rühren wurde das PCM in kalten Wasser regranuliert und stand für die nächste Versuchsanordnung wieder zur Verfügung.

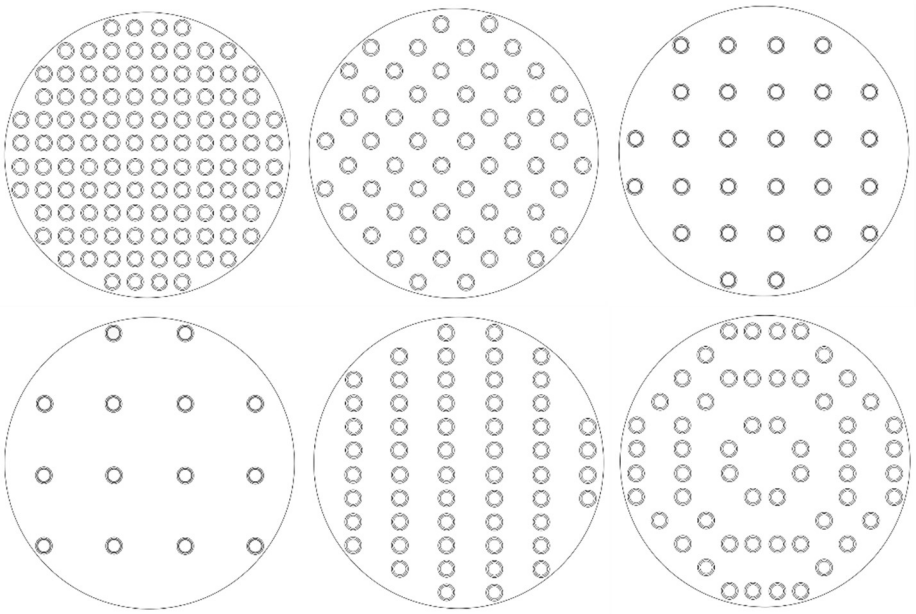


Abb. 2-42 Einige mögliche Bündelrohr-Anordnungen im RB-LWS (hf)

Die Versuche wurden für drei Rohranordnungen durchgeführt, wobei für jede die Be-und Entladung betrachtet wurde. Das PCM mit dem Schmelzpunkt bei 70 °C wurde bei der Beladung aufgeschmolzen und bis ca. 75 °C überhitzt und während der Entladung wieder mit dem Fluid Wasser auf ca. 40 °C gekühlt. Der Volumenstrom entsprach dabei mit 23 l/min dem des Kühlkreislaufes des Biomasse-Vergasungs-BHKW. Ebenso entsprach die Temperatur des Wassers bei der Beladung mit 82 °C den realen Vorgaben aus dem Kühlkreislauf.

Die drei untersuchten Rohranordnungen entsprechen den dargestellten Anordnungen in der oberen Reihe von Abb. 2-42. Diese sind die Vollberohrung mit 112 und zwei Teilberohrungen mit je 56 bzw. 28 Rohren, was PCM-Schichtdicken von 4,7; 9,2 und 15,4 mm mit sich brachte. Für jede Anordnung wurden im Schnitt drei Speicherzyklen vermessen. Dabei ist anzumerken, dass die Be- und Entladeleistung eines LWS entscheidend von der Schichtdicke des schlecht wärmeleitenden PCM abhängt. Mehr Rohre je Volumeneinheit führen also zu einer höheren Leistung – allerdings zu Lasten der Speicherkapazität (mehr Rohre = weniger PCM). Daraus ergibt sich ein Optimierungsproblem.

Für eine genaue Auswertung der Messfahrten wurden die Temperaturen des PCM an fünf prägnanten Stellen im Speicher gemessen. Dadurch konnten die Zeitpunkte für das Aufschmelzen und das Erstarren des PCM sowie die Überhitzung ermittelt werden. Die wärmetechnische Bilanzierung erfolgte über die Vor- und Rücklauftemperaturen und den

Massestrom des Wassers. Somit konnte die Speichermomentanleistung mit der folgenden Formel ermittelt werden.

$$\dot{Q}_{Sp} = \dot{m}_{Wasser}\, c_{p,Wasser} \left(T_{VL,Wasser} - T_{RL,Wasser}\right)$$

Die Messdatenauswertung ergab die in Tab. 2-15 dargestellten Speicherkapazitäten für die untersuchten Rohranordnungen und eine lineare Abhängigkeit zwischen den PCM-Schichtdicken bzw. wärmeübertragenden Flächen und der Speicherleistung für Be- und Entladung des Speichers (siehe Abb. 2-43).

Tab. 2-15 Untersuchte Rohranordnungen und deren Speicherkapazitäten im RB-LWS (hf)

Rohranordnung	PCM-Masse in kg	Speicherkapazität in kWh
Vollberohrung 112 Rohre	20,1	3,65
Teilberohrung 56 Rohre	23,5	3,12
Teilberohrung 28 Rohre	25,0	3,42

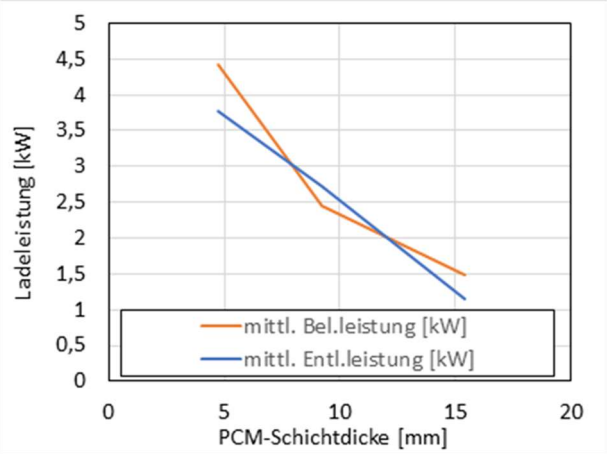


Abb. 2-43 Zusammenhang von PCM-Schichtdicke und Speicherleistung

Mit den Ergebnissen, gerade in Bezug auf die Speicherleistung, ließen sich wichtige Grundlagen für die Auslegung von derartigen Speichern eruieren. Auf deren Basis konnte die Entwicklung des für das Biomasse-Vergasungs-BHKW vorgesehenen Speichers erfolgen und wichtige Erfahrungen im Umgang mit Latentwärmespeichern gesammelt werden. Einige davon betreffen z.B. das Verhältnis von Metall- und PCM-Masse, die Stabilität der Thermoelemente, das Vertrauen in die vom Hersteller mitgegebenen Stoffwerte der PCM und die Entscheidung, ob Edelstahl- oder Kunststoffverrohrungen verwendet werden sollten.

Zyklentests

Mit den im Fraunhofer IFAM Dresden (Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung) durchgeführten Korrosionstests konnten diverse PCM/Stahl-Paarungen unter anwendungsorientierten Bedingungen hinsichtlich ihrer korrosiven Wechselwirkung untersucht werden. Dabei wurden zwei PCM (RT80HC - Fettsäure, A118 - Zuckeralkohol), ein Stahl und zwei Edelstähle verwendet (siehe Tab. 2-16). Es wurden die Stahlproben in flüssige PCM getaucht und diese mehrmals zyklisch erstarrt und aufgeschmolzen (siehe Abb. 2-44). Die Korrosionstests wurden in einer eigens dafür vorgesehenen Zyklier-Apparatur des IFAM durchgeführt [29].

Tab. 2-16 Zyklentest-Variationen (Paarungen) von Stahl und PCM

		PCM	
		RT80HC (T_{Sch}=78 °C)	PlusICE A118 (T_{Sch}=118 °C)
Behälter-material	1.0038	x	x
	1.4301	x	x
	1.4404	-	x

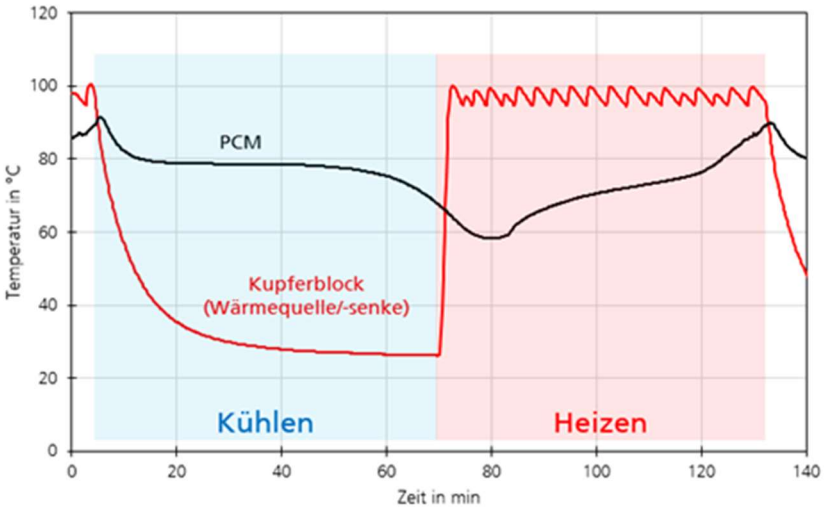


Abb. 2-44 Ein Zyklus im Temperaturverlauf (PCM RT80HC)

Man erkennt beim Abkühlen des PCM (RT80HC) in Abb. 5-12 deutlich das typische Temperaturplateau bei der Schmelztemperatur von rund 80 °C, beim Aufwärmen wird dieses Plateau durch Mischungseffekte infolge von Konvektionsströmungen nicht so gut sichtbar.

Die Stähle wurden in einer Platten- und zusätzlich in einer Kehlnahtausführung zykliert, da Schweißnähte immer besonders anfällige Stellen für Korrosion darstellen. Zur Auswertung wurden die Proben vor den Tests gewogen und fotografiert (siehe Abb. 2-45 und Abb. 2-46). Selbiges wurde nach den Korrosionsuntersuchungen durchgeführt und diese optischen und gravimetrischen Zustände verglichen.

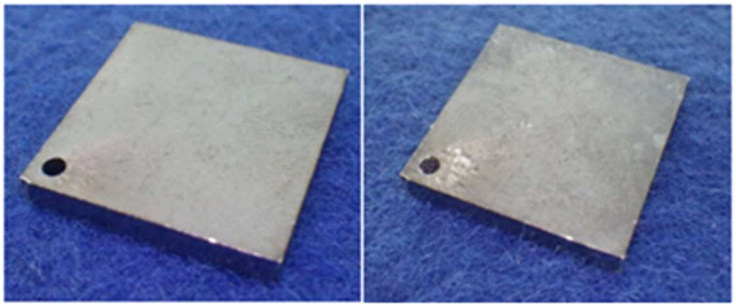


Abb. 2-45 Baustahl-Plattenprobe vor und nach dem Zyklentest

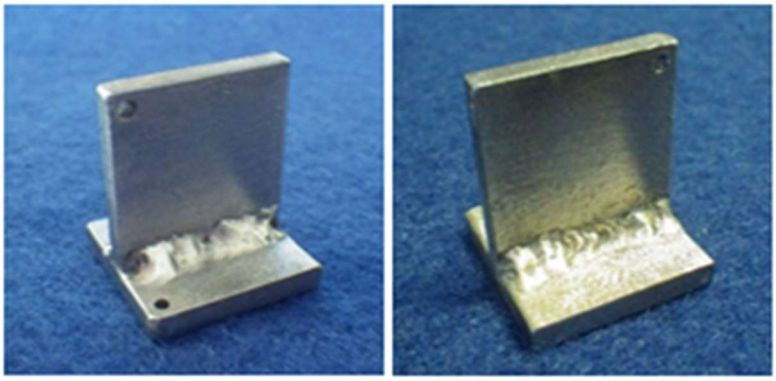


Abb. 2-46 Baustahl-Kehlnahtprobe vor und nach dem Zykliertest

Dabei konnten keine bemerkenswerten Veränderungen an den Proben festgestellt werden. Einzig leichte Verfärbungen konnten dokumentiert werden. Masseänderungen bewegten sich in einem Bereich von 0 % bis maximal 0,33 %. Somit ließ sich die Einsatzfähigkeit der Materialpaarungen für den geplanten PCM-Speicher ableiten und bestätigen.

Produktgas-Pufferspeicher

Der Produktgas-Pufferspeicher wurde für den Zweck aufgebaut, die Produktgasqualität nach einer gewissen Speicherdauer unter Druckbedingungen zu bestimmen. Ebenso wurde der Behälter als Pulsationspuffer bzw. -dämpfer in Laborversuchen verwendet. Während des Druckspeicherbetriebes wurde der Gasspeicher an die Biomasse-Vergasungs-Anlage gekoppelt und mittels Gaspumpe bis zu einem Druck von 2,0 bar mit Produktgas gefüllt. Zuvor wurde der Speicher mit Stickstoff gespült, um die Luft und den darin enthaltenen Sauerstoff zu verdrängen. Zur Vermeidung eines explosionsfähigen Gemisches sollte der Sauerstoffanteil unter 2,6 Vol.-% betragen. Nach dem der Beladevorgang abgeschlossen war, wurde der Speicher von der Anlage getrennt und für den restlichen Anlagenbetrieb sowie zwei weitere volle Tage ruhen gelassen. Weitere Ausführungen dazu sind in [29] zu finden.

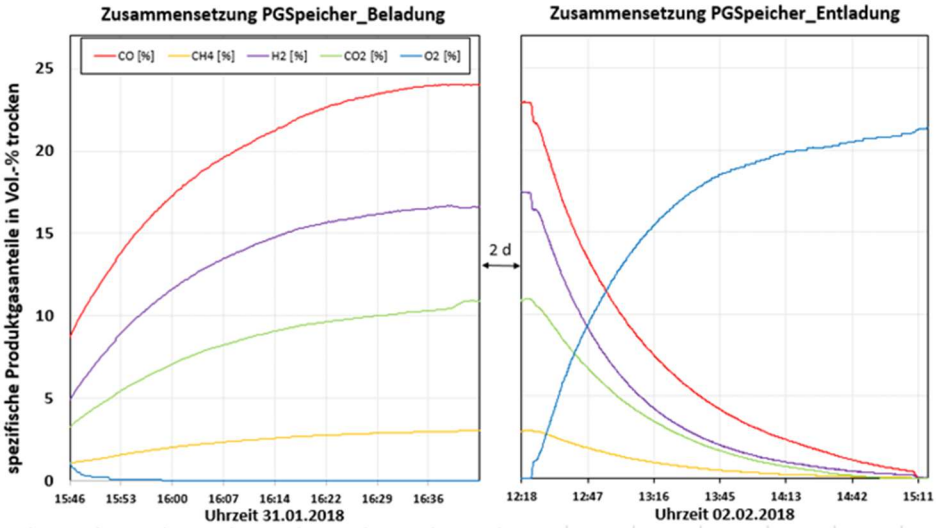


Abb. 2-47 Zeitlicher Verlauf der Gaszusammensetzung im Produktgas-Pufferspeicher während eines Versuchs am BHKW

Nach der Speicherdauer von zwei Tagen waren kaum Veränderungen in der Produktgasqualität oder dem Druck zu registrieren. Somit konnte eine grundlegende Speicherbarkeit des Produktgases nachgewiesen werden.

Für die Anwendung als Pulsationsdämpfer (Versuchsaufbau im Setup 4 siehe Abb. 2-48) wurde der Speicherbehälter in das Labor Energiesystemtechnik der HSZG transportiert. Im Labor wurden mittels Druckluft Gaspulsationen mit geringer Frequenz erzeugt und durch den Speicherbehälter hindurch geleitet. Dabei wurden verschiedene Setups und Ventilstellungen (Einbringen von Druckverlusten in das System) kombiniert, um den optimalen Dämpfungseffekt zu erzielen. Für die Versuche wurde Luft als Gas verwendet, um Gefahren durch die Toxizität des Produktgasgemisches für diese Versuche auszuschließen.

Ausgehend vom Verhalten und der Vergleichbarkeit der Gase ist dieses Vorgehen legitim. Eine Dämpfung des Produktgasvolumenstromes soll eine möglichst gleichbleibende Quantität des Produktgases bewirken. Dies kann in Abb. 2-49 anhand der rot dargestellten Austrittsgeschwindigkeit eindrucksvoll nachvollzogen werden.

Wie viele Setups untersucht und welche Dämpfungsgrade mit diesen erzielt wurden, kann der Abb. 2-50 entnommen werden. Ob ein Dämpfungseffekt auch Auswirkungen auf die Qualität hat, wird sich erst in anwendungsorientierten Tests am Biomasse-Vergasungs-BHKW zeigen.

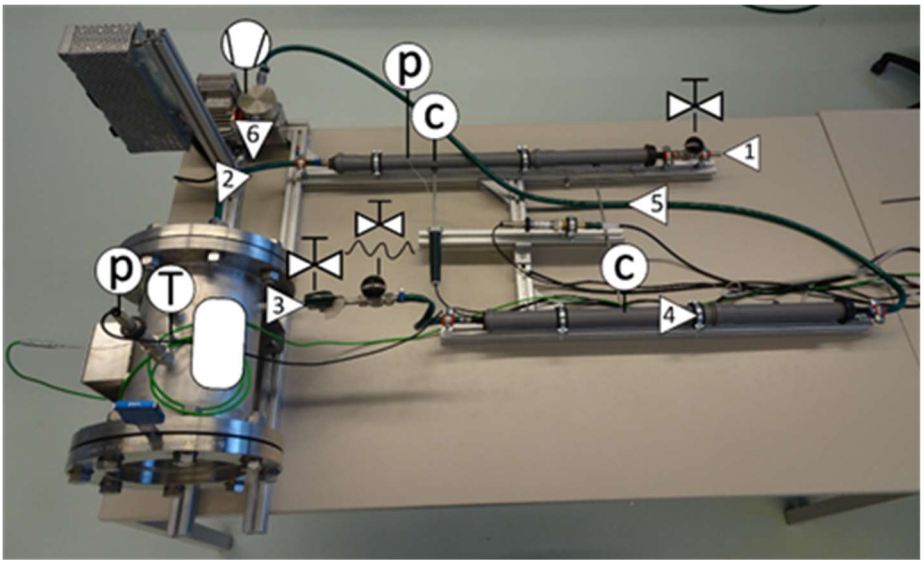


Abb. 2-48 Versuchssetup 4 des Produktgas-Pufferspeicher für Pulsationsdämpfer-Versuche (Nummerierte Pfeile stellen Strömungsverlauf da)

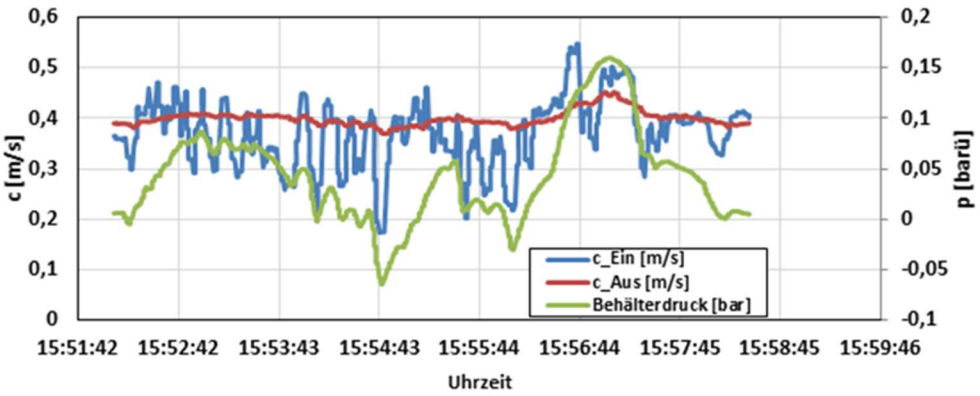


Abb. 2-49 Volumenströme und Behälterdruck während der Pulsationsdämpfungsversuche in einem Setup

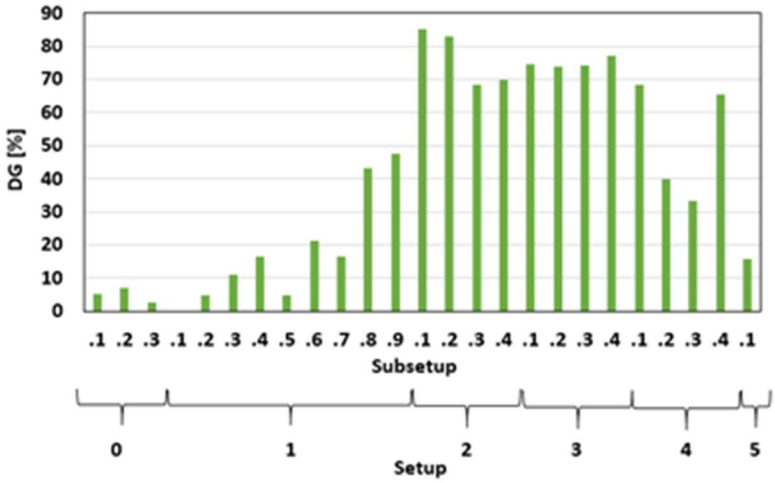


Abb. 2-50 Dämpfungsgrade (DG) der verschiedenen Pulsationsdämpfungsversuche

Aus den Ergebnissen wurden vor allem die Versuchssetups mit Behälterdurchströmung und hohen Druckverlusten als Varianten mit guten Dämpfungseigenschaften herausgearbeitet. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese auf den Anlagenbetrieb übertragen lassen. Weitere Ausführungen zu diesem Thema finden sich in [29].

- Entwicklung und Fertigung von Speicherdemonstratoren für die Integration in das Biomasse-Vergasungs-BHKW

PCM-Speicherdemonstrator

Auf Grundlage der Systemanalyse und der Laboruntersuchungen wurde im Oktober 2018 mit der Entwicklung des Speicherdemonstrators begonnen. Aus den Erkenntnissen über Wärmebedarf und -verfügbarkeit, dem Verhalten sowie dem optimalen Aufbau von PCM-Speichern und den Wechselwirkungen zwischen PCM und Speicherkonstruktionsmaterialien konnten viele wichtigen Randbedingungen für die Speicherentwicklung berücksichtigt werden.

Als Speichervariante wurde ein U-Rohr-Wärmeübertrager in einem nach oben offenen Behälter mit rechteckiger Grundfläche ausgewählt. Diese Variante gewährleistet lange Strömungswege innerhalb des Speicher, sodass relativ hohe Wärmeleistungen erreicht und das Wasser im Beladevorgang signifikant gekühlt werden kann. Die Rechteckform des Speichers ermöglicht eine optimale Platzausnutzung. Das Platzangebot in der Versuchshalle des Biomasse-Vergasungs-BHKW ist so eingeschränkt, dass der Speicher in zwei Modulen gefertigt werden musste, um an seinen Aufstellort in der Halle transportiert werden zu können. Dieser Umstand führt dazu, dass zwei verschiedene PCM-Typen mit gleicher Schmelztemperatur verwendet und verglichen werden können.

Die Skalierung der Messdaten aus den Laborversuchen auf den PCM-Speicherdemonstrator erfolgte durch lineare Übertragung der Speicherleistungen des Laborspeichers. Dafür sind die durch Biegeradien der U-Rohre festgesetzte Mindestteilung in Y-Richtung und die durch die Schweißbrennergröße bedingte Mindestteilung in X-Richtung herangezogen worden. Durch die Teilungen werden die PCM-Schichtdicken im Speicher, welche nach den Laborversuchen und der Literatur [35] ausschlaggebend für dessen Leistung sind, bestimmt. Ein Überblick zu der Skalierungsrechnung von Ergebnissen der Laborversuche (LV) auf den Speicherdemonstrator ist in Tab. 2-17 aufgeführt. Einbezogen wurden hierzu die Anforderungen aus den Lastenheften bzw. Anforderungsprofilen.

Tab. 2-17 Tabellarische Darstellung der Skalierungsrechnung und Übertragung von Laborergebnissen auf den PCM-Speicherdemonstrator

	Labor-versuch (LV)	Speicher-Demonstr. (SD)	Einheit	Formel
PCM	RT 70HC	RT 70HC / SP70	-	-
Übertragungsrohr-durchmesser	12	12	mm	d_R
Teilung in X-Richtung	19,7	27	mm	a_X
Teilung in Y-Richtung	19,7	72	mm	a_Y
PCM-Schichtdicke in X	4,7	7,5	mm	$\delta_{PCM,X} = \frac{a_X - d_R}{2}$
PCM-Schichtdicke in Y	4,7	30	mm	$\delta_{PCM,Y} = \frac{a_Y - d_R}{2}$
Leistung bezogen auf X-Richtung (Laborspeichergröße)	4,42	2,77	kW	$\dot{Q}_{X,SD} = \dot{Q}_{X,LS,} \frac{\delta_{PCM,X,LV}}{\delta_{PCM,X,SD}}$
Leistung bezogen auf Y-Richtung (Laborspeichergröße)	4,42	0,692	kW	$\dot{Q}_{Y,SD} = \dot{Q}_{Y,LS,} \frac{\delta_{PCM,Y,LV}}{\delta_{PCM,Y,SD}}$
Mittelwert Leistung (Laborspeichergröße)	4,42	1,731	kW	$\dot{Q}_m = \frac{\dot{Q}_X + \dot{Q}_Y}{2}$
Übertragungsfläche	2,533	6,876	m²	$A = l_{R,ges}\, \pi\, d_R$
Größenskalierungsfaktor	2,7143		-	$F_S = \frac{A_{SD}}{A_{LV}}$
Gesamtleistung PCM-Speicherdemonstrator	4,105 8,210		kW kW	$\dot{Q}_{SD} = \dot{Q}_m\, F_S$ $\dot{Q}_{2xSD} = 2\, \dot{Q}_m\, F_S$
Speicherkapazität (60…80 °C)	2,53	30	kWh	$\dot{Q}_{SP}$
Schmelzenthalpie	260	150	kJ/kg	Δh_{schm}
Dichte	770	770/1300	kg/m³	ρ_{PCM}
PCM-Masse	20	350/450 inkl. Sicherheit	kg	$m_{PCM,SD} = \frac{\dot{Q}_{SP,SD}}{\dot{Q}_{SP,LV}} m_{PCM,LV}$

Da in den Laborversuchen exakt die Verhältnisse (Temperatur, Massestrom und Druck) im Produktgas-Kühlkreislauf nachgebildet wurden, konnten die Ergebnisse zur Skalierung mit linearen Faktoren genutzt werden.

In der Abb. 2-51 ist der konstruierte PCM-Speicherdemonstrator in drei Darstellungsvarianten zu sehen. Hauptkomponenten des Speichers sind Ständerwerk, Behälter und Wärmeübertrager (WÜ). Der WÜ bestehend aus 114 U-Rohren und 7 rechteckigen Sammlerrohren, die das Wasser auf die U-Rohre verteilen. Behälter als auch WÜ wurden aus Edelstahl gefertigt. Dies stellt wesentlich höhere Fertigungskosten dar, welche sich aber in der Korrosionsbeständigkeit und der Resistenz gegenüber mechanischen Beanspruchungen durch die Volumenänderung des PCM beim Phasenwechsel bezahlt machen. In Abb. 2-52 ist der Speicher beim Zusammenbau im Zittauer Kraftwerkslabor zu sehen. Dabei wird der WÜ in den Behälter gehoben. Zu erkennen sind die Richtbleche, welche quer durch den WÜ verlaufen, um die Edelstahl-U-Rohre gegen die Kräfte des erstarrenden PCM in Position zu halten.

Abb. 2-51 Konstruierter PCM-Speicherdemonstrator; LINKS: Ständerwerk, WÜ, Behälter, Deckblech und Isolierung; MITTE: nur Ständerwerk und WÜ; RECHTS: ohne Isolierung

Die Temperaturerfassung wird mittels Thermoelementen sichergestellt. Dafür sind 9 Messstellen diagonal über den horizontalen Querschnitt und in drei unterschiedlichen Höhen im PCM verteilt. Die Temperatur des Wärmeträgers wird an 8 Messstellen erfasst (Eintritt, Austritt, Anfang und Ende von drei Sammlerrohren).

Abb. 2-52 Zusammenbau eines PCM-Speicherdemonstrators im Zittauer Kraftwerkslabor

Erprobt werden die zwei Module des PCM-Speicherdemonstrators im Folgeprojekt HORA (Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen). Diese können einzeln oder gemeinsam in einer Kaskadenschaltung eingesetzt werden. Der Einsatz ist in der Kaskadenschaltung vorgesehen, damit das Thermomanagement des Produktgas-Kühlkreislaufes möglichst beibehalten wird.

Produktgas-Speicherdemonstrator

Für die Entwicklung eines dauerhaft in der Anlage integrierten Speichers wurden diverse Richtlinien und Sicherheitsbestimmungen recherchiert und auf die Anwendung übertragen [36],[37],[38],[33]. Dabei wurde eine nicht zu realisierende Umsetzung festgestellt, da einige den Brand- und Personenschutz betreffende Vorschriften nicht oder nur unzureichend eingehalten werden können. Dies betrifft insbesondere die Toxizität und Brennbarkeit des Produktgases. Das Produktgas ist nach den TRGS 407 - Tätigkeiten mit Gasen- Gefährdungsbeurteilung [36] und der CLP-Verordnung [33] wie folgt in die Toxizitätsklassen einzuordnen:

Tab. 2-18 Toxizitätsklassen nach CLP- Verordnung

Kategorie der akuten Toxizität	ATE-Wertebereich in ppm(V)
Kategorie 1	(ATE ≤ 100)
Kategorie 2	(100 < ATE ≤ 500)
Kategorie 3	(500 < ATE ≤ 2500)
Kategorie 4	(2500 < ATE ≤ 20000)

Als ATE-Wert (Acute Toxicity Estimates – Schätzwert der akuten Toxizität) der Konzentration wird der Wert bezeichnet, bei dem eine akute Toxizität bei 4-stündiger inhalativer Exposition vorliegt.

$$\frac{100\ \%}{\mathrm{ATE_{mix}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{\mathrm{ATE_i}}$$

n = Anzahl der Bestandteile
C_i = Volumen-/Stoffmengenanteil von Bestandteil i in Vol.-% oder Mol.-%

Tab. 2-19 Bestandteile des Produktgases, deren Anteile und ATE- Werte

Produktgas-bestandteil	Anteil in Vol.-%	LC50 in ppm(V)	ATE in ppm(V)	Kategorie der akuten Toxizität
N_2	34,48	-	-	-
CO	23,22	3760	1300 [49]	Kategorie 3
H_2	17,63	-	-	-
CO_2	10,14	-	-	-
H_2O	9,54	-	-	-
CH_4	3,32	-	-	-
HC	1,67	-	-	-
Gesamt	100	-	5598	Kategorie 4

$$\frac{100\%}{\mathrm{ATE_{mix}}} = \frac{C_{N_2}}{\mathrm{ATE_{N_2}}} + \frac{C_{CO}}{\mathrm{ATE_{CO}}} + \frac{C_{H_2}}{\mathrm{ATE_{H_2}}} + \frac{C_{CO_2}}{\mathrm{ATE_{CO_2}}} + \frac{C_{H_2O}}{\mathrm{ATE_{H_2O}}} + \frac{C_{CH_4}}{\mathrm{ATE_{CH_4}}} + \frac{C_{HC}}{\mathrm{ATE_{HC}}}$$

$$\mathrm{ATE_{mix}} = \mathrm{ATE_{Produktgas}} = 5598\ \mathrm{ppm(V)}$$

Kohlenmonoxid ist der einzige Bestandteil im Produktgas, welcher toxisch wirksam ist. Deshalb kann für das Gasgemisch auch nur ein ATE-Wert aus dem Chemikalien-Datenblättern entnommen und eingesetzt werden. Mit einem Anteil von 5598 ppm(V) ist das Produktgas in die Toxizitätskategorie 4 einzustufen und gilt somit als gesundheitsschädlich beim Einatmen. Damit ist höchste Vorsicht beim Umgang mit dem Produktgas geboten.

Abb. 2-53 Links: GHS Piktogramm für das Produktgas - Gesundheitsschädlich bei Einatmen – Kat. 3, Rechts: GHS Piktogramm für reines Kohlenmonoxid - Giftig bei Einatmen – Kat. 4

Das Kriterium zum Ausschluss der Integration eines Produktgasspeichers sind die nicht einhaltbaren Schutzabstände zu Brandlasten nach den technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) [39]. Die betrifft in erster Linie die im TCV befindlichen Brennstofflager. Die entsprechenden Kriterien sind in Abb. 2-54, Tab. 2-20 und Abb. 2-55 dargestellt. Daher musste von einer Weiterführung der Integration eines druckaufgeladenen Produktgasspeichers abgesehen werden. Weitere Richtlinien, welche berücksichtigt wurden, sind die Betr.SichV, DGRL und die Gefahrstoffverordnung [38], [40], [37].

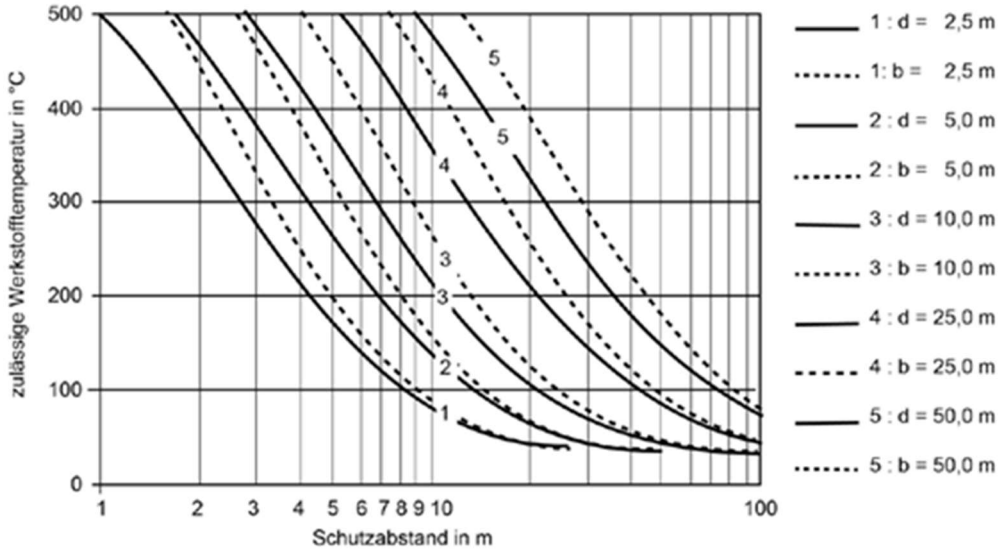


Abb. 2-54 Schutzabstand als Funktion der zulässigen Werkstofftemperatur nach TRBS

Tab. 2-20 Zulässige Werkstofftemperatur für einige Stahlsorten (für Wanddicken ≤ 16 mm) nach TRBS

Stahlsorte		Streckgrenze *K* bei Raumtemperatur in MPa	*K*/*S* (mit *S* = 1,5) in MPa	Zulässige Werkstoff-temperatur in °C
Kurzname	Werkstoffnr.			
P235GH	1.0345	235	156	289
P265GH	1.0425	265	176	290
16Mo3	1.5415	275	183	329
S235JR	1.0038	235	156	214
S355J2	1.0577	355	236	164

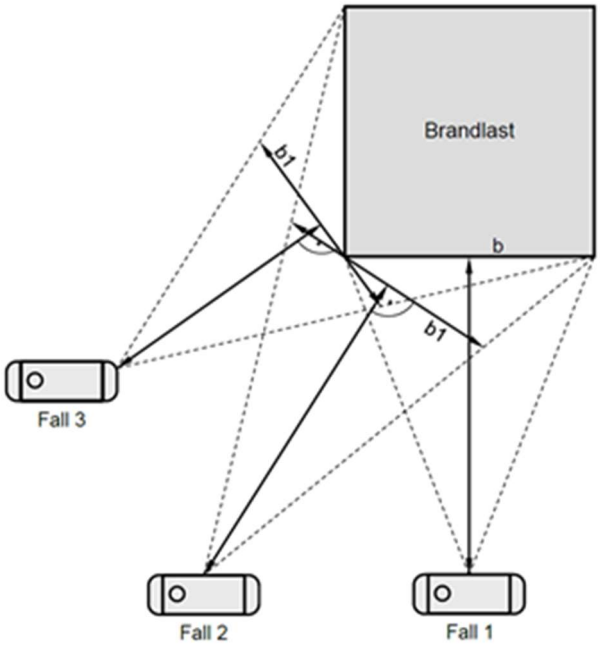


Abb. 2-55 Schutzabstand zu rechteckigen Brandlasten nach TRBS

Pulsationsdämpfer

Das Prinzip der Pulsationsdämpfung von Gasvolumenströmen soll jedoch weiterverfolgt werden. Dazu soll der Laborversuchsbehälter in die Produktgasleitung integriert und definierte Druckverluste in der Rohrstrecke erzeugt werden. Diese haben entsprechend der Ergebnisse aus den Laborversuchen eine dämpfende Wirkung auf die Pulsation des Gases. Dazu ist keine wesentliche Druckerhöhung im Behälter notwendig. Die Pulsationen sollen mittels Hochfrequenz-Drucksensor sowie dem entsprechenden Auswertegerät aufgezeichnet und beurteilt werden. Ob das Volumen des Behälters ausreichend ist, um die Laborversuche zu reproduzieren, wird im Einsatzszenario untersucht.

LuVo-Speicher

Der Speicher bietet Platz für 2 kg keramisches Speichermaterial. Dieses Material ist mit kleinen Erhebungen versehen und bietet eine wärmetechnisch optimale Umströmung in gestapelter Anordnung. Somit werden eine gleichmäßige Verteilung des Luftmassestromes und eine hohe Speicherleistung erzielt. Im Speicher finden so bis zu 200 kg keramisches Speichermaterial Platz, welches hervorragend geeignet ist, um Wärme bei einem Temperaturniveau bis 300 °C zu speichern.

Zur horizontalen Platzersparnis und Realisierung einer Bypass-Schaltung ist der Speicher in einer zweigängigen Ausführung mit Umlenkung gefertigt (siehe Abb. 2-56). Die Bypass-Schaltung wird notwendig, da während des Anlagenbetriebes nur ein Teilluftstrom zur Beladung genutzt werden soll, um die Vergasungsluft für den Vergasungsprozess nicht zu stark abzukühlen.

Zur optimalen Bilanzierung ist der LuVo-Speicher mit fünf Thermoelementen im Speichermaterial und drei im Luftstrom bestückt. Ein Differenzdrucksensor gibt Auskunft über den Druckverlust zwischen Vor- und Rücklauf. Eine Volumenstrommessung ist bereits in der Biomasse-Vergasungs-Anlage implementiert.

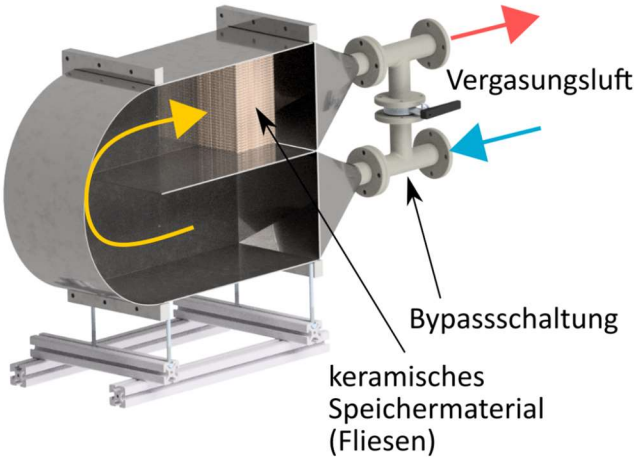


Abb. 2-56 Konstruierter LuVo-Speicher mit Erläuterungen in Schnittdarstellung

Mit der Integration dieser Speichertechnologie soll ein wesentlicher Beitrag zur besseren Verfügbarkeit und Effizienzsteigerung der Anlage geleistet werden.

4. Messkampagnen

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden ca. 70 Messfahrten mit den unterschiedlichsten Zielen durchgeführt. Exemplarisch hierfür werden nachfolgend drei Messreihen vorgestellt.

Für alle Versuchsfahrten gilt, dass zur Protokollierung alle aktuellen Messdaten (Brennstoffmasse, Temperaturen, Produktgasanalyse, Anlagenleistung etc.) im 10 s Messintervall erfasst und in einer Versuchsdatenbank gespeichert wurden. Außerdem wurden evtl. aufgetretene Anlagenstörungen, durchgeführte Probenahmen u.ä. im Logbuch protokolliert.

▪ Katalytische Vergasung

Weiterführende Informationen zur Vorgehensweise und den Ergebnissen der Versuche zur katalytischen Vergasung als im Folgenden dargestellt, können dem entsprechenden Forschungsbericht [41] entnommen werden.

Vorgehen

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

Das Biomasse-Vergasungs-BHKW wurde während der gesamten Versuche mit identischen Anlageneinstellungen betrieben, um die Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten. Hinsichtlich der Konditionierung der HHS wurden diese in der Trocknungsanlage bis auf einen Wassergehalt von ca. 7 bis 10 Ma.-% getrocknet (annähernd vergleichbar für alle Messfahrten) und außerdem die Feinanteilabtrennung nach dem Tagesbehälter blockiert, sodass alle HHS (Standard-HHS, KAT-HHS) ungesiebt dem Vergasungsprozess zugeführt wurden. Grobanteile wurden nicht entfernt.

Als Referenz wurden zu Beginn der jeweiligen MF Standard-HHS als Brennstoff eingesetzt. Für den Vergleich zwischen den Standard- und KAT-HHS wurde die jeweilige MF immer an einem Tag durchgeführt, sodass im Rahmen der MF im ersten Teil die Standard-HHS und im zweiten Teil die KAT-HHS eingesetzt wurden. Der zeitliche Bereich der Versuchsdatenauswertung wurde erst nach dem Erreichen des jeweiligen stationären Zustandes ausgewählt und nahm zwei bzw. drei Stunden ein. Die Bestimmung des stationären Zustandes erfolgte durch die Temperatur des Vergasungsmittels direkt am Eintritt des Reformers. Nach Umstellung auf die Fahrweise mit Zugabe der Katalysatoren wurde ca. zwei bis drei Stunden abgewartet und dann die Versuchsdatenauswertung wieder über zwei bzw. drei Stunden durchgeführt. Im Rahmen der zwei MF kamen drei verschiedene Katalysatormaterialen (KAT1; KAT2; KAT3) zum Einsatz. Diese Vorgehensweise und der Zeitraum der Katalysatorwirkung auf den Prozess sind beispielhaft anhand des Verlaufes der Produktgaszusammensetzung während MF3 in Abb. 2-57 dargestellt.

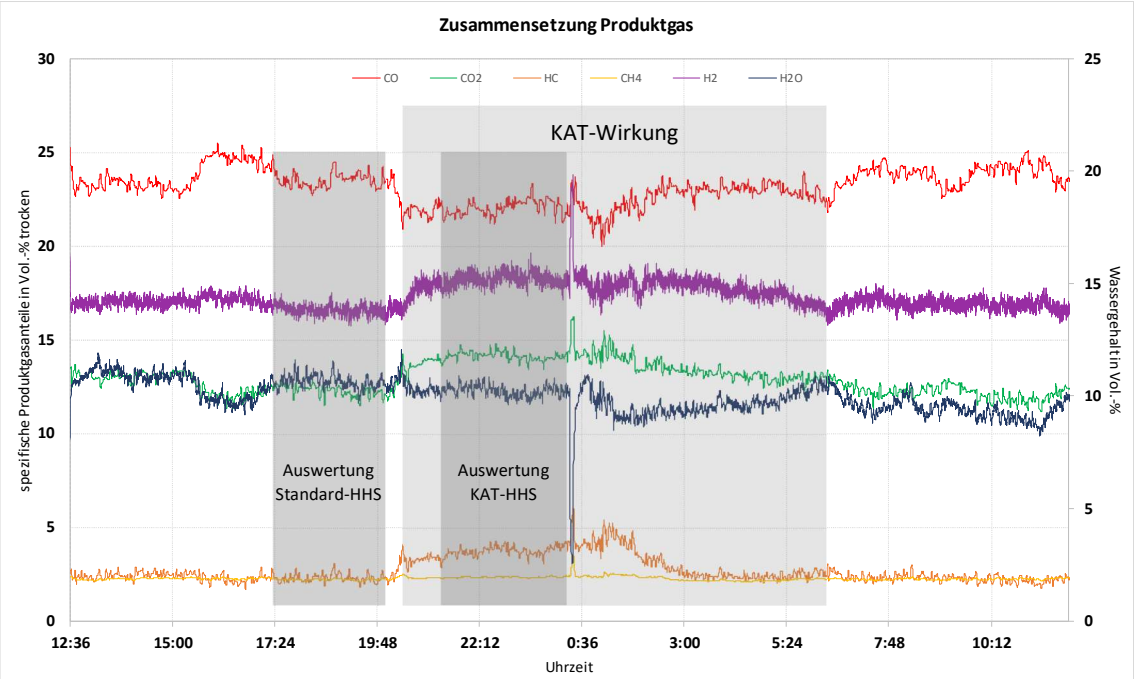


Abb. 2-57 Zusammensetzung des Produktgases während MF3 mit Kennzeichnung des Zeitraumes der KAT-Wirkung

Die Zugabeintensität der Katalysatoren betrug nach Absprache mit der Fa. GNS bei beiden MF 2 Ma.-% bezogen auf den Brennstoffinput. Die Mischung der getrockneten HHS und des Katalysators erfolgte manuell in Mischbehältern, die dann wieder dem Tagesbehälter zugegeben wurden. Die HHS wurden zuvor dem Tagesbehälter entnommen, abgewogen und die entsprechende Masse Katalysator wie beschrieben zugegeben. Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung der Produktgaszusammensetzung (CO, CO_2, H_2, CH_4, HC, O_2, H_2O) und des

Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Filterstaubanfall, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Leistung, Störungen). Außerdem wurde während der ersten MF die PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) -Beladung des Produktgases an drei verschiedenen Messstellen erfasst. Die Probenahmen und die anschließenden Analysen wurde durch die RWTH Aachen (Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER)) vorgenommen.

Darüber hinaus wurden Proben des eingesetzten Brennstoffes und des entsprechend anfallenden Filterstaubes genommen und im Labor hinsichtlich ihrer Zusammensetzung etc. analysiert. Die Anlage wurde während der MF ohne Nachreformer betrieben, sodass nur der Filterstaub direkt aus dem Gewebefilter erfasst und analysiert wurde. Dies erfolgte über eine am Gewebefilteraustrag zusätzlich installierte Feststoffschleuse, die das standardmäßig verbaute System ersetzte und somit den Nachreformer überbrückte.

Ergebnisse

Hinsichtlich des Vergleiches der Produktgasqualität bei der Vergasung der Standard-HHS und der KAT-HHS konnten v.a. signifikante Unterschiede bei den höheren Kohlenwasserstoffverbindungen (Ethen bis Propan) und beim Wasserstoff festgestellt werden. Hier stiegen die Anteile um ca. 1,5 bzw. 1,7 Vol.-% und führten somit zu einer deutlichen Erhöhung des Produktgasheizwertes, da CO und CH_4 bei den Vergleichsmessfahrten keine signifikanten Änderungen ihres Volumenanteils aufwiesen. Der bei Einsatz der KAT-HHS deutlich gesunkene Wassergehalt im Produktgas wurde der chemischen Wirkung des Katalysators zugeschrieben. Nach Aussage des Herstellers katalysiert das Material auch die Wassergasreaktion, wodurch Wasser umgesetzt wird und der Wassergehalt im Produktgas entsprechend sinkt.

Tab. 2-21 Übersicht einiger erfasster Versuchsparameter bei den Versuchen zur katalytischen Vergasung

	Einheit	Messfahrten					
Fahrweise		Stand.	KAT	Stand.	KAT	Stand.	KAT
Auswertungszeitraum	h	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Brennstoffbedarf	kg/h	29,2	28,9	29,6	29,4	28,5	29,5
Produktgastemperatur Reformeraustritt	°C	823	762	814	764	833	767
PAK-Konzentration im Produktgas, Reformeraustritt	mg/m³	140	111	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Volumenstrom Vergasungsmittel Luft	m³/h (i.N.)	38,1	37,8	38,1	37,7	38,3	38,2
Volumenstrom Produktgas	m³/h (i.N.)	73,4	69,8	73,2	69,6	71,7	69,5
Heizwert Produktgas	MJ/m³ (i.N.)	6,4	7,6	6,6	7,7	6,3	7,2
elektrische BHKW-Leistung	kW	31,1	32,0	31,9	32,3	31,8	31,9
Luftzahl		0,36	0,36	0,36	0,36	0,35	0,34

Wie in Tab. 2-21 ersichtlich, wurde allg. ein Brennstoffbedarf von ca. 28,6 bis 29,6 kg/h für den jeweiligen Auswertungszeitraum erfasst. Werden die MF Standard und KAT miteinander verglichen, ist erkennbar, dass keine Aussage zu einem ggf. steigenden oder sinkenden Brennstoffbedarf bei Einsatz der KAT getroffen werden kann.

Die Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motoreintritt wurden ebenfalls erfasst. Dabei ist in Tab. 2-21 ersichtlich, dass die Gastemperaturen bei KAT-Einsatz direkt nach dem Reformer ggü. Standard deutlich abfielen (um ca. 50 bis 60 K) und dieser Temperaturabfall sich bei den folgenden Messstellen bis hin zum Motor

immer weiter abschwächte. Dies ist u.a. mit der Temperaturspeicherwirkung der Bauteile und sich verändernden Wärmeströmen zu erklären. Der Temperaturabfall des austretenden Gases aus dem Reformer ist mit der chemischen Wirkung des Katalysatormaterials zu erklären, wodurch endotherme Reaktionen verstärkt werden.

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

Die Volumenströme des Produktgases und des zugeführten Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Im Vergleich zwischen Standard- und KAT-HHS im Rahmen der ersten MF sanken nach Tab. 2-21 die Volumenströme des Produktgases um absolut 3,6 m³/h (i.N.) (relativ 4,6 %) und der Luft um 0,3 m³/h (i.N.) (relativ 0,8 %). Der Vergleich der Daten aus der zweiten MF ergab ein Absinken der Volumenströme des Produktgases um absolut 3,6 m³/h (i.N.) (relativ 4,9 %) und der Luft um 0,4 m³/h (i.N.) (relativ 1,1 %). Hinsichtlich der MF vom 28.9.16 sanken die Volumenströme des Produktgases um absolut 2,2 m³/h (i.N.) (relativ 3,1 %) und der Luft um 0,1 m³/h (i.N.) (relativ 0,3 %).

Durch die Erfassung der Zusammensetzung und des Volumenstromes des Produktgases konnte die Produktgasleistung (entspricht dem chemischen Produktgasenergiestrom) berechnet und für die jeweiligen Versuchsphasen miteinander verglichen werden. Da der Heizwert des Produktgases beim Einsatz der KAT-HHS ggü. dem Einsatz der Standard-HHS stieg, ergab sich ein deutlich höherer chemischer Energiestrom. Die diesbezügliche Steigerung betrug absolut ca. 13 bis 17 kW (relativ ca. 10 bis 13 %). Im Vergleich der elektrischen BHKW-Leistungen stieg diese beim Einsatz der KAT-HHS absolut um 0,1 bis 0,9 kW.

Anhand der erfassten Zusammensetzung und Volumenströme des Vergasungsmittels Luft und des Brennstoffes wurde die Luftzahl der Vergasung berechnet. Dabei war kein Unterschied der Luftzahl im Vergleich Standard- und KAT-HHS festzustellen. Bei den ersten beiden MF lag dieser bei ca. 0,36 und bei MF3 bei ca. 0,34.

Bewertung

Die wesentlichen zu beobachtenden Auswirkungen des Katalysatoreinsatzes waren folgende:

- Absinken der Reaktionstemperaturen
- Steigerung des Ascheanteils im Filterstaub
- Anstieg der PAK-Beladung im Filterstaub

Darüber hinaus führte die tendenzielle Änderung der Produktgaszusammensetzung zu einer Steigerung des Produktgasheizwertes, wobei in diesem Zusammenhang die Messunsicherheiten der jeweiligen Sensoren und die Schwankungsbreite der Messdaten berücksichtigt werden müssen. Vor allem die Änderung der Produktgaszusammensetzung und als Folge dessen die Steigerung des Produktgasheizwertes bildet die Grundlage für die Bewertung des Katalysatoreinsatzes. Somit konnte tendenziell bei Zumischung der Katalysatoren mehr Brennstoffenergie in

chemisch gebundene Energie des Produktgases umgewandelt werden. Jedoch konnte das entstehende energetisch höherwertigere Produktgas nicht äquivalent im BHKW in elektrische Energie umgewandelt werden. Demzufolge sank bei Katalysatoreinsatz der Motorwirkungsgrad. Die beschriebenen Effizienzverbesserungen hinsichtlich der Vergasung wurden somit durch Effizienzverluste der internen motorischen Verbrennung aufgehoben. Die Ursachen für letzteres sind noch nicht abschließend geklärt und werden in weiterführenden Auswertungen untersucht. Diesbezüglich konnte im Rahmen der MF auch keine positive Beeinflussung der Anlagenwirtschaftlichkeit durch die Katalysatorzugabe erreicht werden.

Der Aufwand, um die möglichst homogene Mischung des Katalysatormaterials mit dem Standardbrennstoff nach vorgegebenen Mischungsverhältnis zu erreichen, war im Rahmen der Versuchsfahrten sehr hoch. Dies müsste bei einem Einsatz unter marktüblichen Bedingungen automatisiert und möglichst direkt vor dem Reformer erfolgen, um der Entmischungsgefahr entgegen zu wirken. Die automatisierte Zugabe bedingt aufgrund der zyklischen Brennstoffzufuhr einer Integration in die Anlagensteuerung. Darüber hinaus sollte die Zugabe z.B. im Bereich der Zuführschnecke erfolgen, um die Durchmischung von HHS und Katalysator zu gewährleisten.

- Parametervariationen Reformer

Weiterführende Informationen zur Vorgehensweise und den Ergebnissen der Parametervariationen als im Folgenden dargestellt, können dem entsprechenden Forschungsbericht [42] entnommen werden.

Motivation und Vorgehen

Der bei der Produktgasreinigung über einen Gewebefilter anfallende Filterstaub (als fester Rückstand des Vergasungsprozesses) ist in der Regel durch relativ hohe Kohlenstoffgehalte gekennzeichnet. Um den damit zusammenhängenden niedrigen Kohlenstoffumsetzungsgrad des Vergasungsprozesses im Reformer zu erhöhen, wurden im Rahmen der Versuche verschiedene Parameter der Reformerrostbewegung variiert und die resultierende Qualität und Quantität des Filterstaubes erfasst. Zu Grunde liegt hierfür die Annahme, dass mit verringerter Bewegungsintensität des Reformerrostes weniger Material ausgeschleust wird, dieses länger im Reaktionsraum verbleibt und weiter umgesetzt wird. In diesem Zusammenhang müsste eine Reduzierung des Kohlenstoffanteils im Filterstaub und eine Reduzierung des Brennstoffmassestroms die Folge sein. Dabei sollte der Gesamtprozess (Holzvergaser und BHKW) hinsichtlich seines Betriebsverhaltens nicht negativ beeinflusst werden. Ein weiteres Ziel der Versuche bestand darin, etwaige Grenzbereiche der Reformerrostparameter zu detektieren, bei denen noch keine negative Beeinträchtigung des Gesamtprozesses auftritt.

Als Brennstoff wurden bei allen Messfahrten Standard-Holzhackschnitzel (gleiche Charge) eingesetzt. Die vorhandene Feinanteilabsiebung in der Hackschnitzelzufuhr wurde ebenfalls bei allen Messfahrten genutzt. Hinsichtlich der Rückstände wurde der Nachreformer deaktiviert und folglich direkt der Filterstaub aus dem Gewebefilter gesammelt.

Der zeitliche Bereich der Versuchsdatenauswertung wurde erst nach dem Erreichen des jeweiligen stationären Zustandes ausgewählt und nahm bei den Messfahrten zwischen zwei und vier Stunden ein. Die Bestimmung des zeitlichen Beginns des stationären Zustandes erfolgte durch die Temperatur des Vergasungsmittels direkt am Eintritt des Reformers. Konnte eine konstante Temperatur der Luft (bei Betrieb ohne Nachreformer

ca. 235 °C) nach der Vorwärmung nachgewiesen werden, wurde von einem stationären Betrieb ausgegangen.

Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung des Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Filterstaubanfall, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Anlagenleistung, Störungen) sowie der Produktgaszusammensetzung (CO, CO_2, H_2, CH_4, O_2, H_2O).

Zuvor wurden während des Betriebes der Anlage diverse Parametersätze des Reformerrostes in relativ kurzen Zeiträumen getestet, um anhand der resultierenden Differenzdrücke über den Reformer, die für die Messfahrten zu favorisierenden Parameter auszuwählen. Der optimale Arbeitsbereich des Differenzdruckes < 65 mbar wurde gewählt, um zu große Unterdrücke in der nachfolgenden Gasleistung und damit starke Leistungsschwankungen des Motorprozesses, aufgrund der durch den Motor aufzubringenden Saugleistung, zu vermeiden. Darüber hinaus war es teilweise notwendig, die Druckverhältnisse in der Gasleitung über die Leistungsvariation des Seitenkanalverdichters für die Ansaugung des Vergasungsmittels Luft anzupassen, um die beschriebenen Unterdrücke zu vermeiden. Als Ergebnis der Testfahrt wurde ein Parametersatz ausgewählt und für die MF 4 und 5 zur Variation der Reformerrostparameter verwendet. Dies ist in Abb. 2-58 veranschaulicht. Hierbei ist erkennbar, dass mit Umstellung der Rostparameter der Differenzdruck über dem Reformer deutlich anstieg und es in Folge dessen auch zu Auswirkungen auf die BHKW-Leistung und das Reinigungsintervall des Gewebefilters kam. Ebenfalls veranschaulicht ist der Auswertungszeitraum der MF ca. 2 h nach Parameteränderung.

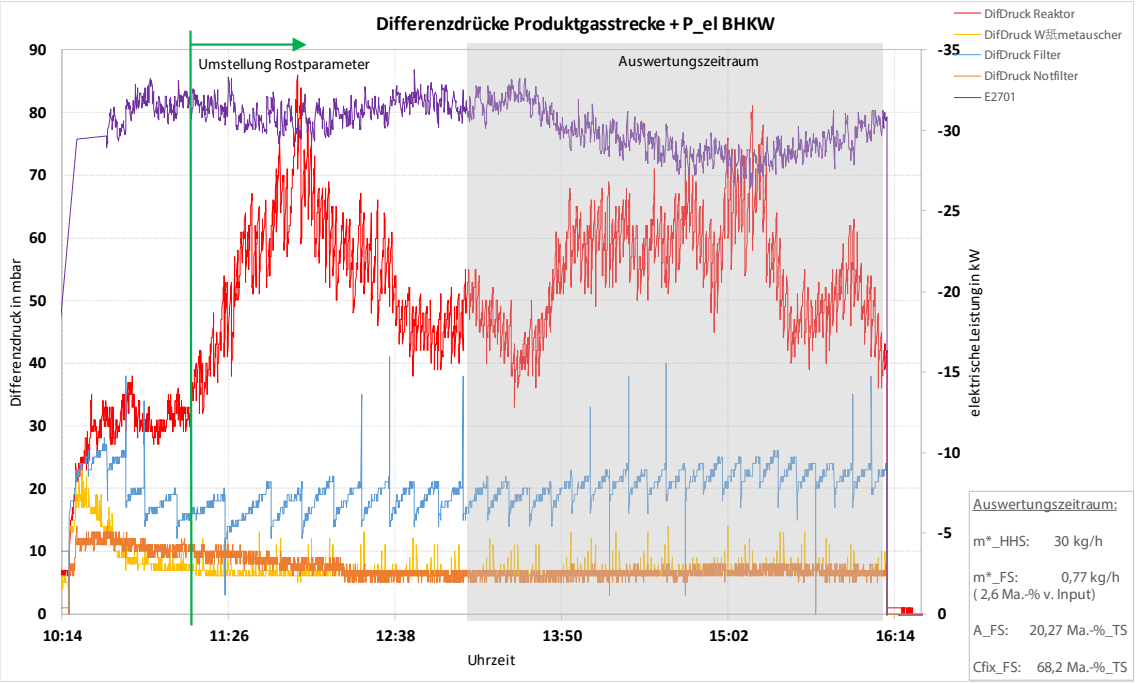


Abb. 2-58 Darstellung der Differenzdrücke und der elektrischen BHKW-Leistung sowie Kennzeichnung des Auswertungszeitraumes, MF4

In diesem Rahmen wurden verschiedene MF durchgeführt, die zusammengefasst in Tab. 2-22 mit aufgeführt sind.

Tab. 2-22 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

	Einheit	Messfahrten										
Bezeichnung		MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	MF8	MF9	MF10	MF11
Versuchsziel S…Standard V…Variation		Test	S	S	V	V	-	S	Test	V	Test	S
Versuchsdauer Gesamt	h	5,8	8,5	4,0	6,6	6,1	-	8,2	8,3	9,2	4,8	7,9
Versuchsdauer Variation	h	4,7	-	-	5,0	6,1	-	-	5,5	9,2	-	-
Auswertungs-zeitraum	h	-	2,1	2,0	3,0	4,0	-	1,5	-	4,0	-	4,0

Ergebnisse

Für die Bewertung der Rostparametervariation wurde der direkte Vergleich der Messdaten aus MF9 und MF11 vorgenommen (vgl. Tab. 2-21), da im Rahmen dieser Messfahrten keine Anlagenstörungen und damit auch keine Beeinträchtigungen der Messfahrten auftraten. Während MF9 wurde der aus der vorhergehenden Variation favorisierte Parametersatz eingesetzt, wohingegen bei MF11 die Standardparameter hinterlegt wurden. Werden die Stoff- und Energieströme der beiden Messfahrten unter Beachtung der Messunsicherheiten miteinander verglichen, ist erkennbar, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Versuchsphasen auftraten. Einzig die Druckdifferenz über den Reformer war bei veränderten Rostparametern im Durchschnitt um absolut ca. 5 mbar bzw. relativ ca. 12 % höher.

Tab. 2-23 Vergleich der Mess- und Analysedaten aus MF9 und MF11

		Einheit	Messfahrten	
Bezeichnung			MF9	MF11
Fahrweise			Variation	Standard
Auswertungszeitraum		h	4,0	4,0
Brennstoffbedarf		kg/h	28,5	30,3
Volumenstrom Vergasungsmittel		m³/h (i.N.)	36,3	35,7
Ø Druckdifferenz Reformer		mbar	40,3	35,4
Filterstaubanfall		g/h	792	794
		Ma.-%*	2,8	2,6
Filterstaub-zusammensetzung	A	Ma.-% TS	17,78	17,90
	C_{fix}	Ma.-% TS	71,1	71,3
Heizwert Produktgas		MJ/kg	5,0	5,1
Volumenstrom Produktgas		m³/h (i.N.)	70,3	72,6
Produktgasleistung		kW	106,5	111,2
Elektrische BHKW-Leistung		kW	31,7	31,1

*bezogen auf den Brennstoffbedarf

Der durch die Test- und Messfahrten bevorzugte Parametersatz eignet sich unter den angegebenen Rahmenbedingungen (Brennstoffspezifikation etc.) zum Einsatz an der Holzvergaseranlage, da keine Prozessstörungen auftraten und der sich einstellende Differenzdruck im Reformer innerhalb der vom Hersteller vorgeschriebenen Grenzen blieb. Das Ziel eines besseren Brennstoffumsatzes bei gleichzeitiger Maximierung des Ascheanteiles im ausgetragenen Filterstaub konnte nicht erreicht werden. Als Ursache hierfür wird eingeschätzt, dass sich durch die Verlängerung des Austragsintervalls das Rost zwar nicht so oft bewegt, dafür aber intensiver gedreht werden muss, um den für

den Dauerbetrieb der Anlage maximalen Differenzdruck von 65 mbar sicherzustellen. Sowohl die Austragsmenge als auch der Ascheanteil des Filterstaubes sind bei beiden Versuchsphasen nahezu identisch, woraus ebenfalls der annähernd unveränderte Brennstoffmassenstrom resultiert. Die Stoffströme wie auch der Umsatzgrad sind somit vergleichbar.

Der ermittelte Parametersatz des Reformerrostes stellt für die festgelegten Rahmenbedingungen den Grenzfall für einen stabilen Dauerbetrieb der Anlage dar.

Bewertung

Die durchgeführten Vergasungsversuche hatten den Vergleich der Auswirkungen verschiedener Betriebsparameter des Drehscheibenrostes im Reformer zum Ziel. Dabei wurde als Ergebnis erster Testmessfahrten ein Parametersatz ausgewählt, der zu einer deutlichen Minimierung des Betriebsintervalls des Drehrostes im Reformer führt. Gleichzeitig wurde durch die Rostparameter sichergestellt, dass die Druckdifferenz über dem Reformer unterhalb eines kritischen Betriebsbereiches verbleibt und somit keine Beeinträchtigung des Anlagenbetriebes auftritt.

Die Variation der Betriebsparameter des Reformerdrehrostes im Vergleich zum Einsatz der Standardparameter hat zu keinen signifikanten Veränderungen der Stoff- und Energieströme geführt.

Diese Aussage wird durch folgende Versuchsergebnisse gestützt:

- Keine Veränderung der Stoffströme Brennstoff und Filterstaub
- Keine Veränderung des Ascheanteils im Filterstaub

Im Vergleich der Versuchsphasen „Standard“ und „Variation“ konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Diese sind wie folgt:

- Keine Veränderung der Produktgasqualität
- Keine Veränderung der Stoffströme des Vergasungsmittels und des Produktgases
- Keine Veränderung der elektrischen Leistung des BHKW

Die wesentlichen zu beobachtenden Auswirkungen der Parametervariation waren folgende:

- Steigerung der Druckdifferenz über den Reformer
- Erhöhung des Unterdruckes in der Produktgasleitung vor dem BHKW

Im Rahmen der MF konnte somit durch die Parametervariation keine Erhöhung des Brennstoffumsatzgrades erreicht werden. Es konnte jedoch ein Parametersatz definiert werden, bei dem das Betriebsintervall des Drehrostes möglichst maximal ist und gleichzeitig durch diese Parameteränderung keine Beeinträchtigung des Anlagenbetriebes auftritt.

- Brennstoffvariationen

In Bezug auf die Brennstoffvariationen wurden beginnend mit dem Einsatz von HHS aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) die Qualität des Einsatzbrennstoffes variiert und die entsprechenden Prozessauswirkungen dokumentiert. Für Informationen hierzu sei auf [34] verwiesen. Die in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen zur Brennstoffvariation erfolgten mit dem Ziel, die Wirkung von Zumischungen zum Standardbrennstoff Nadelholz-Hackschnitzel (HHS) und damit die Einsatzeignung von Rest- bzw. Abfallstoffen in dem Vergasungsprozess bewerten zu können. Da die HHS mit diesen Qualitätsmerkmalen einen entsprechend hohen Marktpreis aufweisen,

werden zunehmend Brennstoffe mit geringerer Brennstoffqualität eingesetzt, um damit die Brennstoffkosten zu senken. In diesem Zusammenhang treten vermehrt Anfragen auf, ob die Vergasung von biogenen Abfall- und Reststoffen mit der vorhandenen Versuchsanlage prinzipiell möglich ist. Für die Untersuchungen wurde den HHS in einem Fall Sägewerksabfälle aus der Produktion von Mitteldichten Faserplatten (MDF) und bei einer weiteren Variation Gärrestpellets (GR) zugemischt, deren Mischungsanteil variiert und diese Brennstoffgemische anschließend dem Vergasungsprozess zugeführt.

Um die Prozessauswirkungen einer veränderten Brennstoffform zu analysieren, wurde den Versuchen der Brennstoffvariationen folgend, eine weitergehende Messfahrt mit Zumischung von DIN-Holzpellets (HP) durchgeführt. Ziel war dabei, eventuelle Änderungen des Vergasungsverhaltens allein aufgrund der veränderten Brennstoffgeometrie durch die zudosierten Brennstoffe zu erfassen.

Im Rahmen der durchgeführten Brennstoffvariationen beinhalteten die Variationen neben der Form (Fasern, Pellets) auch weitere Eigenschaften wie Elementarzusammensetzung, Aschegehalt, Asche-Schmelz-Verhalten etc.

Tab. 2-24 Elementarzusammensetzung und Heizwert der eingesetzten Brennstoffe

Brennstoff-art	N Ma.-% TS	C Ma.-% TS	H Ma.-% TS	S Ma.-% TS	O_rechn Ma.-% TS	A Ma.-% TS	Heizwert in MJ/kg
KUP-HHS	0,36	49,30	5,68	0,00	43,0	1,69	17,1
Standard-HHS	0,04	51,60	5,65	0,00	42,2	0,50	16,6
MDF-Material	5,81	48,46	5,83	0,00	39,5	0,35	17,1
Gärrest-pellets	18,58	37,92	3,88	3,42	5,2	30,97	13,2
DIN-Holzpellets	0,09	48,13	5,77	0,13	41,7	0,29	19,0

Nachdem die durchgeführten Laboranalysen (siehe Tab. 2-24) und die anschließende Brennstoffbewertung eine prinzipielle Einsatzeignung der Materialien nachwiesen, wurde entschieden, diese biogenen Reststoffe mit einem zu variierenden Anteil dem Standardbrennstoff zuzumischen. Zu beachten ist jedoch dabei der sehr hohe Ascheanteil der Gärrestpellets, der im Zusammenhang mit einer niedrigen Ascheerweichungstemperatur zu Verschlackungen im Prozess führen kann.

Abb. 2-59 zerkleinere Rückstande aus der MDF Produktion (links) und Gärrestpellets (rechts)

Im Rahmen der Messfahrten (MF) wurden die auftretenden Prozessparameter bei Zumischung dieser biogenen Rest- und Abfallstoffe mit der vorhandenen Messtechnik erfasst und ausgewertet, um anschließend die Ergebnisse mit den Referenzfahrten bei

Verwendung des Standardbrennstoffes zu vergleichen. Dabei bezog sich die Auswertung hauptsächlich auf den Vergasungsprozess, die Motorabgasemissionen sowie einer Betrachtung der entsprechenden Stoffströme (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Motorabgas), um anschließend die Wirkung der Zumischungen und damit die Einsatzeignung bewerten zu können.

Als Referenz wurden zu Beginn der jeweiligen Messfahrt die Standard-HHS als Brennstoff eingesetzt. Für den Vergleich zwischen den Standard-HHS und der Brennstoffvariation wurde die jeweilige Messfahrt immer an einem Tag durchgeführt, sodass im ersten Teil der Messfahrt der Standardbrennstoff und im zweiten Teil das Brennstoffgemisch eingesetzt wurden. Um eine Entmischung der HHS und des zugemischten Materials zu verhindern, wurde bei Einsatz der MDF-Rückstände die vorhandene Feinanteilabsiebung in der Hackschnitzelzufuhr blockiert. Der zeitliche Bereich der Versuchsdatenauswertung wurde erst nach dem Erreichen des jeweiligen stationären Zustandes ausgewählt und umfasste bei den Messfahrten ca. zwei Stunden. Die Bestimmung des zeitlichen Beginns des stationären Zustandes erfolgte durch die Temperatur des Vergasungsmittels (Messstellenbezeichnung T1206) direkt am Eintritt des Reformers. Konnte eine annähernd konstante Temperatur der Luft nach der Vorwärmung nachgewiesen werden, wurde von einem stationären Betrieb ausgegangen (siehe Abb. 2-60).

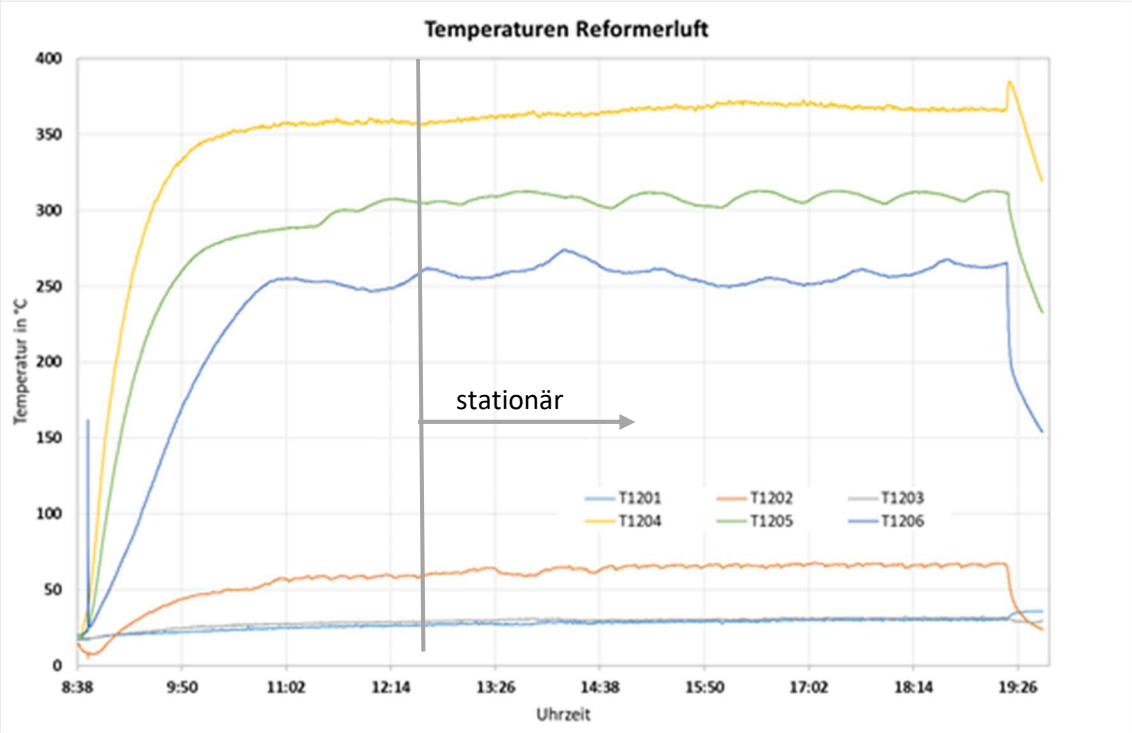


Abb. 2-60 Temperaturverläufe der Reformerluft vor dem Reformereintritt

Nach Umstellung auf die Fahrweise mit Zugabe des MDF-Materials, der Gärrestpellets und DIN-Holzpellets wurde mindestens eine Stunde abgewartet, erst dann die Versuchsdatenauswertung begonnen und diese über ca. zwei Stunden durchgeführt.

Der Mischungsanteil des MDF-Materials betrug 5 bzw. 20 Ma.-% bezogen auf das Brennstoffinput. Die Gärrestpellets wurden bei drei Messfahrten eingesetzt und jeweils zu 5, 20 bzw. 50 Ma.-% dem Standardbrennstoff zugemischt. Die DIN-Holzpellets wurden mit einem Anteil von 50 Ma.-% zudosiert.

Tab. 2-25 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten im Rahmen der Brennstoffvariationen

	Einheit	Messfahrten					
Datum		16.10.18	22.11.18	19.12.18	16.1.19	8.2.19	29.4.19
Bezeichnung		MDF1	MDF2	GR1	GR2	GR3	HP1
Startzeit	h:min	8:13	8:15	8:18	8:15	8:12	8:45
Endzeit	h:min	17:45	18:00	19:19	19:35	18:10	17:30
Versuchsdauer Ges.	h	9,53	9,75	11,02	11,33	9,17	8,75
Versuchsdauer Standard-HHS	h	5,78	6,17	7,7	6,33	6,0	6,25
Auswertung Standard-HHS	h	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0
Versuchsdauer Brst.-variation	h	3,75	3,33	3,32	3,75	3,17	2,5
Auswertung Brst.-variation	h	2,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0

Die Einstellungen der Anlagenparameter wurden bei allen Messfahrten unverändert und konstant gehalten.

Für die Bewertung der Brennstoffvariationen wurden die erfassten Prozessparameter (Stoffströme, Leistungen, Emissionen etc.) miteinander verglichen. Weiterhin wurden die Störanfälligkeit sowie das Leistungsverhalten der Anlage als weitere Bewertungskriterien betrachtet.

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

Zu beachten ist der signifikant gestiegene Brennstoffbedarf bei Einsatz der alternativen Mischungen. Mit Hilfe der Heizwerte von HHS, MDF und GR, der jeweiligen Anteile am Gemisch sowie dem erfassten Brennstoffmassenstrom wurde nun die Feuerungswärmeleistung (FWL) des Holzvergasers berechnet (vgl. Tab. 2-26). Werden neben der FWL und der elektrischen BHKW-Leistung auch die abgegebene Nutzwärme der Gesamtanlage (aus Produktgaskühlung, Motor- und Abgaskühlung) betrachtet, können die Brennstoffausnutzungsgrade berechnet werden. Diese Kennzahl gibt an, welcher Anteil der zugeführten Brennstoffenergie über den Gesamtprozess in Nutzenergien (Strom, Nutzwärme) umgewandelt wurde. Diese wurden für alle Messfahrten und Fahrweisen berechnet und sind in Tab. 2-26 aufgeführt. Einzig für die MF am 19.12.18 konnte keine entsprechende Kennzahl berechnet werden, da die thermische Leistung der Gesamtanlage nicht erfasst werden konnte.

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

Feuerungswärmeleistung sowie der gesunkenen elektrischen BHKW-Leistung und der ebenfalls gesunkenen Nutzwärmeleistung.

Da mit dem GR ein Material zugemischt wurde, dass einen deutlich niedrigeren Heizwert (13,2 MJ/kg) gegenüber den verwendeten HHS (16,6 MJ/kg) und MDF (17,1 MJ/kg) hat, sank der Heizwert des Brennstoffgemisches bei allen GR-Fahrweisen. Somit war die Feuerungswärmeleistung trotz gestiegenem Brennstoffbedarf im Vergleich zur Standardfahrweise bei den GR-Fahrweise niedriger. Da im Vergleich dazu nur ein verhältnismäßig geringer Verlust bei elektrischer BHKW-Leistung und Nutzwärmeleistung zu verzeichnen war, ist der Brennstoffausnutzungsgrad für die MF GR2 und GR3 sogar minimal (um absolut 1 bzw. 2 %) gestiegen(vgl. Tab. 2-26).

Die Zudosierung von DIN-Holzpellets (HP) hatte keinen Einfluss auf die Feuerungswärme- und BHKW-Leistung sowie dem Brennstoffausnutzungsgrad.

Tab. 2-26 Brennstoffausnutzungsgrade bei Verwendung von Standard-HHS und Brst.-variationen, Mittelwerte für Auswertungszeiträume

Datum	Fahrweise	Zugabeintensität in Ma.-%	Feuerungs-wärmeleistung in kW	Nutzwärme-leistung in kW	Brennstoff-ausnutzungs-grad in %
16.10.18	Standard	-	128,2	69,8	77
16.10.18	MDF1	5	131,2	67,8	73
22.11.18	Standard	-	122,2	68,1	80
22.11.18	MDF2	20	129,9	66,2	73
19.12.18	Standard	-	121,3	k. A.	k. A.
19.12.18	GR1	5	131,0	k. A.	k. A.
16.01.19	Standard	-	130,0	66,1	73
16.01.19	GR2	20	127,4	66,2	74
08.02.19	Standard	-	136,0	67,3	71
08.02.19	GR3	50	127,9	65,1	73
29.04.19	Standard	-	144,4	66,6	66
29.04.19	HP1	50	142,0	66,0	67

Für Anlagenbetreiber, bei denen die untersuchten Rest- und Abfallstoffe anfallen und die diese ggf. entsorgen müssen, wäre es lukrativ, einen möglichst großen Anteil an MDF bzw. GR dem Standardbrennstoff zuzumischen. Damit würden die unter Umständen anfallenden Entsorgungskosten wegfallen und sie könnten vor Ort diese Stoffe sinnvoll verwerten. Hierfür könnte ein geringer Leistungs- und Effizienzverlust der Gesamtanlage gegengerechnet werden. Wie hoch dieser sein kann, ist abhängig von den bisher anfallenden Beseitigungskosten für MDF bzw. GR.

Nicht akzeptabel für den Anlagenbetreiber sind dagegen vermehrt auftretende Betriebsstörungen, die aufgrund der Zumischungen hervorgerufen werden. Beispielhaft hierfür sind die Störungen während der MF MDF2 (Schichtenbildung im Reformer) und GR3 (Verschlackung im Reformer), deren Beseitigung einen Stillstand der Anlage über mind. 24 Stunden (Abkühlung + manuelle Entfernung) bedeuten kann. Da jedoch Zumischungen mit einer Intensität von nur 5 oder 10 Ma.-% aufgrund des zusätzlichen Aufwandes und der üblicherweise anfallenden größeren Mengen an MDF und GR nicht favorisiert werden können, liegt das Augenmerk auf Zumischungen >20 Ma.-% bei funktionierender Anlagentechnik. Diese Randbedingung hat im Rahmen der bisherigen Brennstoffvariationen nur die MF GR2 erfüllt. Hierbei konnte bei 20 %-iger Zumischung von GR ein stabiler Anlagenbetrieb nachgewiesen werden. Wobei einschränkend gilt, dass dies nur ein Kurzzeitbetrieb darstellte und längerfristig nicht sichergestellt ist, dass

der Gewebefilter die größere Filterstaubmenge ohne Störung abscheiden kann und eventuell Verschlackungen im Reformer aufgrund der relativ niedrigen Ascheerweichungstemperatur der GR nicht auftreten.

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

In Tab. 2-27 wird mit Hilfe der Ergebnisse und Erfahrungen aus den Brennstoffvariationen eine Bewertung über die prinzipielle Einsatzeignung der getesteten Rest- und Abfallstoffe abgeleitet. Diese Bewertung erfolgte unter Beachtung der aus Sicht eines Anlagenbetreibers beiden wichtigsten Kriterien:

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

Eine betriebstechnische Machbarkeit kann als Ergebnis der hier vorgestellten Messfahrten nur den jeweils 5 %-igen Zumischungen von MDF und GR sowie der 50 %-igen Zudosierung von HP zum Standardbrennstoff bescheinigt werden. Wurden die Zugabeintensitäten von MDF bzw. GR erhöht, traten vermehrt die zuvor beschriebenen Betriebsprobleme im Reformer auf.

Tab. 2-27 Bewertung der Zumischungen von MDF, GR und HP

Fahrweise	Zugabeintensität	Machbarkeit	Begründung
MDF1	5 Ma.-%	ja	Keine Störungen
MDF2	20 Ma.-%	nein	Schichtenbildung im Reformer, zu viel Feinanteil, Motorabgasemissionen
GR1	5 Ma.-%	ja	Keine Störungen
GR2	20 Ma.-%	eingeschränkt	Keine Störungen, jedoch hohe Beanspruchung Gewebefilter, Motorabgasemissionen
GR3	50 Ma.-%	nein	Verschlackung im Reformer, Motorabgasemissionen
HP1	50 Ma.-%	ja	Keine Störungen

Darüber hinaus wurden, wie in Tab. 2-28 dargestellt, für diese Fahrweisen im Motorabgas hohe Stickstoffoxidemissionen (NOx) gemessen.

Tab. 2-28 Schadstoffemissionen ohne und mit Zumischungen von MDF, GR und HP

Datum	Fahrweise	NOx in mg/m³	CO in mg/m³	CH_4 in mg/m³	SO_2 in mg/m³
16.10.18	Standard	479	43	48	3
16.10.18	MDF1	855	43	44	7
22.11.18	Standard	513	48	49	3
22.11.18	MDF2	1.747	51	38	4
19.12.18	Standard	670	48	41	28
19.12.18	GR1	721	52	44	55
16.01.19	Standard	512	48	44	11
16.01.19	GR2	1.164	62	40	108
08.02.19	Standard	524	44	43	1
08.02.19	GR3	1.640	92	42	157
29.04.19	Standard	574	48	46	5
29.04.19	HP1	599	47	48	6

Das zeitliche Intervall der Produktgasreinigung über den Gewebefilter sank aufgrund des in Verbindung mit den GR stehenden hohen Ascheeintrages in den Prozess. Inwieweit dies einen Dauerbetrieb zulässt, sollte in Langzeituntersuchungen analysiert werden.

Zusammenfassend kann als Ergebnis der Messfahrten eine Einsatzeignung der verwendeten Materialien MDF und GR als Zumischung zum Standardbrennstoff nicht bestätigt werden. Für eine Zudosierung von DIN-Holzpellets (HP) bestehen im Ergebnis der Untersuchungen keine betrieblichen Einschränkungen. Positive oder negative Einflüsse des zum Standardbrennstoff geometrisch unterschiedlichen Materials waren somit nicht nachweisbar.

Weiterführende Informationen zur Vorgehensweise und den Ergebnissen können dem entsprechenden Forschungsbericht [43] entnommen werden.

5. Motorabgasemissionen

▪ Eingesetzte Messtechnik

Neben der vorhandenen Gasmesstechnik für die Produktgasqualität steht im TCV zur Erfassung der relevanten Emissionen im Motorabgas die in Tab. 2-29 aufgeführte Messtechnik zur Verfügung.

Tab. 2-29 Übersicht der zur Verfügung stehenden Messtechnik für die Motorabgasemissionen

Messgerät	Hersteller	Messbare Emissionen	Messprinzip
Messkoffer Visit02S	Eheim Messtechnik GmbH	CO_2, O_2, CO, NO, NO_2, SO_2	IR, EC
SIDOR, OXOR-P	SICK AG	CO_2, O_2, CO, NO, SO_2	IR, PM
Oxynos 100, BINOS 100	Rosemount Inc.	O_2, CO_2	IR, PM
Gasmet DX4000	Gasmet AG (Ansyco)	u.a. CO_2, O_2, CO, NO, NO_2, SO_2, C_xH_y, CH_2O, C_6H_6, N_2O, NH_3, H_2O	FTIR, PM
Hygrophil H 4230-10	Bartec AG	H_2O	Prallstrahl-psychrometer
VE 7	J.U.M. Engineering GmbH	Gesamt-C	FID
Messkoffer SM 500	Wöhler GmbH	Gesamtstaub	gravimetrisch

- Messdaten

Im Folgenden werden beispielhaft im Rahmen von MF erfasste Motorabgasemissionen grafisch dargestellt. So sind in Abb. 2-61 der Verlauf der zu diesem Zeitpunkt messtechnisch erfassbaren Abgasanteile und -emissionen im stationären Betriebszustand dargestellt. Diese MF erfolgte noch ohne Einsatz der Abgasrezirkulation (AGR). Im Vergleich dazu dient Abb. 2-62, die den Verlauf der Motorabgasemissionen mit Einsatz der AGR und entsprechend veränderten Betriebspunkt der Motor-Lambdasteuerung darstellt. Dabei ist erkennbar, dass ein deutlich niedrigerer Restsauerstoffanteil im Motorabgas enthalten ist, der Gehalt an Kohlenstoffdioxid deutlich gestiegen ist und aufgrund der Teilrückführung des Motorabgases auch der Wassergehalt gestiegen ist. Hinsichtlich der vergleichbaren Emissionen kann festgehalten werden, dass die Stickoxidkonzentration sich fast halbiert hat und die Kohlenstoffmonoxidemission auf ca. ¼ der ursprünglichen Konzentration minimiert werden konnte. Verdeutlicht wird dies in Abb. 2-63, in der die Konzentrationen von NOx, CO und SO_2 ohne AGR gelb markiert und die entsprechenden Konzentrationen bei Einsatz der AGR ohne gelbe Markierung zum Vergleich dargestellt sind. Aufgrund der deutlichen Emissionsminderung wurden die Einstellungen zur AGR für alle MF unverändert beibehalten. Weitere Ausführungen hierzu sind im nachfolgenden Kapitel enthalten. Um den aktuellen Bereich der erreichbaren Abgasemissionen darzustellen, sind in Abb. 2-64 die über den stationären Zeitraum der letzten sechs MF gemittelten Emissionen an Stickoxiden, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Formaldehyd, Benzol, Schwefeldioxid und Ammoniak aufgeführt.

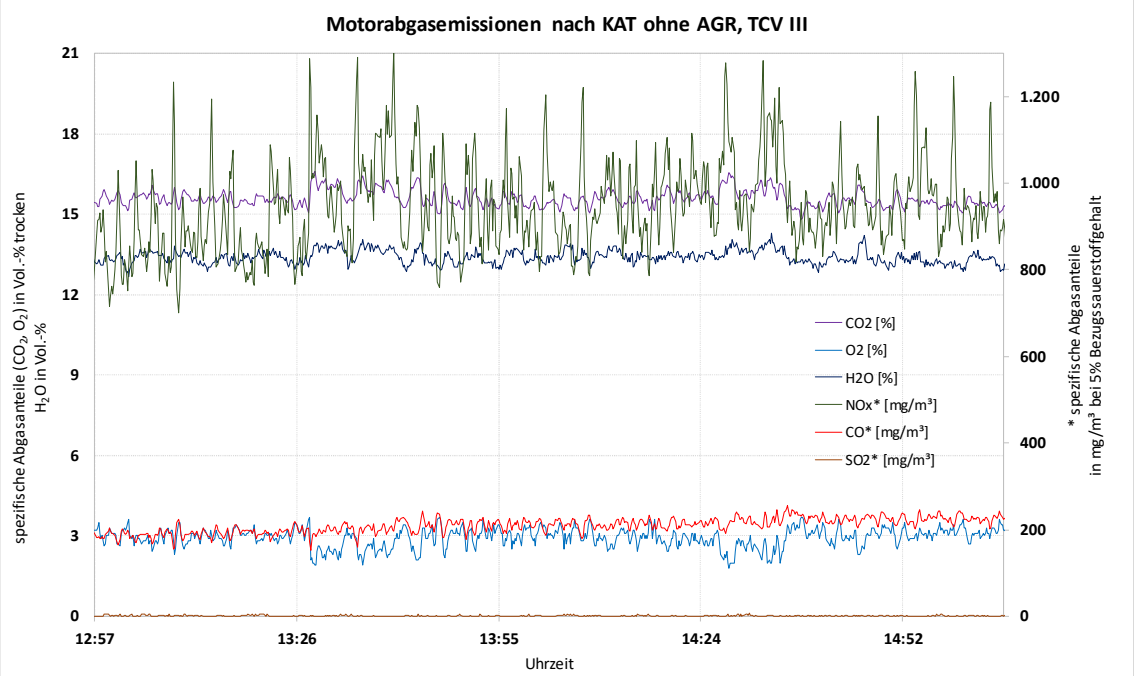


Abb. 2-61 Verlauf der Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator und ohne Abgasrezirkulation (AGR)

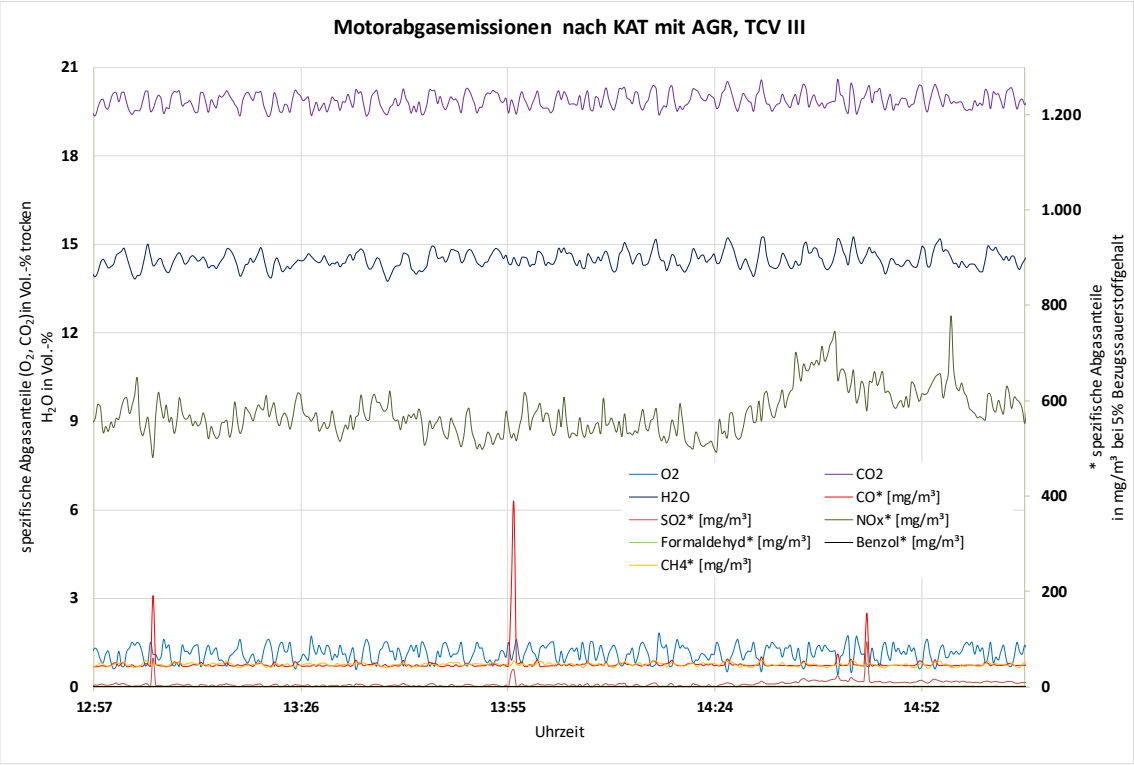
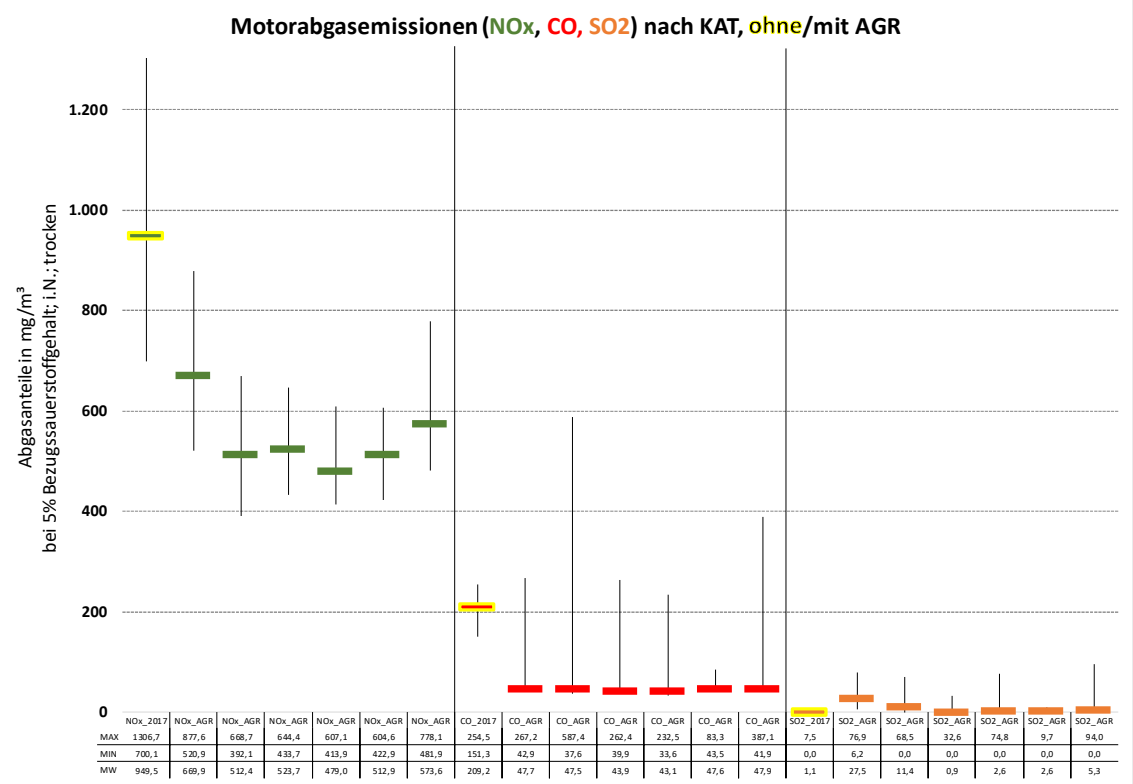
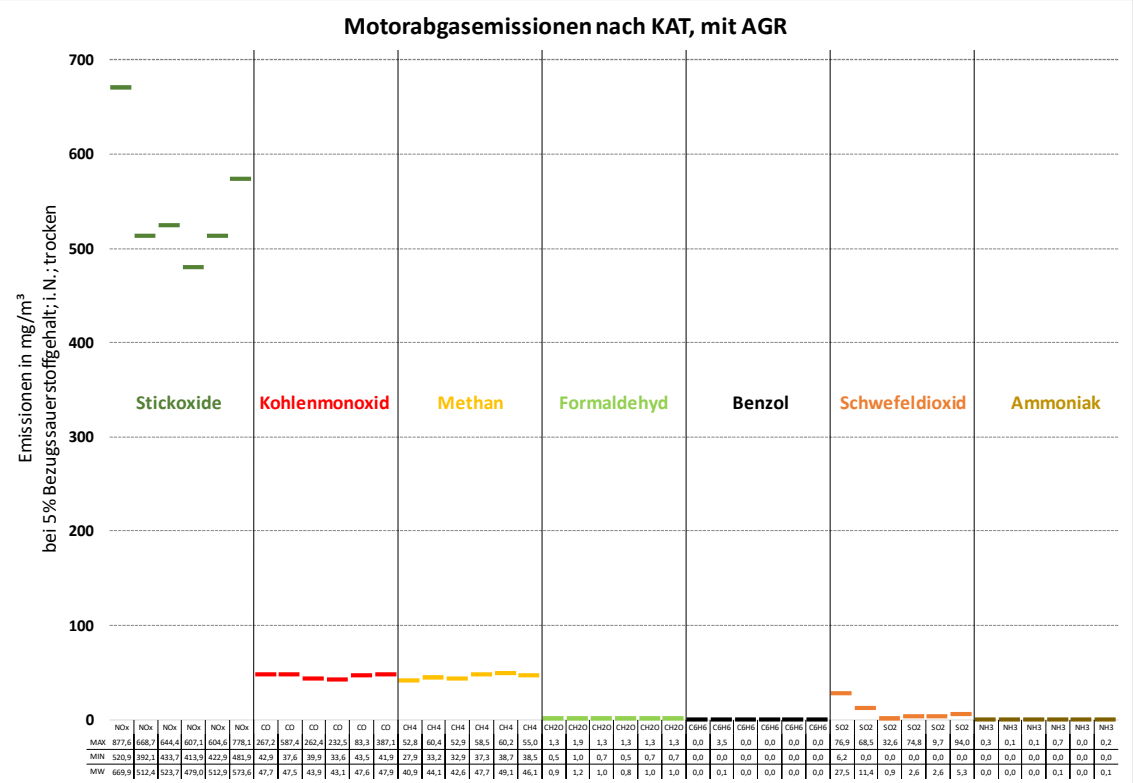


Abb. 2-62 Verlauf der Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator und mit Abgasrezirkulation (AGR)



	NOx_2017	NOx_AGR	NOx_AGR	NOx_AGR	NOx_AGR	NOx_AGR	NOx_AGR	CO_2017	CO_AGR	CO_AGR	CO_AGR	CO_AGR	CO_AGR	CO_AGR	SO2_2017	SO2_AGR	SO2_AGR	SO2_AGR	SO2_AGR	SO2_AGR	SO2_AGR
MAX	1306,7	877,6	668,7	644,4	607,1	604,6	778,1	254,5	267,2	587,4	262,4	232,5	83,3	387,1	7,5	76,9	68,5	32,6	74,8	9,7	94,0
MIN	700,1	520,9	392,1	433,7	413,9	422,9	481,9	151,3	42,9	37,6	39,9	33,6	43,5	41,9	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MW	949,5	669,9	512,4	523,7	479,0	512,9	573,6	209,2	47,7	47,5	43,9	43,1	47,6	47,9	1,1	27,5	11,4	0,9	2,6	2,6	5,3

Abb. 2-63 Vergleich der Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator ohne/mit Abgasrezirkulation (AGR)



	NOx	NOx	NOx	NOx	NOx	NOx	CO	CO	CO	CO	CO	CO	CH4	CH4	CH4	CH4	CH4	CH4	CH2O	CH2O	CH2O	CH2O	CH2O	CH2O	C6H6	C6H6	C6H6	C6H6	C6H6	C6H6	SO2	SO2	SO2	SO2	SO2	SO2	NH3	NH3	NH3	NH3	NH3	NH3
MAX	877,6	668,7	644,4	607,1	604,6	778,1	267,2	587,4	262,4	232,5	83,3	387,1	52,8	60,4	52,9	58,5	60,2	55,0	1,3	1,9	1,3	1,3	1,3	1,3	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	76,9	68,5	32,6	74,8	9,7	94,0	0,3	0,1	0,1	0,7	0,0	0,2
MIN	520,9	392,1	433,7	413,9	422,9	481,9	42,9	37,6	39,9	33,6	43,5	41,9	27,9	33,2	32,9	37,3	38,7	38,5	0,5	1,0	0,7	0,5	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MW	669,9	512,4	523,7	479,0	512,9	573,6	47,7	47,5	43,9	43,1	47,6	47,9	40,9	44,1	42,6	47,7	49,1	46,1	0,9	1,2	1,0	0,8	1,0	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	27,5	11,4	0,9	2,6	2,6	5,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1

Abb. 2-64 Darstellung ausgewählter gemittelter Motorabgasemissionen im stationären Betriebszustand nach Katalysator mit Abgasrezirkulation (AGR)

- Emissionsminderungsmaßnahmen

Durch die Beschaffung und Integration einer FTIR - Abgasemissionsmesseinrichtung konnte im Projektverlauf die Qualität und Quantität der Messdaten zu den Motorabgasemissionen deutlich gesteigert werden.

Während der Versuchsfahrten wurden die Emissionen des Motors erfasst und ausgewertet, sowie Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge zum Betriebspunkt der Gesamtanlage untersucht. Es zeigte sich, dass die Beeinflussung der Motorabgasemissionen durch den Anlagenbetriebspunkt nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Besonderheit der Anlagenkonzeption, aus anlageninterner Produktgaserzeugung und deren energetischer Verwertung führt, mit aktuell am Markt verfügbarer Steuer- und Regelungstechnik, zu nicht befriedigenden Ergebnissen bei der Minderung von insbesondere Stickoxiden.

Aufgrund der geringen Anlagenleistung (kleiner 1 MW Feuerungswärmeleistung) erfolgt die Einordnung nicht nach der 4. BImSchV, für die bindende Grenzwerte nach [11] vorgeschrieben wären. Grundsätzlich gilt dennoch das BImSchG, wonach für den Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen schädliche Umwelteinwirkungen durch Emissionsminderungsmaßnahmen nach dem Stand der Technik getroffen werden müssen. Es ist daher möglich, dass Behörden auf die erreichbaren Emissionswerte (vgl. Tab. 2-30) nach der im Dezember 2018 erschienenen VDI 3461 - Emissionsminderung Thermochemische Vergasung von Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplung - verweisen können. Ziel ist es daher, die relevanten Emissionen von Verbrennungsmotoren zu identifizieren und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, die diese maßgeblich senken.

Tab. 2-30 Erreichbare Emissionswerte (bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 % Volumenanteil) beim Einsatz von Produktgas nach VDI 3461 [28]

Motorart	Fremdzündungsmotoren (Ottomotoren)	Zündstrahlmotoren (Dieselmotoren)
Kohlenstoffmonoxid in g/m³	< 0,30	< 0,30
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid in g/m³	< 0,75[a)]	< 0,75 [a)]
Formaldehyd in mg/m³	< 10	< 10
Gesamtstaub in mg/m³	< 10	< 20
Benzol in mg/m³	< 1	< 1
Organische Stoffe, angegeben als Gesamt-C in mg/m³	< 50	< 50

a) BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung < 1 MW. Für BHKW, die einer Genehmigung nach BImSchG bedürfen (Feuerungswärmeleistung ≥ 1 MW), ist eine Emissionsbegrenzung von 0,50 g/m³ einhaltbar.

Bei der Verbrennung von Produktgas in einem Motor treten u.a. folgende Emissionen auf:

- Kohlenmonoxid (CO)
- Stickoxide (NOx)
- Benzol (C_6H_6)
- Formaldehyd (CH_2O)
- Organische Stoffe (angegeben als Gesamt-C)
- Staub

Für die Emissionen von Benzol, Formaldehyd und den organischen Stoffen (Gesamt-C) genügt im Regelfall ein überstöchiometrisch betriebener Oxidationskatalysator. In zahlreichen Versuchsfahrten wurden die Motorabgasemissionen nach Katalysator und mit Einsatz einer Abgasrezirkulation ermittelt. Für die drei genannten Schadstoffe ergibt sich folgendes Bild (Abb. 2-65).

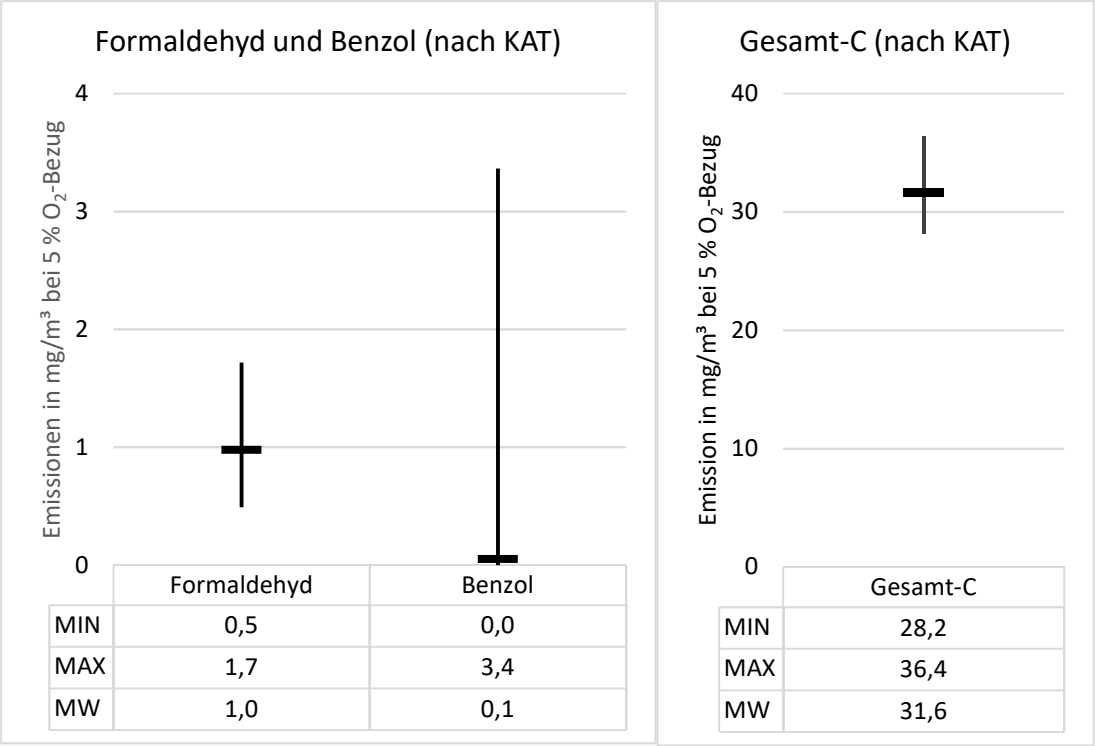


Abb. 2-65 Motorabgasemissionen nach Katalysator bei 5 % Bezugs-O_2

Wie in Abb. 2-65 zu erkennen, liegt der Mittelwert der Konzentration von Formaldehyd und Benzol jeweils etwa um den Faktor 10 unterhalb des Grenzwertes nach Tab. 2-30. Die C-Gesamt-Emissionen unterschreiten den Grenzwert von 50 mg/m³ ebenfalls deutlich. Die Staubemissionen des Motors wurden in zwei Messungen ermittelt und liegen zwischen 4 mg/m³ und 10 mg/m³, jeweils bezogen auf trockenes Abgas bei 5 Vol.- % Bezugssauerstoffgehalt. Damit wird der Grenzwert einmal unterschritten und einmal eingestellt.

Es kann festgehalten werden, dass es bei der Einhaltung der Grenzwerte von obig genannten Schadstoffen keiner weiteren Modifikation der Anlagentechnik bedarf. Für die nachfolgenden Schritte zur Behandlung von Kohlenstoffmonoxid und Stickoxiden muss jedoch darauf geachtet werden, dass keine nachteiligen Effekte auf die Komponenten erfolgen. Ein besonderes Augenmerk muss sich auf die sich indirekt proportional verhaltenden Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen richten.

Für die Entstehung von Stickoxiden sind drei Bildungsmechanismen bekannt. Bei der motorischen ist das thermisch gebildete NOx bestimmend. Dieses bildet sich aus dem Stickstoff, der mit der Verbrennungsluft dem Motor zugeführt wird bei Temperaturen ab 1300 °C, mit einem exponentiellen Anstieg für steigende Temperaturen. Für die Minderung von Stickoxiden bei motorischer Verbrennung ist die Abgasrezirkulation (AGR) ein probates Mittel um die Spitzentemperatur in der Flammenfront der Verbrennung zu senken. Es lassen sich dadurch hohe Minderungseffekte erzielen. Für den Einsatz am Motor im TCV muss jedoch beachtet werden, dass die Mischung von Verbrennungsluft und Produktgas über eine Lambdaregelung (vor Katalysator) erfolgt. Die Zumischung von rezikuliertem Abgas ist in der Anlagensteuerung nicht vorgesehen. Des Weiteren führt die anlageninterne Gaserzeugung, einhergehend mit einer schwankenden Gasqualität- und quantität zu weiteren Problemen. Eine weitere Einschränkung erfolgt durch die Sollleistungsvorgabe der BHKW-Steuerung, die einen gewissen Brennstoffenergiestrom voraussetzt. Unter der Maßgabe, dass die BHKW-Leistung konstant bleibt und dem Motorluftvolumenstrom eine gewisse Menge Abgas

beigemischt werden soll, muss die BHKW-Steuerung einen geringeren Restsauerstoffgehalt vor dem Katalysator als neuen Sollwert vorgegeben bekommen. Aktuell wird der Motor mit Luftüberschuss betrieben, wodurch ein gewisser Spielraum entsteht, gleichzeitig wird damit auch erklärt, wieso der Einsatz eines 3-Wege-Katalysators zur NOx-Reduktion nicht funktioniert, denn dieser setzt einen stöchiometrischen Betrieb voraus.

Für die Integration der AGR muss demnach der Sollwert für den Restsauerstoffgehalt vor dem Katalysator über die Vorgabe der Lambdaspannung in der BHKW-Steuerung gesenkt werden. Die hinterlegten Regelkreise sorgen jetzt allerdings dafür, dass der Produktgasvolumenstrom erhöht und der Verbrennungsluftvolumenstrom gesenkt wird, um dieses Ziel zu erreichen. Dies führt jedoch zu einer höheren BHKW-Leistung (die im Widerspruch zur Sollleistungsvorgabe steht) und erhöht die Volumenbelastung des Motors, wodurch die Temperaturen und die NOx-Emissionen weiter steigen. Es muss also parallel die Sollspannung der Lambdasonde, hin zu geringeren Restsauerstoffgehalten vor Katalysator verschoben und möglichst synchron Abgas in den Motorluftvolumenstrom eingeleitet werden. Dadurch soll vermieden werden, dass der Gasmischer das Verhältnis zwischen Verbrennungsluft und Produktgas verändert. Gelingt dies, so bleibt der Produktgasvolumenstrom nahezu konstant, wodurch die BHKW-Sollleistung gewahrt bleibt. Gleichzeitig werden geringere Restsauerstoffgehalte vor Katalysator ermöglicht. Das der Verbrennungsluft beigemischte Abgas sorgt nun für eine Senkung der Spitzentemperaturen in der Verbrennung, wodurch die thermischen NOx-Emissionen gesenkt werden können. Problematisch verhält sich hingegen das CO, da ein zu geringer Restsauerstoff vor Katalysator dafür sorgt, dass CO im Katalysator nicht mehr in CO_2 konvertiert werden kann. Der Prozess der Aktivierung der AGR ist in Abb. 2-66 grafisch dargestellt.

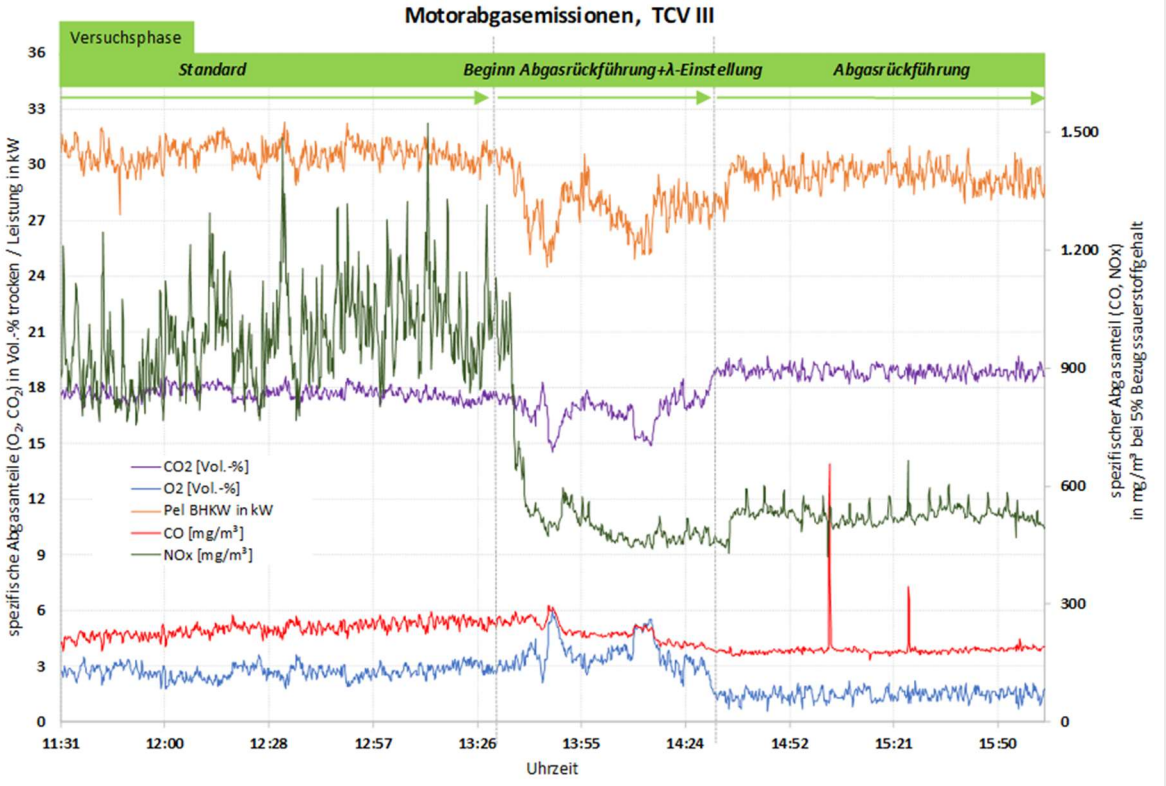


Abb. 2-66 Motorabgasemissionen vor/nach Aktivierung der Abgasrezirkulation (AGR)

In Abb. 2-66 ist zunächst der Anlagenbetrieb ohne AGR dargestellt. Die normierten NOx-Emissionen liegen bei ca. 1100 mg/m³, die CO-Emissionen bei unter 300 mg/m³, während die BHKW-Leistung etwas über 30 kW_{el} beträgt. Um etwa 13:30 Uhr beginnt der Prozess der Aktivierung und Einregelung der AGR unter Senkung der Sollwertvorgabe des Restsauerstoffs vor Katalysator sowie der zunehmenden Zudosierung von Abgas in die Motorluft. Dieser Prozess ist ca. 14:30 Uhr abgeschlossen. Im Ergebnis konnten die Emissionen für NOx um 46 % und für CO um 22 % gesenkt werden. Die Senkung der CO-Emissionen ist auf die Normierung und den nun geringeren Restsauerstoffgehalt zurückzuführen. Die BHKW-Leistung sank ebenfalls, relativ jedoch nur um 3,7 %.

Für eine längere Versuchsfahrt mit aktivierter AGR stellt sich ein typischer Verlauf wie in Abb. 2-67 ein.

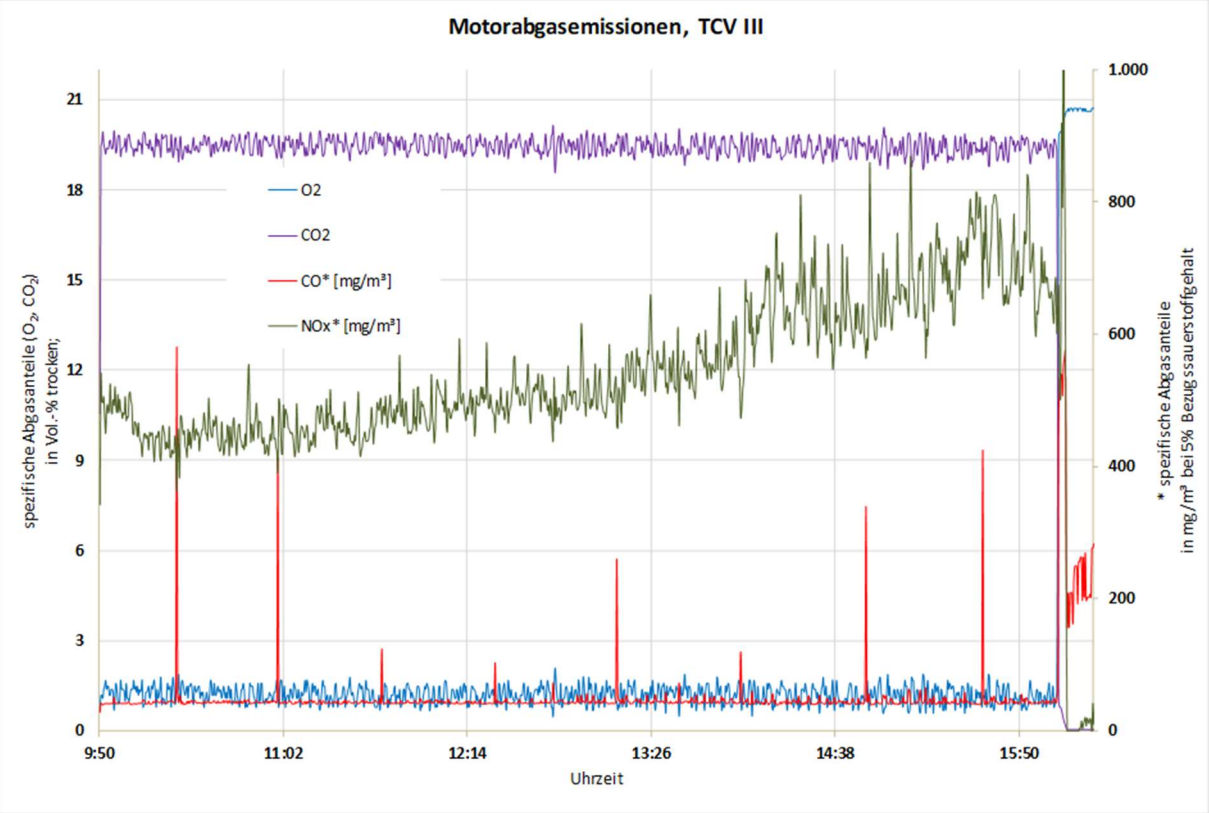


Abb. 2-67 Motorabgasmessionen nach KAT mit AGR

In Anlehnung an die erreichbaren Emissionswerte in Tab. 2-30 ergibt sich die Erkenntnis, dass die Emissionen von CO im Mittel eingehalten werden, jedoch Peaks im Zusammenhang mit der prozessinternen Abreinigung des Gewebefilters entstehen. Für die NOx-Emissionen zeigt sich, dass mit steigender Betriebsdauer der Grenzwert tendenziell überschritten wird. Eine weitere Erhöhung der Abgasrezirkulationsmenge zur Senkung der NOx-Emissionen würde die BHKW-Leistung voraussichtlich weiter senken und die Peaks der CO-Emissionen erhöhen. Aus diesem Grund wird die Abgasnachbehandlung durch eine nachgeschaltete, neu entwickelte Anlagenkomponente erweitert. Zur weiteren Senkung der NOx-Emissionen und Verminderung der CO-Peaks wurde ein Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung konzeptioniert. Eine Konstruktionszeichnung des Doppel-Kat-Systems mit Zwischenlufteindüsung ist in Abb. 2-68 und Abb. 2-69 dargestellt.

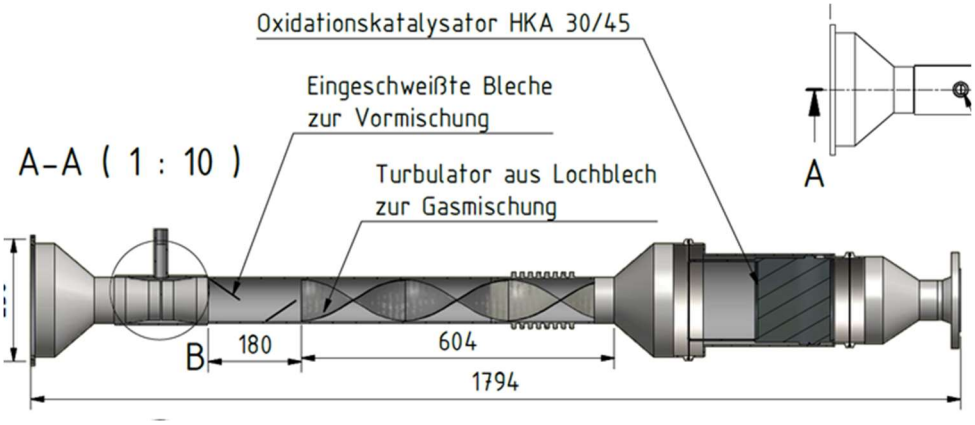


Abb. 2-68 Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung

Abb. 2-69 Doppel-Kat-System mit Zwischenlufteindüsung bei Anlieferung

Das Engineering dieser Abgasnachbehandlung baut auf folgendem Funktionsprinzip auf: Für die nachmotorische Reduktion von Stickoxiden ist eine stöchiometrische Fahrweise des Motors notwendig, da ansonsten der neu angeordnete 3-Wege-Katalysator im Doppel-Kat-System nicht funktioniert. Dies wird durch eine weitere Reduktion des Restsauerstoffgehalts vor dem Katalysator realisiert. Hierdurch soll die elektrische Minderleistung von aktuell ca. 4 % wieder ausgeglichen werden. Aufgrund der schwankenden Gasqualität und -quantität wird es vermehrt zur Bildung von CO kommen. Dieses CO kann im ersten Katalysator nicht umgesetzt werden. Aus diesem Grund ist nach dem ersten Katalysator (reine NOx-Reduktion) eine beheizte Zwischenlufteindüsung vorgesehen. Auf Grundlage von Berechnungen kann hier die zur Oxidation notwendige Luftmenge zudosiert werden. Im Anschluss durchläuft das Gasgemisch eine Turbulatorstrecke, um eine optimale Vermischung zu gewährleisten. Das mit Sauerstoff angereicherte Abgas durchströmt im Anschluss einen großzügig dimensionierten Oxidationskatalysator, in dem das CO zu CO_2 oxidiert wird und weitere Kohlenwasserstoffverbindungen aufoxidiert werden. Durch diese Maßnahme sollen die CO-Emissionen auf ein noch niedrigeres Niveau gesenkt werden und auch die CO-Peaks beherrscht werden. Die Installation und messtechnische Untersuchung ist Teil des Nachfolgeprojektes HORA.

6. Analyse- und Charakterisierung der Reststoffe

▪ Analytik

Im Labor für Verbrennungs- und Umweltschutztechnik der HSZG stehen verschiedene Analysengeräte zur Bestimmung der Zusammensetzung von festen und flüssigen

Brenn- und Abfallstoffen zur Verfügung, die im Rahmen des Projektes zur Charakterisierung der Reststoffe genutzt wurden.

Der Gesamtwassergehalt wird aus der groben und der hygroskopischen Feuchtigkeit nach DIN 51718 bzw. ISO 14780 ermittelt. Die grobe Feuchtigkeit oder auch Oberflächenwasser genannt, verdunstet bei Raumtemperatur in die Luft. Die so getrocknete Probe wird auch als lufttrockener Brennstoff bezeichnet. Zur Bestimmung der hygroskopischen Feuchtigkeit wird ein Trockenschrank verwendet. Es ist die Feuchtigkeit, die beim Trocknen der lufttrockenen Probe bei (106±2) °C zusätzlich entweicht.

Ein Verbrennungskalorimeter dient der Bestimmung des Brennwertes fester und flüssiger Brennstoffe nach DIN 51900-1. Dabei wird in einem geschlossenen Reaktionsgefäß (Aufschlussgefäß/kalorimetrische Bombe) der Brennstoff nach elektrischer Zündung mit überschüssigem Sauerstoff vollkommen und vollständig verbrannt. Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärmemenge erhöht die Temperatur eines Wasserbades, in dem sich das Reaktionsgefäß befindet. Diese Temperaturerhöhung ist ein direktes Maß für den Energiegehalt der verbrannten Substanz. Mit Hilfe der Elementarzusammensetzung kann aus dem gemessenen Brennwert der Heizwert berechnet werden. Beides ist direkt proportional mit dem ermittelten Wassergehalt. Für die Bewertung der Reststoffe ist die Kenntnis des Brenn- bzw. Heizwertes interessant, da sich hiermit das Optimierungspotenzial hinsichtlich der energetischen Umsetzung des Brennstoffes feststellen lässt. Die Ermittlung des Brenn- bzw. Heizwertes erfolgt somit auch für den eingesetzten Brennstoff.

Zur Bestimmung der sogenannten Kurzanalyse bzw. Immediatanalyse wird ein Thermogravimetrisches Multianalysensystem verwendet. Es wird das Gewicht von Grundstoffen (hier im speziellen Fall: Analysefeuchtigkeit, flüchtige Bestandteile, fixer Kohlenstoff und Asche) in einem Stoffgemisch untersucht. Dazu wird der Gewichtsverlust der Proben in Abhängigkeit von der Ofentemperatur innerhalb einer kontrollierten Gasumgebung gemessen. Als Ergebnis liegen die oben genannten Anteile in Ma.-% vor. Mit diesem Analysensystem können 19 Proben simultan untersucht werden. Das System kann mit sehr kleinen Proben bestückt werden. Im ersten Analyseschritt wird nach DIN 51718 die Analysenfeuchtigkeit der Probe bei 105 °C unter einer Stickstoffatmosphäre bis zur Massenkonstanz bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung der Flüchtigen Bestandteile - ebenfalls unter inerter Stickstoffatmosphäre - bei 900 °C nach DIN 51720, die eine Aussage zur Zündwilligkeit der Probe treffen. Der dritte und letzte Schritt der Messung ist die vollkommene Veraschung der Probe. Die Probe wird unter reinem Sauerstoff nach DIN 51719 bei 815 °C bis zur Massenkonstanz verbrannt und die Gewichtsdifferenz ermittelt. Als Differenz zu 100 ergibt sich rechnerisch nach DIN 51734 der Gehalt an fixem Kohlenstoff, der z.B. den Inkohlungsgrad der Probe erkennen lässt.

Zur Bestimmung der Gehalte an Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff eines Stoffes wird die Elementaranalyse verwendet. Die Kenntnis dieser Stoffanteile ist wichtig für die Qualitätskontrolle. Die Ergebnisse können zudem als Eingangsparameter für Berechnungen verwendet werden, die im Zusammenhang mit der Verbrennung von festen Brennstoffen durchgeführt werden. Die ökologische Bedeutung des Stickstoffgehaltes ist mit Emissionen von NOx verbunden (Bildung von brennstoffbedingtem NOx). Der Wasserstoffgehalt ist für die Berechnung des Heizwertes von Bedeutung. Der Gesamtkohlenstoffgehalt ist für die Bestimmung der CO_2-Emissionen erforderlich. Eine bekannte Probemasse wird nach DIN 51732/33 sowie DIN 51724-3 in Sauerstoff oder einem Sauerstoff-Trägergas-Gemisch so verbrannt, dass sie in Asche und gasförmige Verbrennungsprodukte umgewandelt wird. Diese bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, elementarem

Stickstoff und/oder Stickstoffoxiden, Schwefeloxiden und -oxosäuren sowie Halogenwasserstoffen. Die Verbrennungsprodukte werden so behandelt, dass sichergestellt ist, dass der Wasserstoff von schwefel- oder halogenidhaltigen Verbrennungsprodukten als Wasserdampf freigesetzt wird. Stickstoffoxide werden zu Stickstoff reduziert und Verbrennungsprodukte, die die nachfolgenden Gas-Analyseverfahren beeinträchtigen könnten, entfernt. Direkt danach werden die gebildeten Verbrennungsgase (Oxidationsprodukte) mit Hilfe eines Trägergases (reines Helium) über einen ca. 600 - 900 °C heißen Kupfer- oder Wolframkontakt (als Späne oder Granulat) geführt und im Gasstrom enthaltene Stickoxide (NOx) vollständig zu molekularen Stickstoff (N_2) reduziert. Anschließend werden die definierten Verbrennungsgase (CO_2, H_2O, SO_2, N_2) gaschromatographisch separiert und nacheinander einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) zugeführt und quantifiziert. Da bei dieser Messmethode die Reihenfolge der Elemente (jeweils als sog. Peaks detektiert) in einer Probenmessung technisch exakt festgelegt ist (siehe Abb. 2-70), erlaubt dies sowohl die eindeutige Identifizierung (qualitative Bestimmung) sowie über die Peakflächen (Integral über die Zeit) der Messsignale auch gleichzeitig die Mengenerfassung (quantitative Bestimmung) der einzelnen Elemente als C, H, N, S. Mit Hilfe der bekannten Einwaage lässt sich dann der jeweilige Massenanteil (in Prozent oder ppm) bestimmen. Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes der Probe erfolgt am Ende der Messung durch die rechnerische Summation zu 100.

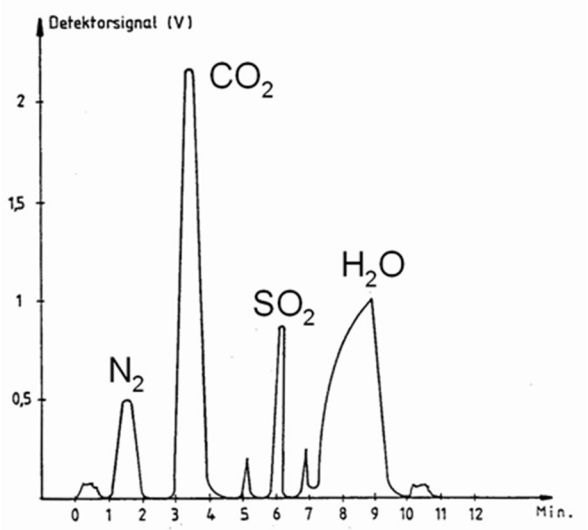


Abb. 2-70 Zeitliches Signal an der Wärmeleitfähigkeitsmesszelle (WLD) während einer Messung

Zur Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 15169 wird ein sogenannter Muffelofen verwendet. Der Glühverlust dient oft als Schätzwert für den Gehalt an nicht flüchtigen organischen Bestandteilen in Abfall, Schlamm und Sedimenten. Hierzu wird eine zuvor getrocknete Probe im Laborofen bei 550 ± 25 °C bis zur Massenkonstanz erhitzt. Der Glühverlust wird aus der Differenz der Massen vor und nach dem Glühvorgang errechnet. Als Differenz zu 100 wird anschließend der sogenannte Glührückstand errechnet.

Die Bestimmung der (Schütt-)dichte von Filterstaub und Reststoff erfolgte aufgrund der schwierigen Stoffeigenschaften des Probenmaterials lediglich in Anlehnung an die DIN 15103. Eine Probemenge ist hierzu in einen Standard-Behälter mit einer gegebenen Größe und Form zu füllen und anschließend zu wiegen. Aus dem Nettogewicht je Standard-Volumen wird die Schüttdichte berechnet und für den gemessenen Wassergehalt angegeben. Die Abweichung zur angegebenen DIN bezieht sich auf die geforderten Standard-Behälter. Da die in der DIN ausgewiesenen „kleinen Behälter“ ein

Nettovolumen von 5 Liter haben und dies durch die Messfahrten nicht sichergestellt werden konnte, wurde zur Bestimmung der (Schütt-)dichte lediglich ein Behälter von 0,5 Liter gewählt. Auch musste dieser aufgrund der Staubeigenschaften beider Stoffe vor dem Verdichten verschlossen werden. Da die Bestimmung hiermit nicht mehr DIN-konform ist, wurde der Begriff „Schütt-„ in Klammern gesetzt.

- Ableitung vereinfachter Analysemethoden

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

Um den Entsorgungspfad für das jeweilige Endprodukt festlegen zu können, ist eine Charakterisierung der enthaltenen Anteile zwingend notwendig. Darüber hinaus besteht ein Optimierungspotenzial hinsichtlich der Menge und Zusammensetzung des Endprodukts Reststoff, der nur mit Hilfe der Brennstoffanalytik festgestellt werden kann. So wurden die am Standort Zittau vorhandenen Analysengeräte verwendet, um die Zusammensetzung der jeweils bei den Versuchsfahrten anfallenden Endprodukte (Filterstaub und Reststoff) zu untersuchen.

Vorhandene Messgeräte sind:

- **Thermogravimetrische Analyse** zur Bestimmung der Analysenfeuchtigkeit, des Gehalts an flüchtigen Bestandteilen, fixen Kohlenstoffs sowie der Asche
- **Elementaranalyse** zur Bestimmung des Gehalts an (Gesamt-)kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel sowie Sauerstoff
- **Trockenschrank** zur Bestimmung des Gesamtwassergehaltes
- **Verbrennungskalorimeter** zur Bestimmung des Brennwertes
- **Muffelofen** zur Bestimmung des Glühverlustes und Verifizierung des Aschegehaltes
- **Gefäße** zur Bestimmung der (Schütt-)dichte

Vorangegangene Untersuchungen hinsichtlich der Zusammensetzung, mit denen auch externe zertifizierte Labore beauftragt worden waren, zeigten auf, dass das Probenmaterial von Filterstäuben und Reststoffen nicht unproblematisch ist. Zum einen können diese Stoffe gefährliche Verbindungen enthalten (z.B. PAK, Benzol, Furane), die den Umgang mit ihnen als nicht unbedenklich deklarieren und somit einen erhöhten Aufwand beim Arbeitsschutz erfordern, zum anderen sind die erhaltenen Analysenergebnisse zum Teil unschlüssig (unterschiedliche Labore messen an DIN-gerechten Teilmengen einer Probe unterschiedliche Werte, Labore liefern unschlüssige Werte einer Probe ohne Vergleichsgrenze). Ein erster Umgang mit den Probenmaterialien Filterstaub und Reststoff zeigte, dass:

- der Filterstaub inhomogener ist als Reststoff, was verfahrenstechnisch durch die Anlage begründet ist, und einen erhöhten Aufwand in der Probenteilung und -aufbereitung bedeutet,
- der Filterstaub zudem staubähnliche Eigenschaften hat, wodurch die Probenaufbereitung nicht durch die üblichen Schneidmühlen erfolgen kann, sondern durch mörsern und sieben erfolgen muss, was wiederum einen erheblichen Arbeitsaufwand bedeutet,
- der Reststoff durch seinen teils sehr hohen Aschegehalt zu erhöhten Messunsicherheiten sowie erhöhtem Wartungsaufwand bei den Messgeräten führt.

Es wurde somit versucht, einen Zusammenhang herauszuarbeiten, der zukünftige Abschätzungen zur Zusammensetzung beider Materialien erleichtert und beschleunigt.

Dazu wurde die kostengünstigste und am wenigsten zeitintensive Analyse als Ausgangskriterium gewählt: die Bestimmung des Glühverlustes bzw. des Glührückstandes nach DIN 15169. Ein weiterer Vorteil bei dieser Bestimmung ist die erhöhte Einwaage an Probenmaterial, was gerade bei inhomogenen und schwierig handhabbaren Stoffen mitentscheidend für die Qualität der Messergebnisse sein kann.

Neben den eigenen Filterstäuben und Reststoffen, die messfahrtbegleitend gewonnen werden konnten, gelang es mit Unterstützung des Netzwerks FEE e.V. - im Speziellen der Arbeitsgruppe „Vergasung von Biomasse“ - weiteres Probenmaterial baugleicher Anlagen bereitzustellen. So wurden im Rahmen der Forschungsarbeit insgesamt über 100 Proben DIN-konform (unter Einhaltung der jeweiligen Präzisionsdaten sowie Wiederholgrenzen) hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, ihres Energiegehalts und (Schütt-)dichte untersucht.

Abb. 2-71 zeigt, dass die Messgrößen:

- Aschegehalt (rot),
- flüchtige Bestandteile FLÜ und fixer Kohlenstoff Cfix (blau),
- Gesamtkohlenstoff TC (grün) und
- Brennwert (orange)

linear abhängig sind vom Glühverlust. Während der Aschegehalt indirekt proportional zum Glühverlust ist, weisen die anderen Größen eine direkte Proportionalität auf. Die dargestellten Bestimmtheitsmaße bei der jeweils angegebenen Probenanzahl (n_1 für die Primärachse und n_2 für die Sekundärachse) lassen auf eine hohe Wahrscheinlichkeit dieser abgeleiteten Linearität schließen.

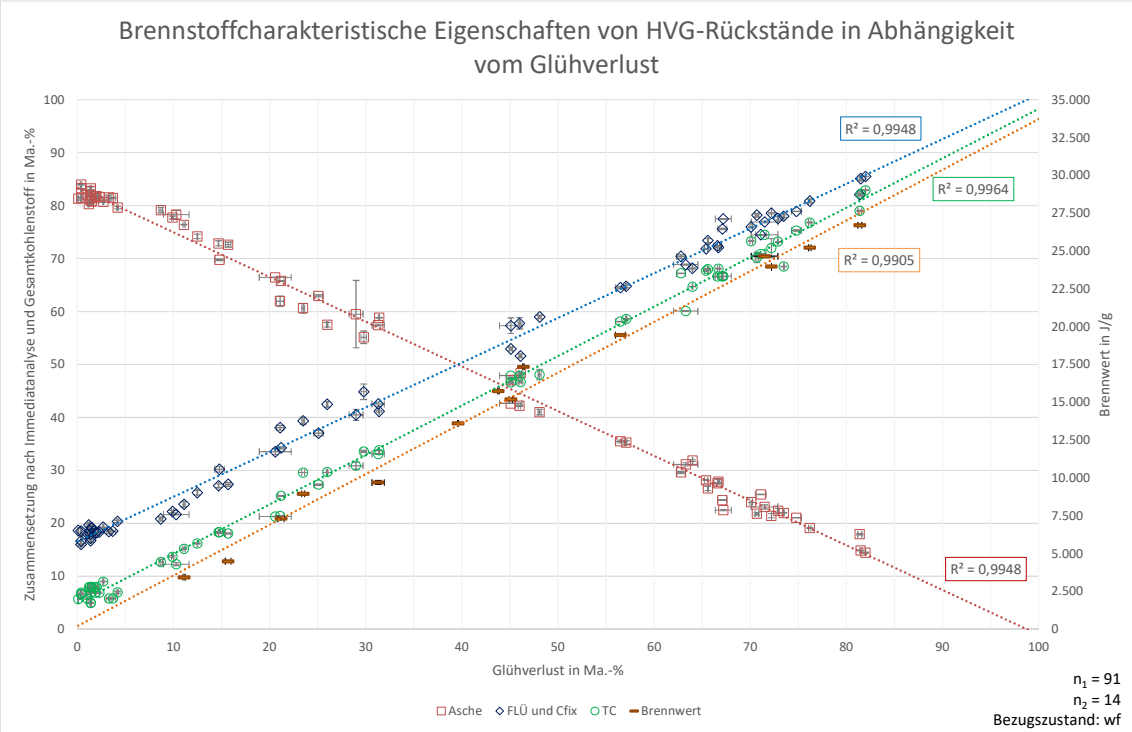


Abb. 2-71 Brennstoffcharakteristische Eigenschaften von HVG-Rückständen in Abhängigkeit vom Glühverlust

In Abb. 2-72 ist anstelle des Brennwertes die (Schütt-)Dichte der Rückstände in Abhängigkeit vom Glühverlust aufgetragen. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass hier kein linearer Zusammenhang nachweisbar war, sondern ein logarithmischer vermutet wird. Die relativ stark ansteigenden Dichtewerte unterhalb eines Glühverlustes von

10 Ma.-%, beruhen darauf, dass im entsprechenden Aschegehalt (> 80 Ma.-%) „schwere“ mineralische Verbindungen (Karbonate, Oxide) vorliegen.

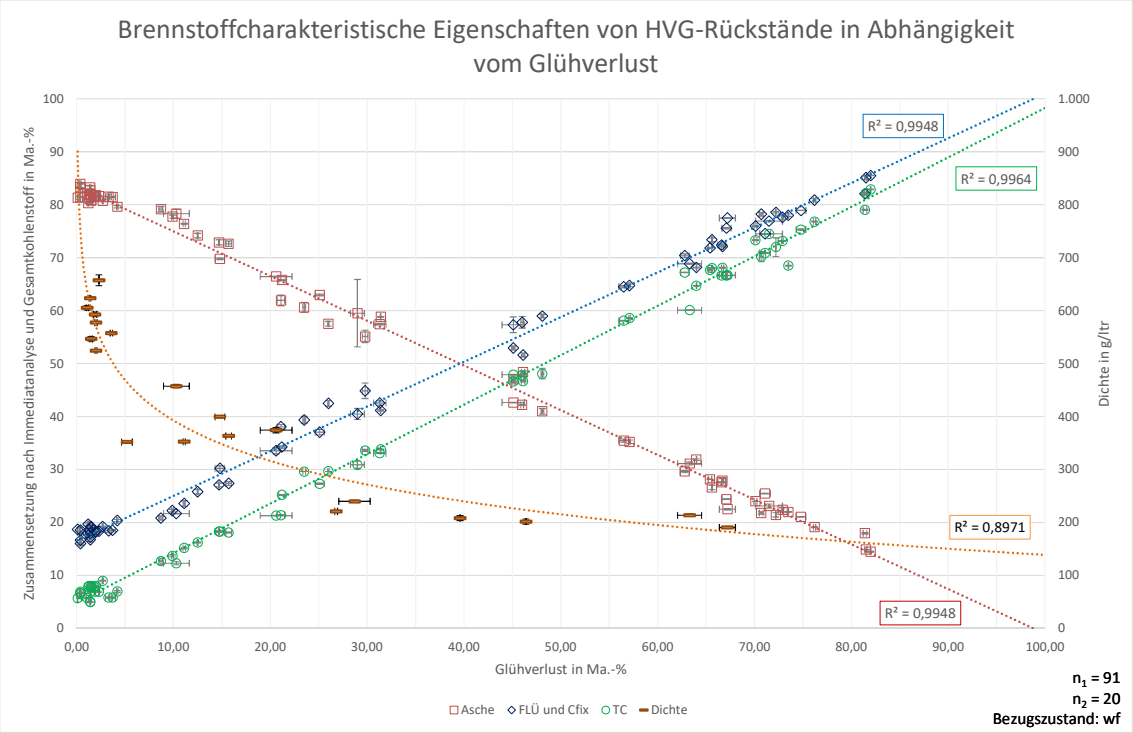


Abb. 2-72 Brennstoffcharakteristische Eigenschaften und Dichte von HVG-Rückständen in Abhängigkeit vom Glühverlust

Als Ergebnis dient z.B. die nachfolgende Abb. 2-73, die die Trendlinien der Abb. 2-70 sowie (beispielhaft) einige später gewonnene Analysewerten zeigt. Damit kann nun eine schnelle Abschätzung von Zusammensetzung und Energiegehalt des aktuell vorliegenden Probenmaterials vorgenommen werden.

Standardmäßig wird demnach nur noch der Glühverlust analysiert. Der Aschegehalt, der Gehalt an fixem Kohlenstoff, flüchtigen Bestandteilen und dem Gesamtkohlenstoff sowie der Brennwert werden ausschließlich stichprobenartig gemessen, um die festgestellten Abhängigkeiten zu verifizieren.

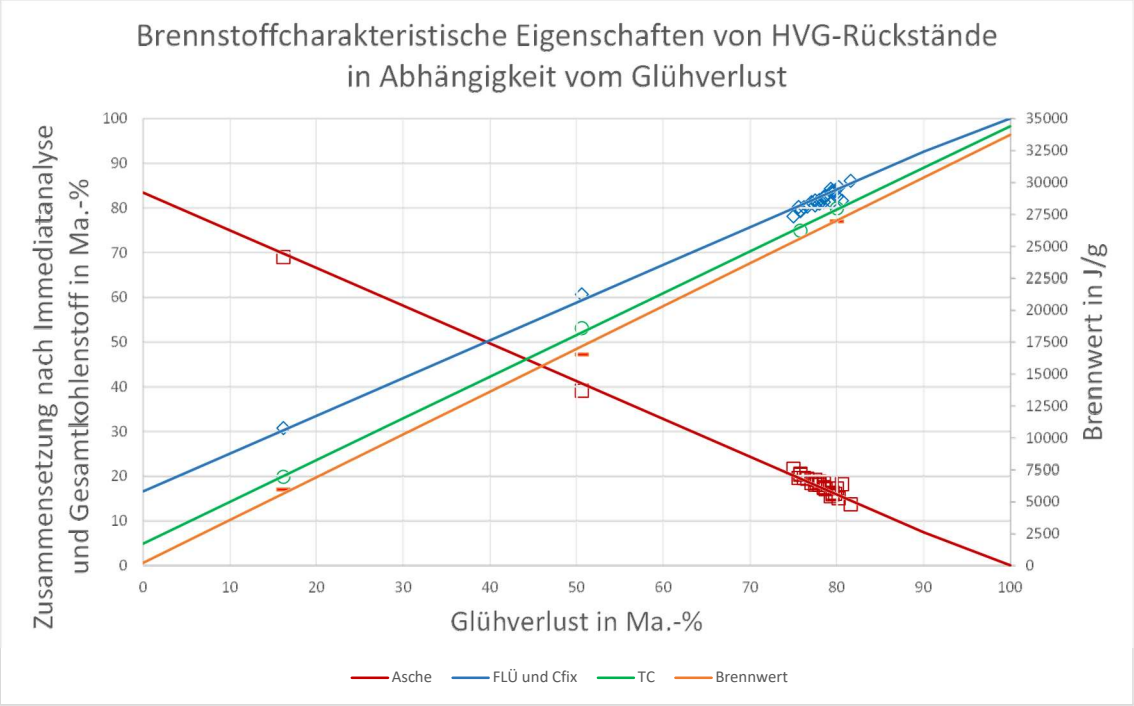


Abb. 2-73 Verifizierung gefundener Zusammenhänge durch Labormesswerte aus 2017

Wie der Grafik zu entnehmen ist, besteht eine sehr gute Übereinstimmung, sodass an dem vereinfachten Verfahren zur Beurteilung der messfahrtbegleitend anfallenden Rückstände festgehalten wird.

7. Stoff- und Energiestrombilanzierung

▪ Bilanzierung einer Beispielmessfahrt

Für die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme wurden die Daten des stationären Zustandes eines ausgewählten Versuches vom 08.02.2019 ermittelt und über den gewählten Zeitraum gemittelt. Die Berechnung der Massenströme der gasförmigen Medien erfolgte über den Volumenstrom und die Dichte im Normzustand. Es wurden die Massenströme am Ein- und Austritt der Gesamtanlage ermittelt. Die bilanziellen Abweichungen wurden als absolute und als relative Werte, die sich auf den summarischen Massenstrom am Eintritt bezogen, berechnet.

In Tab. 2-31 sind die für eine Bilanzierung notwendigen stationären Messdaten, die daraus berechneten weiteren Versuchsparameter sowie die dem Versuch zuzuordnenden Ergebnisse der Laboranalysen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 2-31 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten vom 08.02.2019 für den stationären Auswertungszeitraum

Parameter	KKS	Wert	Einheit	Datenherkunft
Brennstoff (HHS)				
Massenstrom	F1402	29,48	kg/h	Messung
Heizwert		16,71	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Wassergehalt		9,5	Ma.-%	Laboranalyse
Vergasungsmittel (Luft),				
Volumenstrom	F1201	43,62	m³/h	Messung
Massenstrom		42,78	kg/h	Berechnung
Temperatur	T1201	31,5	°C	Messung
Thermische Energie		0,02	kW	Berechnung
Produktgas				
Volumenstrom	F1101	83,54	m³/h	Messung
Massenstrom		66,31	kg/h	Berechnung
Temperatur	T1107	88,4	°C	Messung
Zusammensetzung	Q1106			
O_2		0,12	Vol.-%, tr.	Messung
CO		23,76	Vol.-%, tr.	Messung
CO_2		9,17	Vol.-%, tr.	Messung
CH_4		2,56	Vol.-%, tr.	Messung
H_2		18,21	Vol.-%, tr.	Messung
H_2O		8,76	Vol.-%	Messung
Heizwert		5,51	MJ/kg	Berechnung
Motorluft				
Volumenstrom	F2201	69,86	m³/h	Messung
Massenstrom		81,17	kg/h	Berechnung
Temperatur	T2201	29,43	°C	Messung
Thermische Energie		0,10	kW	Berechnung
Elektrische Energie				
Eigenbedarf Vergaser	E1703	0,89	kW	Messung
Eigenbedarf BHKW	E2701	0,12	kW	Messung
Netzeinspeisung	E2702	29,77	kW	Messung
Wärme				
Nutzwärmeleistung Vergaser	U1601	10,23	kW	Messung
Nutzwärmeleistung BHKW	U1602	57,07	kW	Messung
Reststoff				
Massenstrom	Q1502	0,27	kg/h	Messung
Heizwert		22,71	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Motorabgas				
Volumenstrom	F2301	220,56	m³/h	Messung
Massenstrom		145,46	Kg/h	Berechnung
Temperatur	T2315	89,7	°C	Messung
Zusammensetzung*	Q2313			
O_2		1,05	Vol.-%, tr.	Messung
CO_2		19,38	Vol.-%, tr.	Messung
H_2O		14,12	Vol.-%	Messung
N_2		67,91	Vol.-%	Berechnung
Thermische Energie		2,79	kW	Berechnung

*betrifft nur die zur Bilanzierung relevanten Stoffströme

In Tab. 2-32 ist die Stoffstrombilanz um die Gesamtanlage (Biomassevergasungsanlage und BHKW) aufgestellt. Bezüglich der Abweichungen um die Gesamtanlage ist erkennbar, dass v.a. die Stoffströme Kohlenstoff und Wasserstoff in ihrer Bilanzsumme (Input im Vergleich zum Output) mit einer großen Abweichung verbunden sind.

Tab. 2-32 Daten der Stoffstrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum in kg/h

Gesamt-prozess	Brennstoff	Vergasungs-mittel	Reststoff	Motorluft	Strom	Wärme	Motorabgas	Verluste	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Kohlenstoff-bilanz	13,77	0,00	0,18	0,00	´-	´-	-10,10	0,00	3,84	27,9%
Wasserstoff-bilanz	1,82	0,00	0,00	0,00	´-	´-	-1,41	0,00	0,41	22,6%
Sauerstoff-bilanz	13,75	9,97	0,02	18,90	´-	´-	-39,58	0,00	3,06	7,2%
Stickstoff-bilanz	0,01	32,82	0,00	62,26	´-	´-	-94,37	0,00	0,72	0,8%
Massen-bilanz	29,48	42,79	0,27	81,17	´-	´-	-145,5	0,00	8,24	5,4%

In Tab. 2-33 ist die Energiestrombilanz um die Gesamtanlage (Biomassevergasungsanlage und BHKW) aufgestellt. Unter dem Punkt Verluste sind die Konversionsverluste des Motor- und Generatorprozesses gemäß Datenblatt zusammengefasst. Bezüglich der Energiebilanz um die Gesamtanlage ist erkennbar, dass eine Abweichung der Bilanzsumme (Input im Vergleich zum Output) vorhanden ist. Ein Hauptteil dieser Abweichung ist den Wärmeverlusten der Bauteiloberflächen (Konvektion und Strahlung) zuzuschreiben. Im Kapitel „Thermische Oberflächenverluste“ werden exemplarisch die entsprechenden Wärmeverluste untersucht und aufgeführt. Für die dort untersuchte Messfahrt ergab sich beispielsweise ein Gesamtwärmeverlust der Bauteiloberflächen von ca. 11 kW.

Tab. 2-33 Daten der Energiestrombilanz für den stationären Auswertungszeitraum in kW

Gesamt-prozess	Brennstoff	Vergasungs-mittel	Reststoff	Motorluft	Strom	Wärme	Motorabgas	Verluste	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Chemische Energie	136,8	0,00	-3,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Thermische Energie	0,00	0,02	0,00	0,10	0,00	-67,30	-2,79	-10,74		
Elektrische Energie	0,00	0,00	0,00	0,00	-28,67	0,00	0,00	0,00		
Energie-bilanz	136,8	0,02	-3,44	0,10	-28,67	-67,30	-2,79	-10,74	24,01	17,5%

Graphische Darstellung der Bilanzierungsergebnisse

Um die Ergebnisse der Bilanzierung grafisch darzustellen, wurden Sankey-Diagramme erstellt. Die in Tab. 2-32 aufgeführten Daten bilden die Grundlage für die in Abb. 2-74 enthaltene Darstellung der Stoffstrombilanz. Die in Tab. 2-33 zusammengefassten Daten der Energieströme sind wiederum in Abb. 2-75 grafisch aufgearbeitet.

Der absolute Wert der Bilanzabweichung um die jeweilige Komponente wurde in den Sankey-Diagrammen als Bilanzfehler-Strom gekennzeichnet. Die Abweichungen in Abb. 2-74 sind vor allem den Messungenauigkeiten bei der Erfassung der Volumenströme zuzuschreiben. Die Abweichungen in Abb. 2-75 werden vor allem mit der messtechnisch

bedingten unzureichenden Erfassung der Wärmeverlustströme über die Bauteiloberflächen (Strahlung, Konvektion) begründet. Hierzu wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

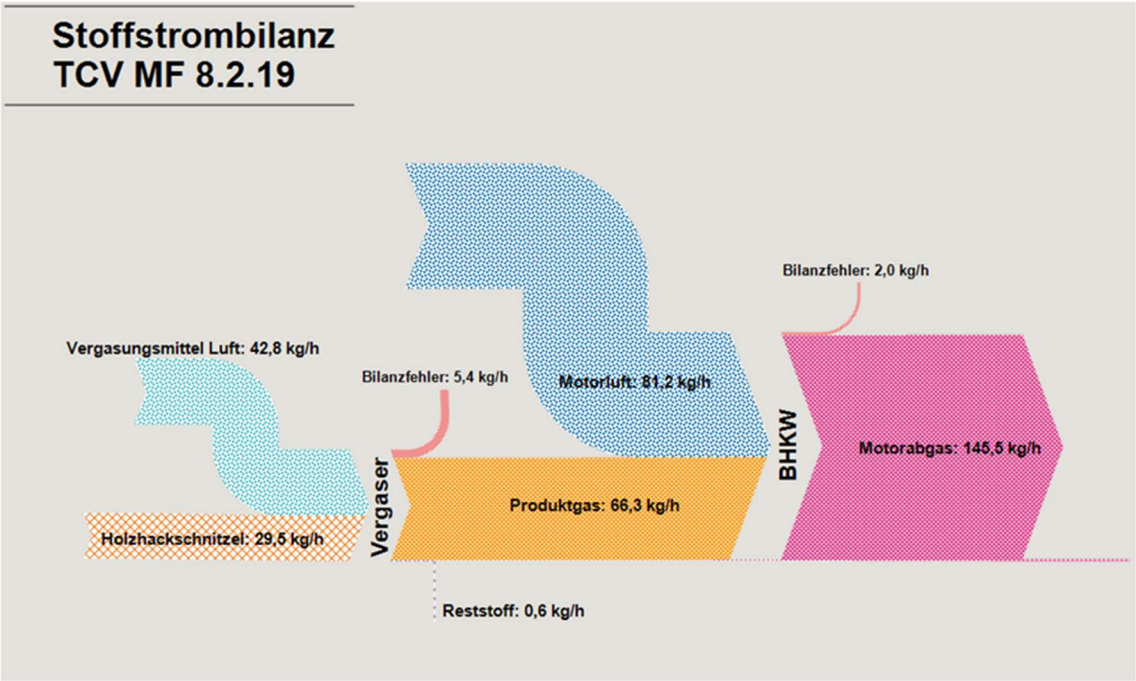


Abb. 2-74 Grafische Darstellung der Massenbilanzierungsergebnisse der Gesamtanlage mittels Sankey-Diagramm

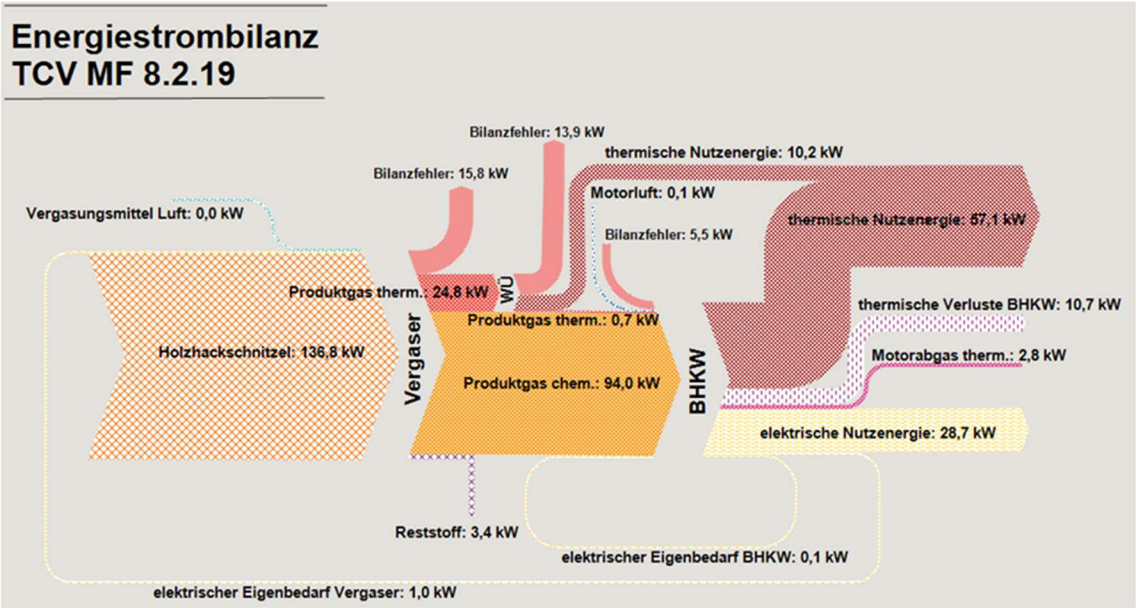


Abb. 2-75 Grafische Darstellung der energetischen Bilanzierungsergebnisse der Gesamtanlage mittels Sankey-Diagramm

Ermittlung der Kennwerte für die Beispielmessfahrt

Die technische Bewertung des Prozesses kann über die Angabe diverser Wirkungs- und Nutzungsgrade erfolgen.

Der **Kaltgaswirkungsgrad** beschreibt das Verhältnis der dem Vergasungsprozess mit dem Brennstoff zugeführten chemischen Energie und der mit dem Produktgas

abgeführten chemischen Energie und dient damit der Gütebeschreibung des Vergasungsprozesses. Aufgrund der alleinigen Berücksichtigung der chemisch gebundenen Energie wird dieses Kriterium als Kaltgaswirkungsgrad bezeichnet. Der **elektrische Anlagenwirkungsgrad** gibt das Verhältnis der elektrisch erzeugten Energie zu der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie an. Der **Nutzwärmegrad** zeigt das Verhältnis der genutzten thermischen Energie zu der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie an. Wenn hingegen das Verhältnis der Summe der Nutzleistungen zur bezogenen Brennstoffleistung des Konversionsprozesses berechnet wird, kann der **Brennstoffausnutzungsgrad** angegeben werden.

Um die beschriebenen Bewertungskriterien zu berechnen, werden die in Tab. 2-34 aufgeführten technischen Kennwerte der zuvor beschriebenen Messfahrt verwendet.

Tab. 2-34 Zusammenstellung ausgewählter technischer Kennwerte

Parameter	Wert
Brennstoffleistung	136,8 kW
Chemische Produktgasleistung	94,0 kW
Nutzwärmeleistung	67,3 kW
Elektrische BHKW-Leistung	29,8 kW

Die entsprechend aus den technischen Parametern berechneten Bewertungskriterien der Beispielmessfahrt sind in Tab. 2-35 aufgeführt. So ergab sich für den Auswertungszeitraum ein Kaltgaswirkungsgrad von knapp 70 % und ein Brennstoffausnutzungsgrad von 71 %.

Tab. 2-35 Zusammenstellung der berechneten Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Wert
Kaltgaswirkungsgrad	69 %
Elektrischer Anlagenwirkungsgrad	22 %
Nutzwärmegrad	49 %
Brennstoffausnutzungsgrad	71 %

- Thermische Oberflächenverluste

Durchgeführte Arbeiten zur Quantifizierung der Oberflächenwärmeverluste

Zur Ermittlung der Oberflächenwärmeverluste des Biomasse-Vergasungs-BHKW wurden zwei studentische Arbeiten [44], [45] sowie eigene Messungen und Berechnungen durchgeführt. Folgende Punkte waren Bestandteil der Bearbeitung:

- Bestimmung der zu betrachtenden Flächen
- Messung der stationären Oberflächentemperaturen
- Berechnung und Darstellung der Wärmeverluste (Strahlungs- und Konvektionswärmeverluste) an betrachteten Flächen
- Vergleich der ermittelten Wärmeverluste mit vorhandenen Energiestrombilanzierungen

Projektarbeit Stöckmann. Hier erfolgte die Messung der Oberflächentemperaturen mittels Thermografieaufnahmen (Wärmebildkamera FLIR P620; Abb. 2-76). Es wurden Flächen des Vergasers inklusive Flansche sowie des BHKW betrachtet [44].

Diplomarbeit Kaiway. Zur Ermittlung der Oberfläche wurde die Anlage vermessen und in ein CAD-Modell überführt (Abb. 2-77). Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgte mit einem Berührungs- Thermoelement (Typ K, Nickel-Chrom/Nickel) am

Vergaser sowie am Motor-BHKW. Dabei wurden für die betrachteten Flächen mehrere Messpunkte ausgewählt, um eine Durchschnittstemperatur abzubilden [45].

Ermittlung der HSZG. Die Ermittlung der Oberflächenwärmeverluste orientiert sich methodisch stark an der Arbeit von [45]. Es wurden allerdings zwei weitere Flächen mit einbezogen sowie zusätzlich die Gesamtwärmeverluste über die Flansche abgeschätzt. Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgte mit einem Laser- Thermometer (Bosch GIS-1000-C). Die detaillierte Auswertung ist in einem separaten Forschungsbericht zu finden.

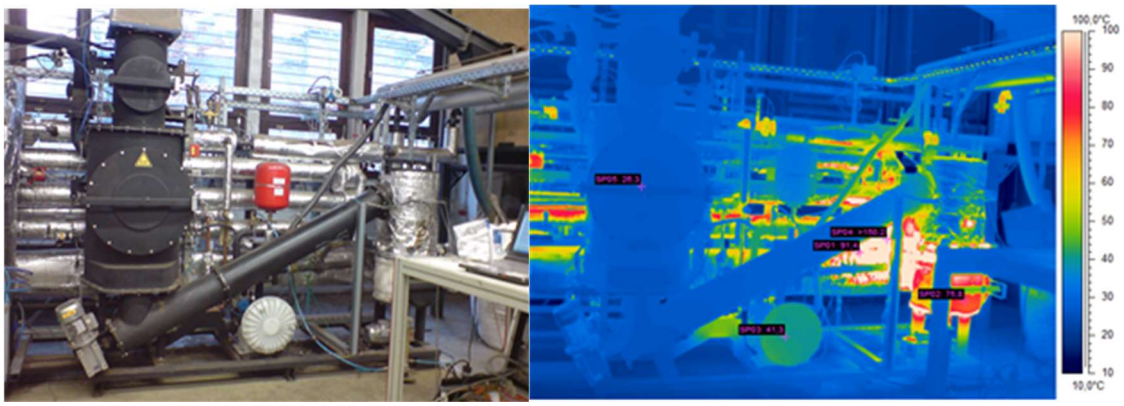


Abb. 2-76 Digitalaufnahme des Holzvergasers und zugehöriges Wärmebild aus [44]

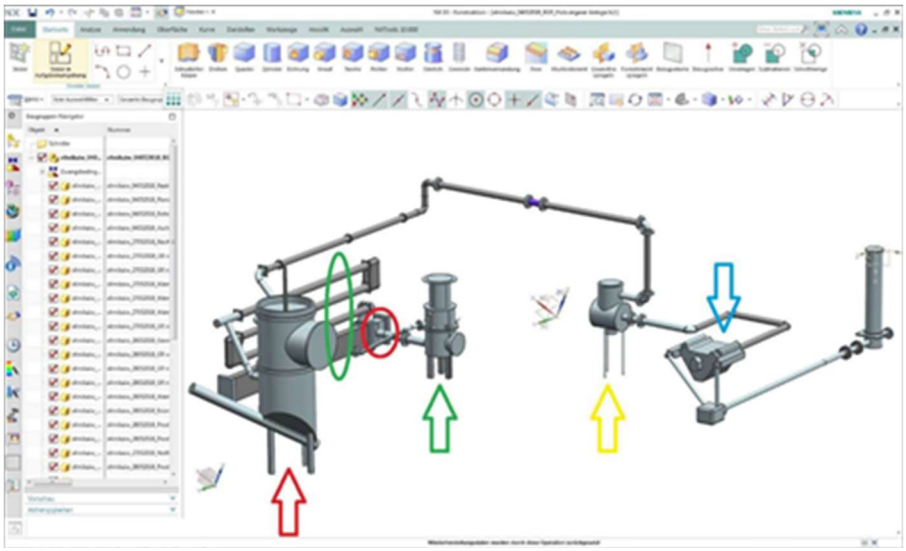


Abb. 2-77 3D- Modell des Holzvergasers aus [19]

In allen drei Arbeiten erfolgt die Unterscheidung der Wärmeverluste in die beiden Wärmeübertragungsmechanismen Freie Konvektion und Strahlung. Berechnungsgrundlage ist dabei jeweils das entsprechende Kapitel des VDI-Wärmeatlas. Der allgemeine Lösungsalgorithmus zur Ermittlung des Wärmestromes durch Freie Konvektion wird im VDI-Wärmeatlas folgendermaßen angegeben:

1) Zusammenstellung der Eingangsgrößen $\alpha(\rho,\nu,\kappa,\beta,\lambda,L,\Delta T,g)$
2) Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen Ra und Pr,
3) Berechnung von Nu(Ra,Pr) unter Verwendung der im VDI-Wärmeatlas angegebenen Beziehungen,
4) Berechnung von α aus der Definition von ν,
5) Berechnung von Q* aus α

Für die Berechnung des Wärmeverlustes aufgrund von Strahlung ist die Bestimmung der Emissionsgrade ε_i der unterschiedlichen Oberflächen von zentraler Bedeutung. Da der Emissionsgrad hauptsächlich von Materialeigenschaften abhängig ist, unterliegt er starken Schwankungen (z.B. bei Metallen zwischen 5 % und 90 %). Die Emissionsgrade wurden in [44] nach [46] abgeschätzt.

In [45] wurden die von [44] ermittelten Werte übernommen; zusätzlich wurden Emissionsgrade für Aluminiumfolie und Baumwolle aus Literatur recherchiert [47], [48]. Für die Ermittlung der HSZG wurden die Werte von [45] übernommen.

Auswertung der Ergebnisse

Die beiden studentischen Arbeiten lassen sich aufgrund der Unterschiede in den betrachteten Flächen nur schlecht detailliert miteinander vergleichen, liegen aber mit 6,2 bzw. 6,72 kW Gesamtwärmeverlust sehr nah beieinander. Die Berechnungen der HSZG belaufen sich auf 7,77 kW, was sich durch die Hinzunahme weiterer Flächen erklären lässt. Dabei wurden das Rauchgasrohr direkt im Anschluss an das Katalysatorgehäuse sowie der Rauchgaswärmeübertrager betrachtet. Dies führt zu einem ca. 1 kW höheren Gesamtwärmeverlust über die Oberfläche. Abb. 2-78 zeigt die Höhe der Gesamtwärmeverluste der einzelnen betrachteten Flächen. In Tab. 2-36 ist die Zuordnung der einzelnen Flächen innerhalb der Vergaseranlage zu finden.

Weiterhin wurde eine grobe Abschätzung der Oberflächenwärmeverluste durch unisolierte Flansche und Armaturen vorgenommen. Daraus ergeben sich weitere Wärmeverluste in Höhe von insgesamt ca. 6 kW.

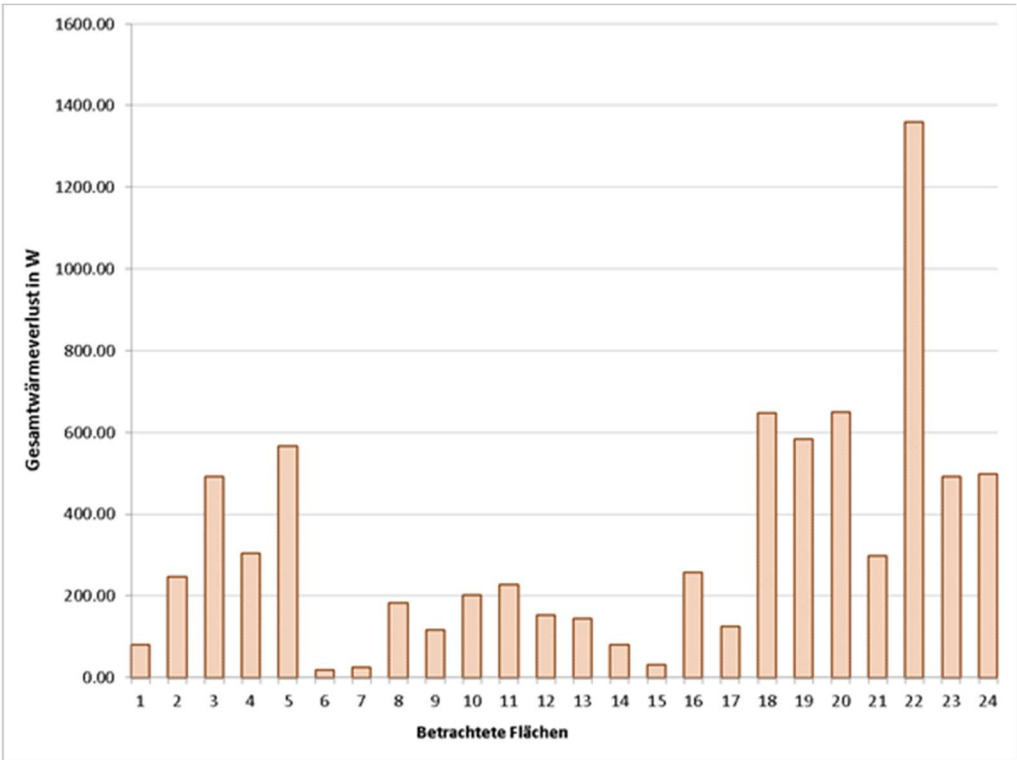


Abb. 2-78 Gesamtwärmeverluste der betrachteten Flächen

Tab. 2-36 Zuordnung der betrachteten Flächen

Lfd. Nr	Flächenbezeichnung		Lfd. Nr	Flächenbezeichnung	
1	Reformer	Oben	**12**	Motor- BHKW	Linke Wassertasche
2		Mitte	**13**		Rechte Wassertasche
3	Rohr Luftzufuhr		**14**		Linkes isoliertes Rohr
4	Produktgas-wärmeübertrager	Rohr Nachreformer	**15**		Rechtes isoliertes Rohr
5		2. Stufe	**16**	Reformer	Unten
6		3. Stufe	**17**		Zylinder (ohne Deckel)
7		4. Stufe	**18**	PG-Leitung am Nachreformer (links)	Vor dem Flansch
8	Abgas-wärmeübertrager	Zylinder	**19**		Nach dem Flansch
9		Vorleitung	**20**	Nachreformer Brenner	
10		Nachleitung	**21**	PG- Leitung am Nachreformer	
11		Leitung zw. Flanschen	**22**	PG- Leitung zwischen Nachreformer und Wasser- PG- WÜ	

Abb. 2-79 zeigt die Energiestrombilanz der Messfahrt, welche den Untersuchungen der HSZG zugrunde liegt. Die Bilanzfehler belaufen sich von Vergaser über Wärmeübertrager bis vor dem Motor-BHKW auf in Summe 14,2 kW. Der Bilanzfehler setzt sich dabei sowohl aus evtl. Messfehlern bei der Bestimmung der Volumenströme, der chem. Zusammensetzung als auch aus thermischen Verlusten über die Oberflächen zusammen. Der Bilanzfehler in Höhe von 13,7 kW über den Produktgaswärmeübertrager wird vermutlich hauptsächlich durch Oberflächenwärmeverluste verursacht. Über den Vergaser ergaben sich Oberflächenwärmeverluste von ca. 10,8 kW (inkl. Flansche und Armaturen).

Die Oberflächenwärmeverluste des BHKW wurden zu 2,9 kW bestimmt. Dies steht im Gegensatz zu den bilanziellen thermischen Verlusten des BHKW von 10,8 kW.

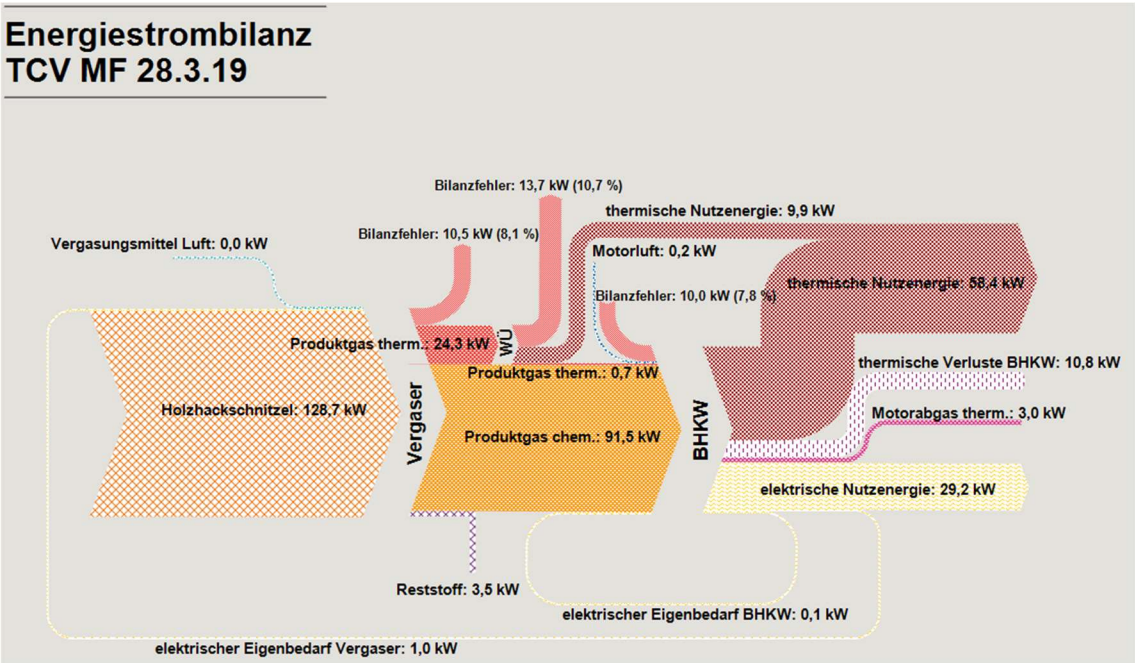


Abb. 2-79 Energiestrombilanz der Messfahrt vom 28.03.2019

Weiter wurden die Oberflächenwärmeverluste unterschieden in Verluste durch isolierte sowie unisolierte Flächen. Abb. 2-80 zeigt die prozentualen Anteile an den Gesamtwärmeverlusten (nicht differenziert nach Strahlungs- und Konvektionswärmeverlusten sowie inkl. der Wärmeverluste über Flansche und Armaturen) der isolierten und unisolierten Flächen. Zum Vergleich sind die jeweiligen Anteile der isolierten und unisolierten Flächen an der betrachteten Gesamtfläche angegeben. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass der Anteil der unisolierten Flächen nur ca. 30 % beträgt, dieser aber für fast 74 % der Gesamtwärmeverluste verantwortlich ist.

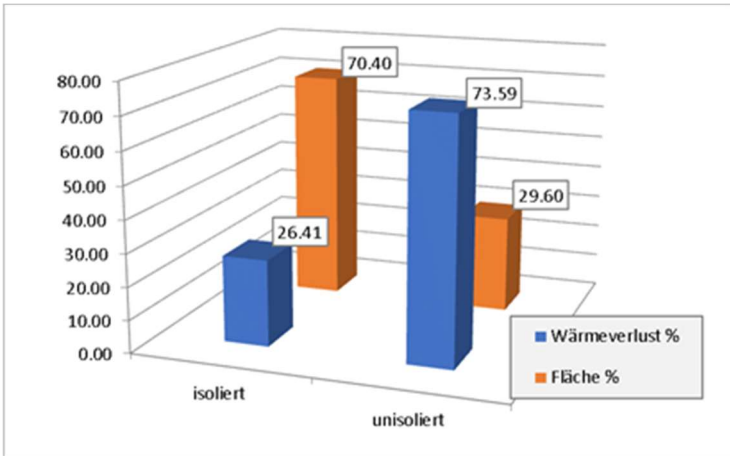


Abb. 2-80 Prozentuale Anteile der Gesamtwärmeverluste und Anteile von isolierten und unisolierten Flächen an der betrachteten Gesamtfläche

Die Bestimmung der Oberflächenwärmeverluste ist aus mehreren Gründen stark fehlerbehaftet. Bezüglich der Temperaturmessung sind das die Messungenauigkeit des verwendeten Infrarotthermometers, eine vom Hersteller empfohlene Akklimatisierungszeit des Messgerätes sowie die unzureichend genaue Bestimmung der Umgebungstemperatur. Bei der Auswahl der Flächen wurde darauf geachtet, diejenigen mit besonders hoher Temperatur und relativ großer Fläche zu berücksichtigen. Es fehlen bei den ausgewählten Flächen dementsprechend kleine Flächen mit komplexer Geometrie sowie auch teilweise große Flächen, welche eine eher geringe Temperaturdifferenz zur Umgebung aufweisen (bspw. 30 bis 40 K). Die komplexe Geometrie erschwert zusätzlich die Bestimmung des Strahlungswärmestromes, da sich benachbarte heiße Flächen gegenseitig beeinflussen. Dies wurde bei der Berechnung nicht beachtet. Eine exakte Bestimmung des Strahlungswärmestromes ist aufgrund der aufwändigen Berechnung an einer Anlage mit solch komplexer Geometrie nicht mit verhältnismäßigem Aufwand möglich. Eine weitere, sehr einflussreiche Fehlergröße bei der Bestimmung des Strahlungswärmestromes ist die Verwendung eines geeigneten Emissionsgrades der betrachteten Flächen. Diese wurden den studentischen Arbeiten entnommen, scheinen aber teilweise unplausibel. Da die Temperaturmessung mittels Infrarotthermometer auf vorwählbaren Emissionsgraden basiert, muss in Betracht gezogen werden, dass die so gemessenen Temperaturen einen großen Fehler aufweisen. Eine exakte Bestimmung der Emissionsgrade könnte mittels paralleler Messung mit einem Infrarotthermometer sowie einem Berührungsthermoelement an einer definierten Oberfläche erfolgen. Der vorwählbare Emissionsgrad wird am Laserthermometer so lange nachjustiert, bis beide Messungen den gleichen Messwert ergeben. Bei der Bestimmung des Konvektionswärmestromes wird auf empirische Gleichungen zurückgegriffen, welche ebenfalls einen Fehler in der Berechnung verursachen. Zusätzlich wird angenommen, dass es sich in allen Fällen um freie Konvektion handelt. Dies scheint teilweise unzulässig zu sein (z.B. bei Luftströmungen, die durch bewegte Anlagenteile verursacht werden).

Als **Fazit** lässt sich sagen, dass der Fehler in der Energiebilanz der Vergasungsanlage von in Summe ca. 14,2 kW durch die Abschätzung des Oberflächenwärmeverlustes von ca. 10,8 kW zumindest in einer plausiblen Höhe liegt. Einen Teil des bilanziellen Fehlers kann den Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Produktgases zugeordnet werden. Ein anderes Bild ergibt sich bei der Bestimmung der Oberflächenwärmeverluste des Motor-BHKW: Hier werden von den potentiellen Wärmeverlusten in Höhe von 10,8 kW lediglich ca. 2,9 kW ermittelt. Dies lässt sich u.a. durch die sehr komplexe Geometrie des Motors erklären. Es konnten dadurch nur relativ wenige Flächen der Gesamtfläche betrachtet werden. Daraus folgt, dass durch die Hinzunahme weiterer Flächen - auch im Bereich des Vergasers - die Genauigkeit der Bestimmung der Wärmeverluste verbessert werden kann. Durch die am Infrarotthermometer vorgewählten, teilweise fehlerbehafteten Emissionsgrade sollte den Temperaturmessungen mit dem Berührungsthermoelement höheres Vertrauen geschenkt werden. Die exakte Ermittlung der Emissionsgrade sollte jedoch auch bei Verwendung des Berührungsthermoelementes erfolgen, da diese einen starken Einfluss auf die ermittelten Strahlungswärmeströme haben. Damit kann die bereits stark vereinfachte Näherung bei der Berechnung des Strahlungswärmestromes etwas verbessert werden. Weiterhin wurden die Wärmeverluste über die Flanschverbindungen und Armaturen nur sehr grob abgeschätzt. Hier ist zu prüfen, ob sich eine genauere Ermittlung der Verlustwärmeströme mit verhältnismäßigem Aufwand umsetzen lässt.

8. Modellierung

▪ Entwicklung eines detaillierten numerischen Modells des Reformers

Bezugnehmend auf AE1.3 - Gesamtsystemische instationäre Simulation und Verfahrensentwicklung - wurde zur Simulation der Vorgänge im Reformer ein räumlich eindimensionales Modell in der Programmiersprache Modelica entwickelt und unter Nutzung von OpenModelica implementiert. Begründung dafür ist die einfache und flexible Beschreibung transienter physikalischer Modelle und der automatischen Umwandlung und Lösung des sich daraus ergebenden mathematischen Problems.

Das Modell wurde von Grund auf neu entwickelt und basiert hinsichtlich der stattfinden Reaktionen auf [50]. Es werden drei nichtgasförmige Stoffe (trockenes Holz, Wasserflüssigkeit und Koks (C)) und 8 Gase (CO_2, CO, CH_4, O_2, H_2, H_2O, N_2, Teer) verwendet. Die Modellierung der Prozesse im Reformer erfolgte unter besonderer Beachtung der thermischen Zustandsgleichung der festen Stoffe, da diese porös sind und in starker Wechselwirkung mit den Prozessen in der Gasphase bestehen.

Die zu lösenden Bilanzgleichungen für die Gesamtmasse, die Gas- und Feststoffmasse sowie für Energie und Impuls wurden mit Ansätzen für die Reaktionen nach [50] kombiniert, für die Dichte der Gasphase kommt die thermische Zustandsgleichung idealer Gase zum Einsatz. Weitergehende Details sind in [34] zu finden.

Im Projektverlauf wurde festgestellt, dass die Nutzung von Kinetikdaten aus [50] nur eine unbefriedigende Abbildung der Pyrolyse erlaubt, weshalb eine umfangreiche Recherche zur Modellierung der Pyrolyse durchgeführt wurde. Darauf aufbauend wurden experimentelle (thermogravimetrische) Untersuchungen (zusammen mit dem Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung (iTN) der HSZG) durchgeführt und eigene Methoden und damit eigene Kinetikansätze für die Pyrolyse entwickelt. Details dazu finden sich in [30] und [34].

Als Ausblick sei zu nennen, dass diese verbesserten Modelle der Pyrolyse für zukünftige Arbeiten am detaillierten Reformermodell genutzt werden sollten.

Darüber hinaus müssen die verwendeten Kinetikmodelle der heterogenen Reaktionen (Gas-Feststoff), insbesondere der Reaktionen von festem Kohlenstoff mit der Gasphase, weiter untersucht werden. Ein Grundproblem dabei ist, dass bei diesen Modellen die Fläche der Phasengrenzfläche naturgemäß eine große Rolle spielt, gleichzeitig aber dabei eine große Unsicherheit besteht, was auf die sich verändernde Feststoffstruktur während der Umsetzung im Reformer zurückführbar ist.

Es wurde mit umfangreichen Umbauten des Reformermodells begonnen: Die bisher vereinfachte Impulsbilanz wurde durch ein detailliertes, eindimensionales Strömungsmodell mit einer örtlich variablen Sauerstoffzufuhr ersetzt. Gleichzeitig wurde die Energietransportgleichung implementiert und erlaubt die Berechnung des Temperaturfeldes. Die größte Herausforderung dabei ist die numerische Behandlung des Zündverhaltens und den daraus resultierenden Beeinflussungen von Strömung und chemischen Reaktionen.

- Systemsimulation mit OpenModelica

Parallel zu der detaillierten Simulation der Prozesse im Reformer, wurde ein nulldimensionales Modell der gesamten Anlage inklusive der angeschlossenen Wärmequellen und -senken in OpenModelica erstellt und parametrisiert (siehe Abb. 2-81). Nulldimensional bezieht sich dabei auf die räumlichen Dimensionen, eine übliche Verfahrensweise bei der Systemsimulation bzw. Simulation von Netzwerken mehrerer Komponenten.

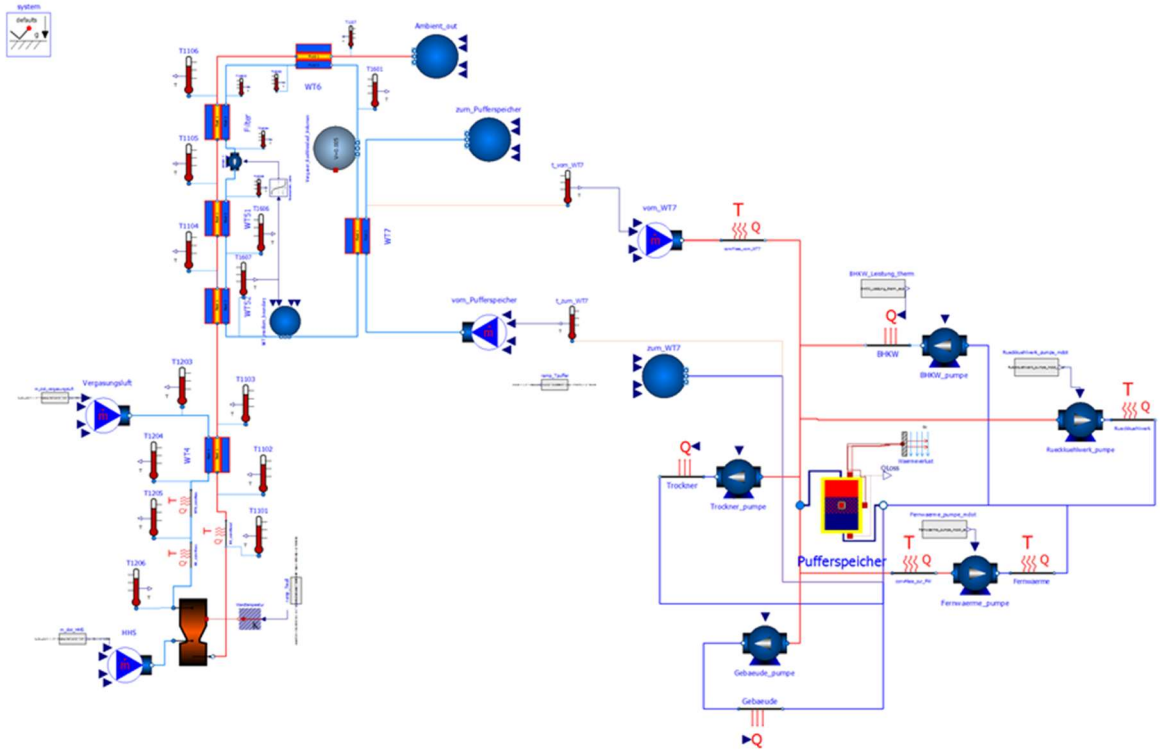


Abb. 2-81 Verfahrensfließschema der Systemsimulation

Es wurden mehrere neue Komponenten definiert, die vorhandene Komponenten erweitern oder eine gänzlich neue Funktion definieren:

- Pumpenmodell mit fest definiertem Massenstrom
- Reformer mit Mischung zweier Massenströme, Verbindung zu einer Wärmeschnittstelle (Heatport) und Vorgabe von Auslass-Massenanteilen
- Erweitertes Wärmeübertragermodell mit Wärmeabgabe an die Umgebung

- Rohrstück mit Masse und Wärmeabgabe an die Umgebung
- Doppelrohr-Wärmeübertrager

Das neue Modell des Doppelrohr-Wärmeübertragers nutzt die Gleichungen für den Druckverlust und Wärmeübergang in einem Ringspalt nach [51] und wurde mit dem in OpenModelica vorhandenen Rohrströmungsmodell sowie einem ebenfalls neu programmierten Modell für den Wärmetransport in einer zylindrischen Wand kombiniert. Darüber hinaus wurde das darin enthaltene 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.

Jede dieser Komponenten wurde in Tests hinsichtlich ihrer Funktion überprüft und mit neu erstellten Symbolen und Verbindungsschnittstellen versehen. Hinsichtlich der Medien kam gasseitig ein Gemisch aus sieben chemischen Spezies (O_2, CO, CO_2, H_2, H_2O, CH_4, N_2) und wasserseitig (für die Kühlkreisläufe) flüssiges Wasser zum Einsatz.

Aufgrund der fehlenden Kopplung des detaillierten Reformermodells wurde für die Temperaturen im Reformer ein auf Messdaten basierender zeitlicher Verlauf angenommen und eine entsprechende Funktion erstellt, die als Wandtemperatur in die Systemsimulation eingeht. Die Pumpenkennlinien der eingesetzten Pumpen sind durch konstante Betriebspunkte anhand gemessener Daten beschrieben worden. Während der Systemsimulation, die für 20.000 reale Sekunden ca. 2 Minuten Rechenzeit benötigt, wird ein Datensatz mit den Zeitverläufen aller Variablen und Parameter ausgegeben.

Im momentanem Arbeitsstand wurden für die Validierung die Temperaturverläufe in der Reformerluftstrecke, im Produktgas und dem Kühlkreis im Vergaser herangezogen und jeweils die gemessenen mit den simulierten Temperaturen verglichen. Als Messdatenbasis wurde dabei die Messung vom 16.-18.05.2018 herangezogen. In den nachfolgenden Abbildungen sind die sich daraus ergebenden Vergleichsdiagramme dargestellt. Gemäß Abb. 2-82 ist die Übereinstimmung zwischen simulierten Werten und Messwerten sehr gut.

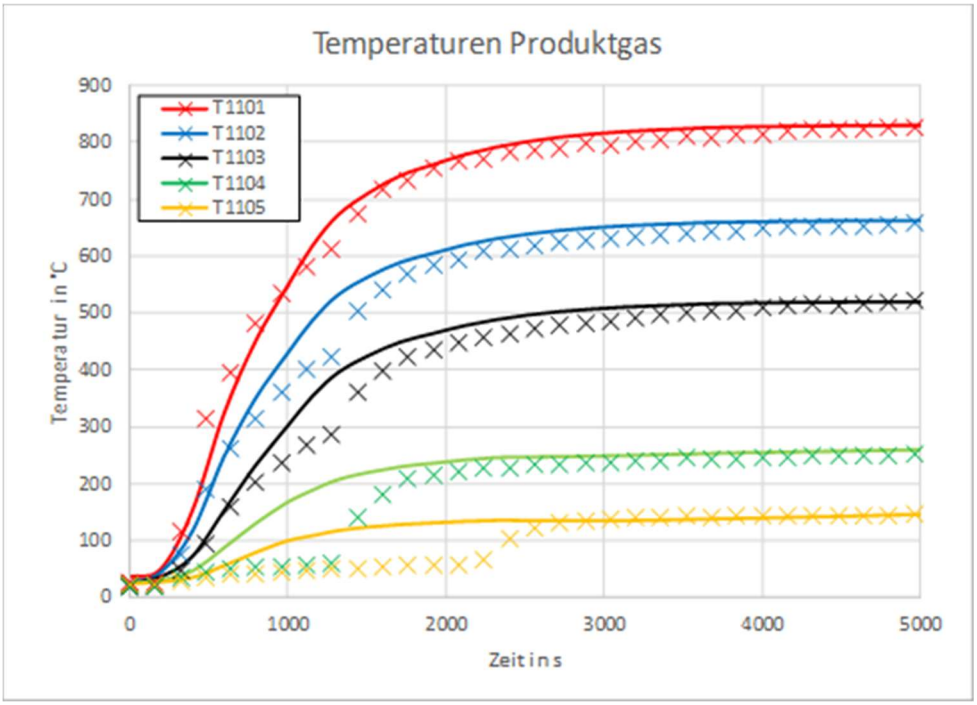


Abb. 2-82 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf in der Produktgasstrecke

Lediglich die Temperaturen nach den Wärmeübertragern WT5-1 (T1104) und WT5-2 (T1105) weisen einen etwas verzögerten Verlauf gegenüber den Messdaten auf. Begründung dafür ist die ungenügende Modellierung des Vergaser-Kühlkreislaufes bedingt durch den Einfluss des Pufferspeichers und der daran angeschlossenen Wärmequellen und -senken.

Aus Abb. 2-83 wird ersichtlich, dass deutliche Unterschiede zwischen den gemessenen und rechnerisch ermittelten Temperaturen bei der Reformerluftstrecke existieren. Diese sind sowohl durch die die Wärmeübertragungseffekte im Nachreformer bedingt, die bisher nur ungenügend wiedergegeben werden können, aber auch durch eine noch nicht erfasste thermische Trägheit des Wärmeübertragers WT4. Der große Temperaturunterschied der Messstelle „T1204“ beruht zum Großteil auf einer ungenauen Messung der Temperaturen, die durch CFD-Simulationen (siehe nachfolgender Abschnitt) und Nachrechnung der Energiebilanz des Wärmeübertragers auch bestätigt werden konnte.

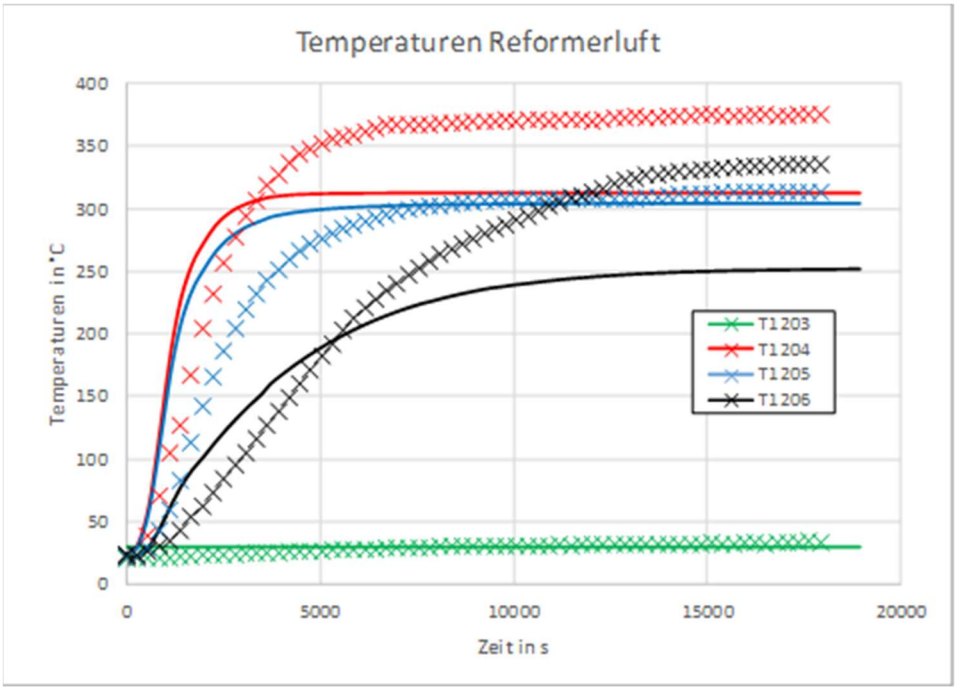


Abb. 2-83 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf in der Reformerluftstrecke

Wie schon erwähnt, wurden der Pufferspeicher und die daran angeschlossenen Wärmequellen und -senken mit modelliert, aber die Massenströme der Wärmeträgermedien aus den Pumpenkennlinien und basierend auf vorhandenen Messdaten abgeschätzt. Insofern sind die in Abb. 2-84 und Abb. 2-85 gezeigten Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsdaten erwartbar. Der grundsätzliche Verlauf wird aber qualitativ gut abgebildet und bestätigt die prinzipielle Eignung der Systemsimulation zum Nachvollziehen des Systemverhaltens.

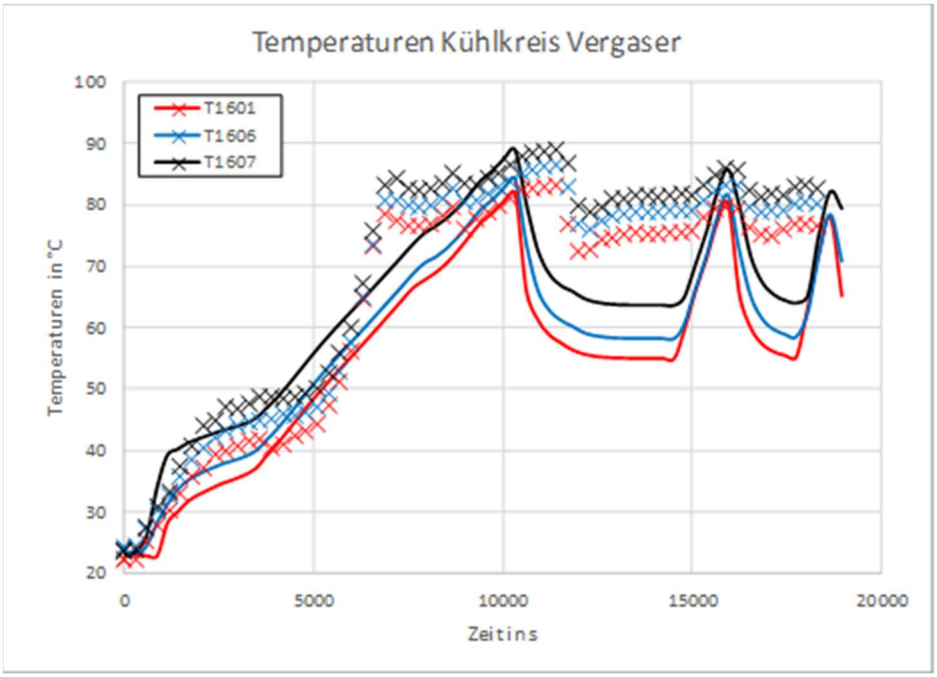


Abb. 2-84 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf im Kühlkreislauf des Vergasers

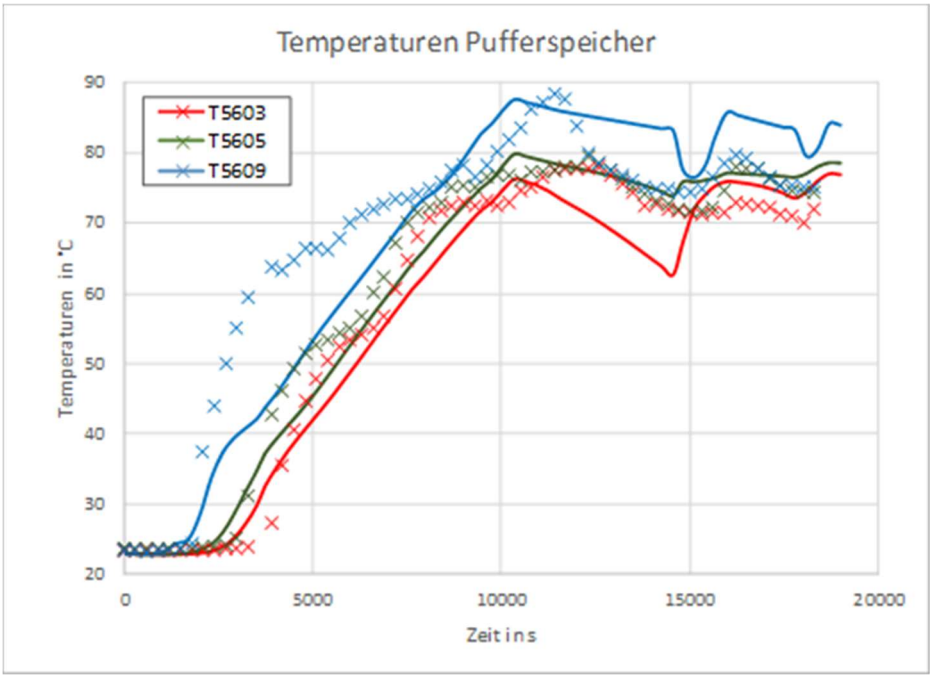


Abb. 2-85 Vergleich zwischen gemessenem (Markierungen) und simuliertem (durchgezogene Linien) Temperaturverlauf an drei Messstellen im Pufferspeicher

Bei der Ergebnisauswertung wurden darüber hinaus 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 wurden kleinere Detailberechnungen durchgeführt (instationäre Simulation der Rohrleitung vom Pufferspeicher zur Fernwärmeübergabestation), welche das vorhandene Wissen über die thermischen Verluste der Versuchsanlage bereichert hat.

- CFD-Simulation von Wärmeübertrager, Filter und Pufferspeicher

Zur Erhöhung der Modellqualität und Überprüfung wurden von zwei ausgewählten Komponenten (Wärmeübertrager WT4, Filter) dreidimensionale CFD-Simulationen (engl. Computational Fluid Dynamics) erstellt, deren Ergebnisse auf die Parameter der in der Systemsimulation verwendeten entsprechenden Komponenten übertragen wurden. Darüber hinaus konnte mittels der CFD-Analysen Erkenntnisse zu Detailprozessen der Strömung und des Energietransportes gewonnen werden, die auch zur Verbesserung der messtechnischen Auswertung herangezogen werden konnten. Weiterführende Informationen dazu sind in [30] zu finden.

Die Unterschiede zwischen der CFD-Simulation und den Messergebnissen deuten auf unterschiedliche äußere Randbedingungen (ungenügende Wiedergabe der Dämmung und Wärmebrücken) und ungenügende Modellierung der durch die Filterbeladung veränderten Strömungsvorgänge hin. Im Ergebnis der CFD-Analyse konnte das Augenmerk auf die Komponente Filter bei der Systemsimulation gerichtet werden und die grundlegende Modellierung und Parametrisierung daran angepasst werden.

- CFD-Simulation des Pufferspeichers

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 und mit experimentell ermittelten Daten sowie einer OpenModelica-Simulation verglichen. Es wurde ersichtlich, dass die Abkühlkurven (mittlere Temperaturen) der Simulationen von den Messergebnissen am Ende der 6 Tage um ca. 5 K abwichen. Dieser Unterschied deutet auf einen im Experiment höheren Wärmestrom (im Mittel ca. 200 W) vom Pufferspeicher an den Raum hin.

Über den Grund für diese Abweichung gibt es bisher nur Vermutungen. So ist vorstellbar, dass die zur Dämmung verwendete Mineralwolle eine größere Wärmeleitfähigkeit aufweist und/oder dass die verschiedenen, die Dämmung durchquerenden Einbauten (Heizregister, Temperaturmessstellen) Wärmebrücken darstellen. Die Genauigkeit der Temperaturmessstellen scheint durch experimentelle Untersuchungen (Erfassung der Austritts- und Eintrittstemperaturen durch zusätzliche Temperaturmessstellen), zumindest im stationären Fall, gegeben.

- CFD-Simulationen zur Pulsationsdämpfung

Die experimentellen Arbeiten zum Pulsationsverhalten des Gasspeichers im Labormaßstab wurden durch numerische Simulationen (CFD, Computational Fluid Dynamics) begleitet. Ziel war, ein rechenfähiges und skalierbares Modell zu erstellen um es mit den Messdaten vergleichen zu können. Darüber hinaus sollten die Simulationen mit zwei unabhängige Softwarepakete (COMSOL Multiphysics und OpenFOAM) realisiert werden, um Modellunsicherheiten und Lösungsfehler abschätzen zu können.

Ausgangspunkt war die in Abb. 2-86 gezeigte Geometrie des Laborversuchsstandes mit einem stirnseitig eingebrachten Rohr (Innendurchmesser 10 mm). Abgebildet ist ebenfalls das resultierende Tetraedernetz nach der Vernetzung in COMSOL. Für OpenFOAM wurde diese Geometrie in der freien CAD-Software Salome aufbereitet und anschließend mit SnappyHexMesh (Bestandteil von OpenFOAM) vernetzt.

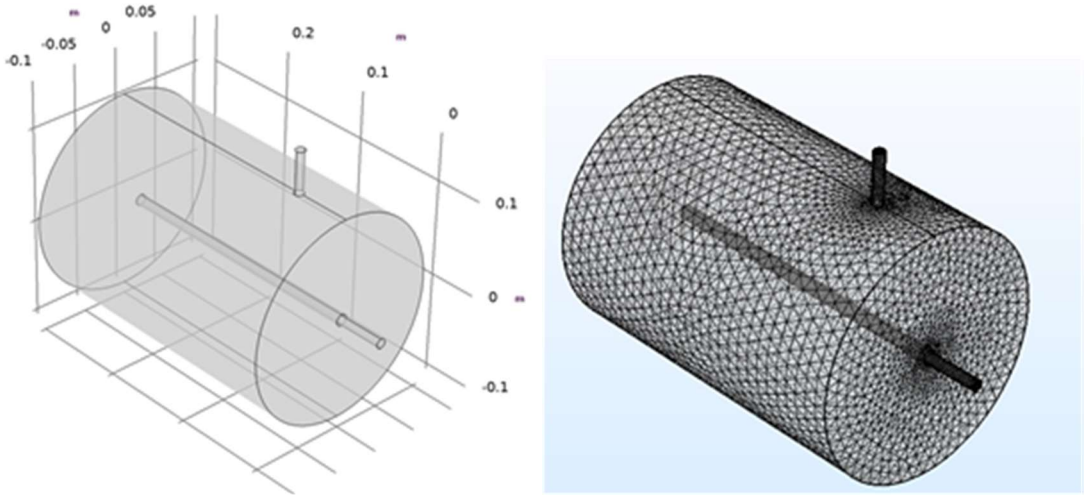


Abb. 2-86 Geometrie und Gitternetz für die Simulation mit Comsol

Die Simulation wurde instationär (ausgehend von ruhendem Fluid, simulierte Zeit 1 s), k-epsilon-Turbulenzmodell, kompressiblem Gasmodell und im Falle von COMSOL isotherm mit 20 °C gerechnet. Der in OpenFOAM verwendete Solver (rhoPimpleFoam) rechnet standarmäßig nichtisotherm und wurde mit adiabaten Wänden und einer Einlasstemperatur von ebenfalls 20 °C als Randbedingungen benutzt. Bei der Einlassrandbedingung wurden zur Orientierung die Daten der Versuchsanlage verwendet, so dass eine sinusförmige Geschwindigkeit mit einer Frequenz von 10 Hz, einer Amplitude von 1 m/s und einem Mittelwert von 5,6 m/s verwendet wurde.

Im Ergebnis konnten die berechneten Felder für alle Zeitschritte ausgewertet werden, wobei im Wesentlichen die Geschwindigkeit und der Druck betrachtet wurden. Zwei entsprechende Darstellungen sind in Abb. 2-87 beispielhaft dargestellt. Anhand der Daten wird deutlich, dass sich die Drücke und Geschwindigkeiten wie erwartet mit einem zeitlichen Versatz im Strömungsraum verhalten und ihre Maxima und Minima zu unterschiedlichen Zeiten aufweisen.

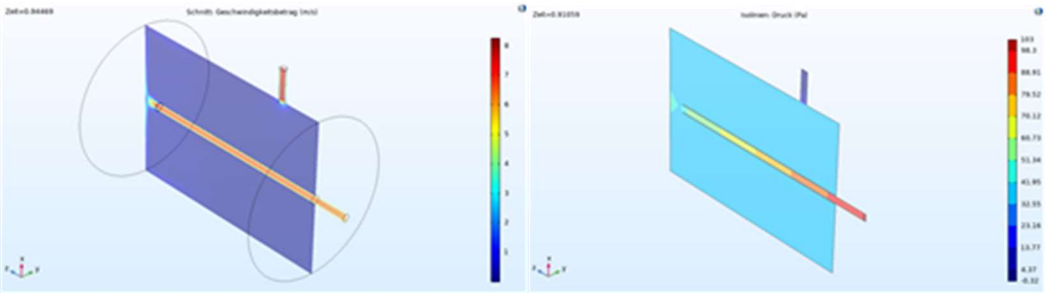


Abb. 2-87 Geschwindigkeits- und Druckverteilung entlang der mittleren Schnittebene an ausgewählten Zeitpunkten für die Simulation mit Comsol

Zur Abschätzung der Pulsationsdämpfung wurden die zeitlich variierenden Einlass- und Auslassgeschwindigkeiten ausgewertet und das Ergebnis in Abb. 2-88 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Ergebnisse der zwei verwendeten Softwarepakete kaum Unterschiede zueinander aufweisen. Es ist nur ein sehr geringer zeitlicher Versatz bei den Auslassgeschwindigkeiten auszumachen.

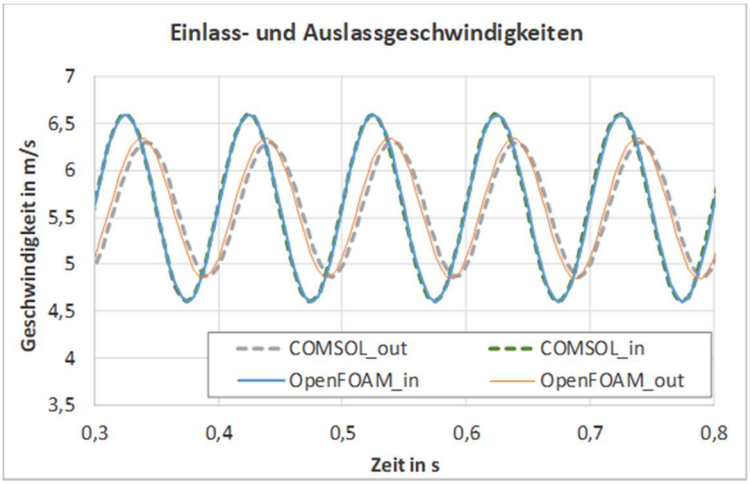


Abb. 2-88 Zeitlicher Verlauf der Einlass- und Auslassgeschwindigkeit der Simulationen von COMSOL und OpenFOAM

Da im OpenFOAM-Solver die Energiegleichung gelöst und damit das Temperaturfeld mitgerechnet wurde, konnte untersucht werden, wie groß die simulierten Temperaturschwankungen waren und ob der in COMSOL verwendete isotherme Modellansatz gerechtfertigt ist. Nach Auswertung der Temperaturen wurde festgestellt, dass die Schwankung der Temperatur ungefähr einen Betrag von 0,01 K aufweist und damit nahezu isotherme Bedingungen herrschen.

- Strukturmechanische Simulationen zur Auslegung des Behälters und des Gestells bzw. der Rahmenkonstruktion des Speicherprototyps

Während der Konstruktion des Speicherprototyps wurden Detailfragen bezüglich der Auslegung und Festigkeit des Speicherbehälters sowie der Rahmenkonstruktion durch begleitende Simulationen mit dem Strukturmechanik-Modul von COMSOL Multiphysics

durchgeführt. Im Gegensatz zu den fluidmechanischen (CFD) Simulationen werden dabei die Verschiebungen und Spannungen aufgrund von Belastungen berechnet.

Wie in Abb. 2-89 erkennbar, ist die Dimension (Höhe x Breite x Tiefe) des Behälters ca. 1 m x 1 m x 0,5 m. Da ein Stahlblech mit einer Dicke von 2 mm verwendet werde sollte, musste sichergestellt werden, dass dieses (in Verbindung mit dem Gestell bestehend aus Aluprofilen) einer Belastung durch das Fluid auch standhalten kann. Die inneren Wände wurde daher mit einer dem hydrostatischen Druck entsprechenden Druckkraft beaufschlagt, wobei von einer Fluiddichte von Wasser ausgegangen wurde.

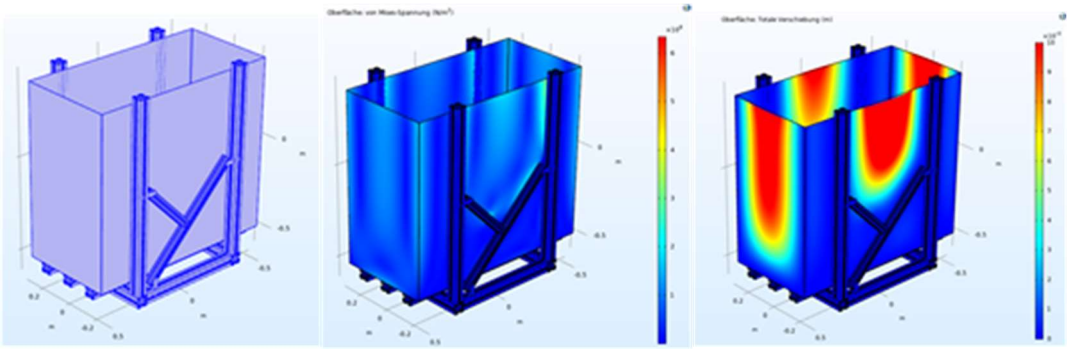


Abb. 2-89 Geometrie und Spannungen sowie Verschiebung des konstruierten Behälters und der Rahmenkonstruktion des Speicherprototypes

Im Ergebnis (siehe Abb. 2-89) wird erkennbar, dass in der Simulation die auftretenden Spannungen im Bereich der 0,2 %-Dehngrenzen (2e8 N/m² für nichtrostende Stähle) liegen und mit einer maximalen Verschiebung von ca. 10 mm gerechnet werden kann.

- Einbau und Test eines zusätzlichen Drucksensors zur Erfassung des Volumenstromes des Vergasungsmittels

Da bei den Messfahrten die Volumenströme des Vergasungsmittels eine große Schwankungsbreite aufweisen, wurde versucht die Ursachen dafür zu finden. Basis der Volumenstrommessung ist der Einsatz einer Pitot-Sonde und Nutzung eines geeigneten Differenzdrucksensors an der Messstelle F1201, so dass der bei den Messfahrten standardmäßig verwendete Drucksensor (Typ Sensirion SDP1000-L05 (-5…+125 Pa)) hinsichtlich seiner Eignung untersucht werden sollte. Aufgrund des großen Messbereichs im Verhältnis zum Messsignal (bis ca. 25 Pa) und des Messprinzips (MEMS-Sensor mit thermischer Massendurchflussmessung) bestanden Zweifel an der Messgenauigkeit und der Erfassung des Messsignals.

Aus diesem Grund wurde ein zusätzlicher Differenzdrucksensor (Typ Setra 267 (0…25 Pa)) beschafft und parallel zum vorhandenen an die Messstelle angeschlossen. Vorteil dieses Drucksensors ist der geringere Messbereich und die Messung des Druckes ohne Durchfluss mittels eines kapazitiven Sensors. Die Messungen wurden während der Messfahrt am 21.8.2018 durchgeführt. In Abb. 2-90 sind die Verläufe der Volumenströme der beiden Drucksensoren dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Schwankungen der mittels Setra-Drucksensor gemessenen Volumenströme etwas geringer sind, als die durch den Sensirion-Drucksensor ermittelten Messwerte. Trotzdem weisen die Schwankungen immer noch ein unbefriedigendes Niveau auf. Die Mittelwerte und damit die für die Massenbilanzierung wichtigen Messwert stimmen dagegen gut miteinander überein.

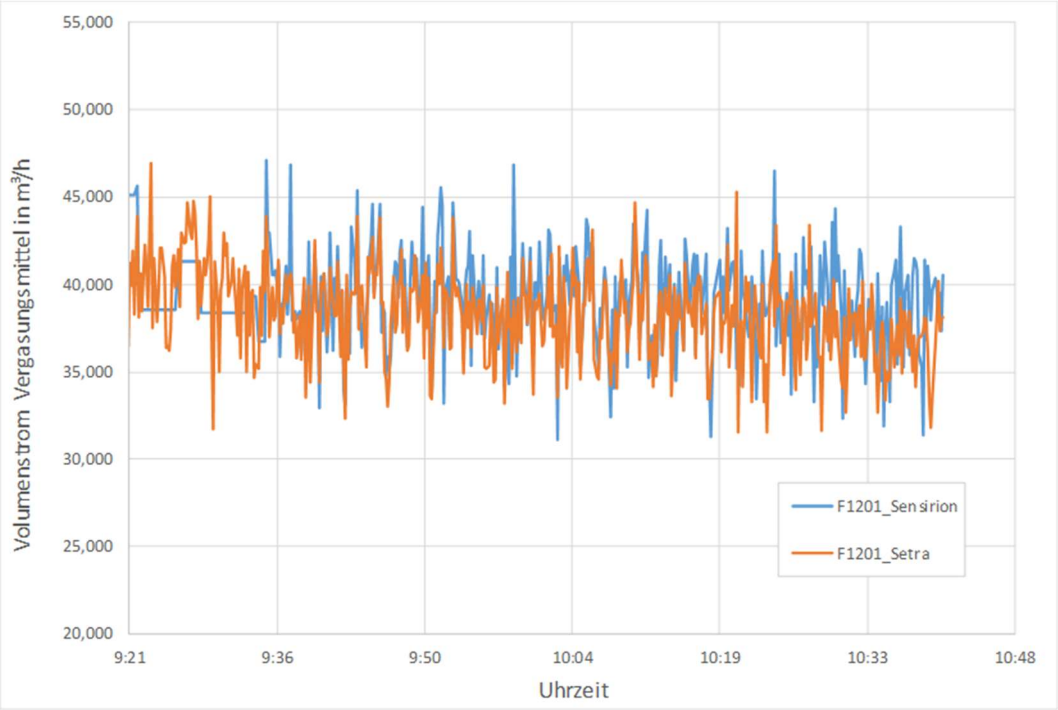


Abb. 2-90 Zeitlicher Verlauf des Volumenstromes des Vergasungsmittels an der Messstelle F1201

Schlussfolgernd konnte festgestellt werden, dass der Messwert systematischen Schwankungen unterliegt und nicht der Messwerterfassung zugeschrieben werden können.

Mit Hilfe eines parallel angeschlossenen Oszilloskops (Fa. PicoScope) wurde das Messsignal weiter untersucht. Neben den zeitlichen Messdaten (siehe Abb. 2-91) konnte ein Frequenzspektrum aufgezeichnet werden, das in Abb. 2-92 dargestellt ist.

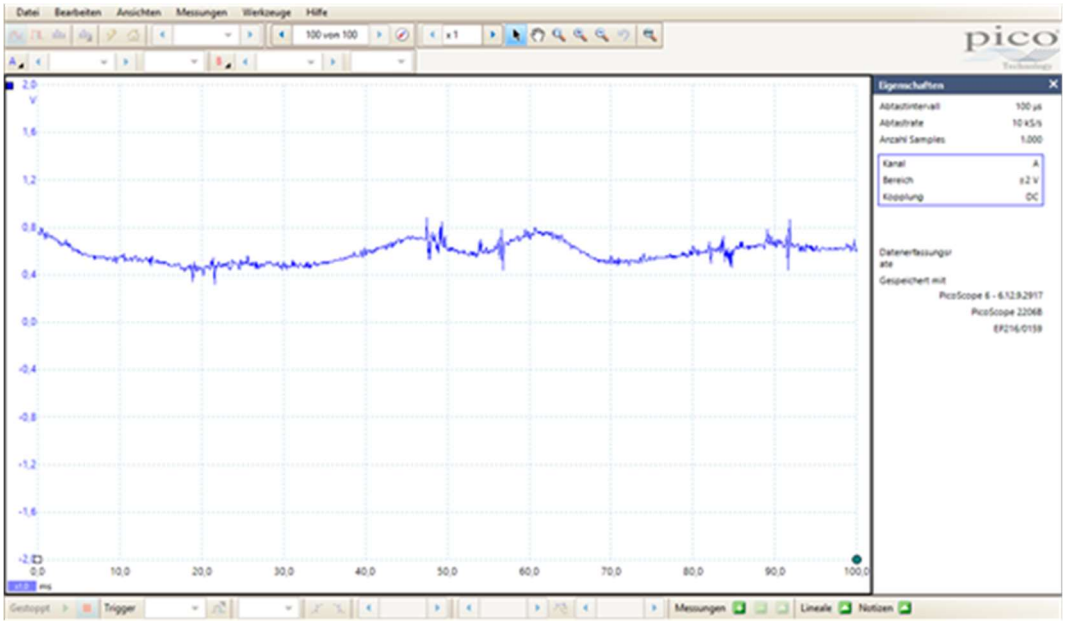


Abb. 2-91 Zeitlicher Verlauf des Messsignals des Drucksensors

Im Frequenzspektrum wird die Pegeleinheit dBu (bezogen auf einen Bezugspegel von 775 mV) über den Frequenzen von 0 bis 100 Hz angezeigt. Es wird deutlich, dass alle Frequenzen auftreten und nur mäßige Unterschiede vorhanden sind. Aus diesem

Ergebnis kann der Schluss gezogen werden, dass keine einzelne Frequenz oder ein bestimmtes Frequenzband und damit auch kein einzelnes Bauteil (z.B. eine Pumpe oder ein mechanisch bewegtes Teil) für die Schwankungen verantwortlich sind. Wahrscheinlich ist die Turbulenz der Strömung Ursache der Schwankungen. Dieses Verhalten ließ sich in einem ersten Versuch auch durch Einbringen von zusätzlichen Strömungshindernissen in den Ansaugkanal zur Strömungsgleichrichtung bzw. Pulsationsdämpfung nicht verändern und sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Möglicherweise ist die Gestaltung der Druckmesssonden ungünstig oder es gibt Rückkopplungen mit Drehschieber und Pumpe.

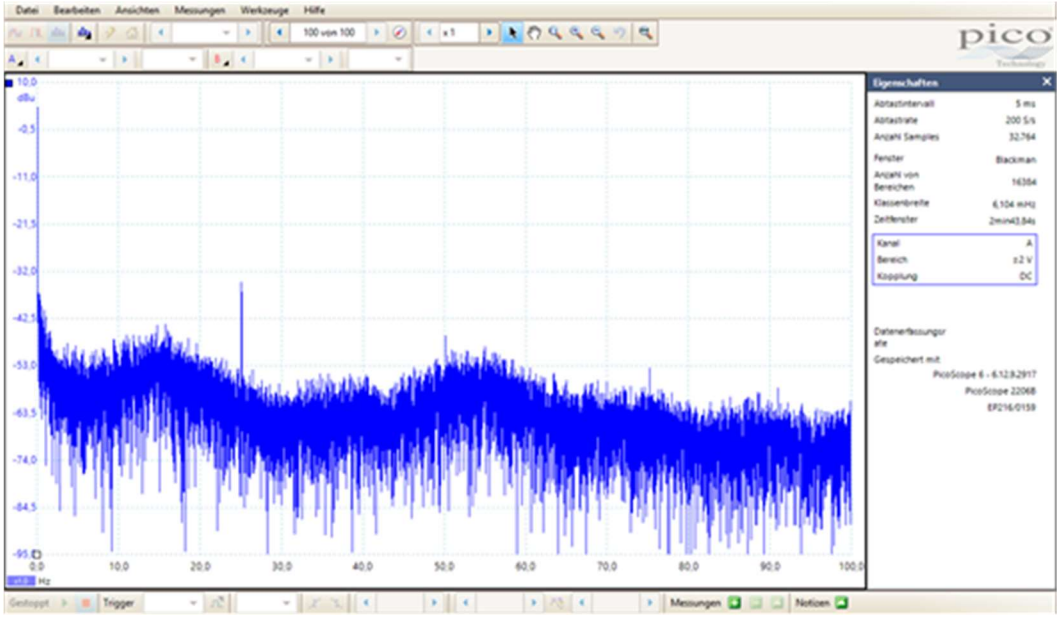


Abb. 2-92 Frequenzspektrum des Messsignals des Drucksensors

9. Versuchsstand Wirbelschicht

Mit dem Versuchsstand Stationäre Wirbelschicht, wird der Grundgedanke niederkalorische Brennstoffe thermisch zu verwerten neu aufgegriffen. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass aufgrund der Effizienz des Verfahrens auch Materialien mit geringen Heizwerten (bis 3,5 MJ/kg) sich einsetzen lassen. Die bestehende Anlage soll hier zu Testzwecken für das nachfolgende Projekt reaktiviert werden, um die thermische Verwertung mit den genannten Vorteilen zu demonstrieren.

▪ Allgemeine Funktion

Das in Abb. 2-93 dargestellte Prinzip der stationären Wirbelschichtfeuerung zeigt die Komplexität im Reaktor sowie die voneinander abhängigen Parameter für eine erfolgreiche thermische Umsetzung von biogenen Materialien.

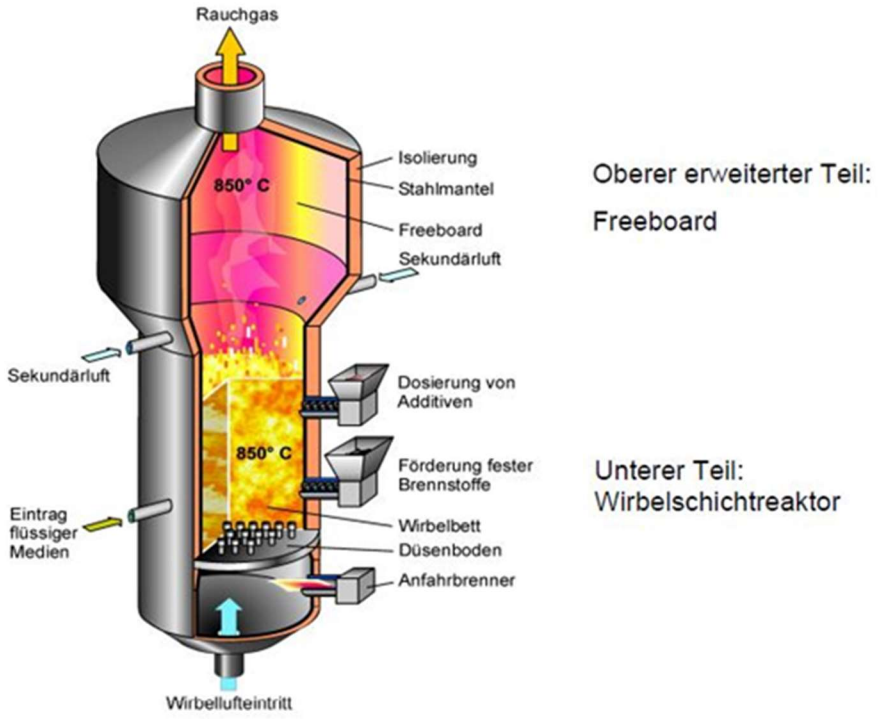


Abb. 2-93 Prinzip der Wirbelfeuerung nach [26]

In Wirbelschichtfeuerungen wird ein Zweiphasen-Gas-Feststoffsystem realisiert. Durch die Fluidisation wird aus einer Feststoffschüttung eine Pseudoflüssigkeit mit den typischen Eigenschaften einer Flüssigkeit:

- horizontaler „Flüssigkeits-"Spiegel (im Ruhezustand immer vorhanden)
- „hydrostatischer" (Schwere-)Druck
- Gültigkeit des Archimedes'schen Prinzips (Auftrieb und Schwimmen)
- Unabhängigkeit des hydrostatischen Drucks von der Gefäßform

Der Druckverlust der Schicht ergibt sich aus der Bettmasse je Querschnittsfläche des Wirbelschichtreaktors [52]. Der Düsenboden trägt die Wirbelschicht, die aus einem Inertstoff (hier Sand) mit bekanntem Partikelspektrum aufgebaut ist. Der Inertstoff ist funktionell notwendig, um durch Verdünnung des Brennstoffs die unterschiedlichen Luftmengen für Fluidisation (niedrig) und für die Verbrennung (sehr hoch) auszugleichen. Im Normalbetrieb ist die Brennstoffkonzentration in der Inertstoffschicht deutlich geringer als 1 Ma.-%.

Die Wirbelluft (= Verbrennungsluft) wird von einem Rootsgebläse gefördert, tritt von unten in den Reaktor ein und wird im nach oben durch den Düsenboden abgeschlossenen „Luftkasten" durch Luftdüsen gleichmäßig auf den verfügbaren Reaktorquerschnitt verteilt. Die Schicht wird vom Wirbelluftstrom von unten nach oben durchströmt. Übersteigt die Strömungsgeschwindigkeit die (minimale) Fluidisierungsgeschwindigkeit, so geht die ursprünglich vorhandene Sandschüttung in einen flüssigkeitsähnlichen (fluidisierten) Zustand mit exzellenten Bedingungen für Wärmeübertragung und chemische Reaktionen über. Durch die Wahl des Querschnitts des Wirbelschichtapparats wird der sich für bestimmte Betriebsbedingungen (Wirbelluftdurchsatz, Temperatur, …) einstellende Betriebspunkt festgelegt.

Der Raum oberhalb der fluidisierten Schicht, der Freeboard, ist im Querschnitt gegenüber dem Reaktor erweitert. Er dient zum einen als Raum für mögliche Nachreaktionen, zum anderen ermöglicht er wegen der verminderten

Strömungsgeschwindigkeit (Querschnittserweiterung) den aus der Schicht ausgetragenen Partikeln die Umkehr zurück in das Wirbelbett. Die Dimensionierung des Freeboards entscheidet über Menge und Kornspektrum des Bettmaterialaustrags (und des kontinuierlichen oder diskontinuierlichen notwendigen Bettmaterialersatzes) und damit letztlich auch über das sich im Dauerbetrieb einstellende Kornspektrum des Inertmaterials im Wirbelschichtreaktor [53].

Durch die Auswahl des Inertstoffmaterials (z.B. Quarzsand, Olivinsand, …) können bestimmte chemische Reaktionen zusätzlich katalytisch beeinflusst werden. Die Verbrennungsreaktionen können durch die Wahl geeigneter Betriebsbedingungen (z.B. Bettmasse, Partikeldurchmesser, Betriebsgeschwindigkeit) so beeinflusst werden, dass sie ausschließlich in der fluidisierten glühenden Inertstoffmasse stattfinden und es nicht mehr zur Ausbildung von Flammenfronten oberhalb der Schicht kommt.

Das im Reaktor erzeugte Abgas geht direkt über den Rauchgasabzug in die Umgebung nach außen. Die Prozesstemperatur zwischen 800 °C und 900 °C verhindert die Bildung von thermischen NOx.

- Ausführung

Die Anlage besteht aus mehreren Komponenten, die in Abb. 2-94 aufgeschlüsselt sind. Durch den kompakten Aufbau können Messfahrten, im Sinne der Dezentralität von Anlagen, im Kleinstmaßstab durchgeführt werden.

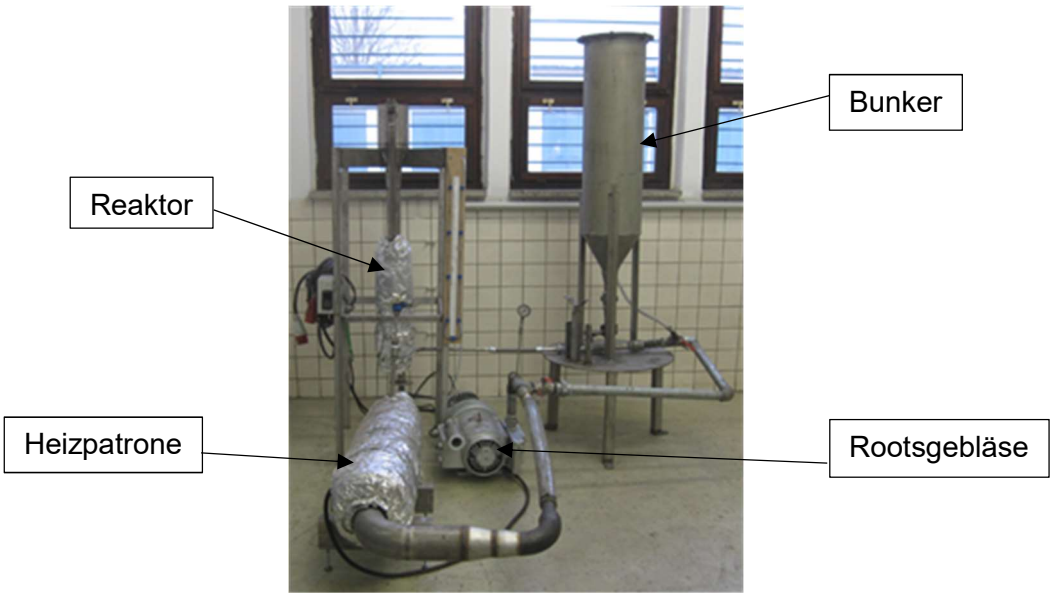


Abb. 2-94 Aufbau stationäre Wirbelschicht

Für die thermische Verwertung von hochkalorischen Rest- und Brennstoffen aus dem Faserverbundbereich sind noch keine empirischen Daten zu deren Verhalten im Verbrennungsprozess vorhanden.

In folgenden Projekten mit KMU aus dem Wertstoffrecycling sollen Abbrandverhalten, Abgaszusammensetzung sowie der Prozess mit hochkalorischen Brennstoffen in stationären Wirbelschichtverfahren analysiert und optimiert werden. Dieser wissenschaftliche Beitrag wird die effiziente Verwertung von Produkten aus Faserverbundwerkstoffen in ihrem „end of life“-Stadium entscheidend voranbringen und somit einen wichtigen Beitrag zur Bewältigung der bevorstehenden Abfallmassen an Faserverbundbauteilen leisten.

2.3.2 Vergleich zu Fortschritten bei anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen

Im Bereich der Aufbereitung biogener Brennstoffe mit dem Mittel der thermochemischen Vergasung gibt es nach dem öffentlich zugänglichen Kenntnisstand keine strukturellen Innovationen. Auch inkrementielle Fortschritte werden nicht sehr zügig vorangetrieben, weil durch den weitgehenden Wegfall der EEG-Förderung die Nachfrage nach der Technologie in Deutschland zum Erliegen gekommen ist und kaum Geschäftserwartungen für Weiterentwicklungen zur Verfügung stehen. Weitgehend wird versucht, jeweilige Detail- und Anwendungsprobleme grundsätzlich unterschiedlicher Ansätze wie die absteigende Vergasung (Spanner Re² GmbH, Entrade Energiesysteme AG) und aufsteigende Vergasung (Burkhardt GmbH, SynCraft GmbH) zu lösen. Wie schon im Kapitel 2.2.1 beschrieben und dargestellt, war bis 2014 vor allem in Deutschland ein starker Anstieg der installierten Biomasse-Vergasungs-BHKW zu verzeichnen. Mit Änderung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland durch die Novellierung des EEG, verbunden mit einer reduzierten Einspeisevergütung konnte nur noch ein geringer Anstieg der Anlagenanzahl festgestellt werden. Die Anlagenhersteller intensivierten in Folge dessen den Export, sodass der internationale Markt im Vergleich zum deutschen Markt mit einem stärkeren Wachstum verbunden ist. Die Forschungsaktivitäten der Hersteller aber auch der Forschungseinrichtungen befassen sich gegenwärtig mit der Nutzung qualitativ minderwertigerer Biomasse. So laufen derzeit zwei Forschungsprojekte des DBFZ (GASASH (FKZ: 03KB139); VergaOpt (FKZ: 03KB135)), die in Zusammenarbeit mit Anlagenherstellern (LiPRO Energy GmbH & Co. KG, Spanner Re² GmbH) die Einsatzeignung von Reststoffen (Landschaftspflegematerial, Gärreste) in marktverfügbaren Anlagen untersuchen. Darüber hinaus wird im von der niederländischen B.T.G. Biomass Technology Group BV koordinierten EU-Forschungsprojekt SmartCHP (Grant agreement ID: 815259) ein neues KWK-System für biogene Reststoffe entwickelt. Auch RWE plant eine Versuchsanlage (Multi-Fuel-Conversion-Anlage (MFC)) auf Basis der Vergasungstechnologie, in der Gemische von Klärschlamm, Klärschlammasche und Braunkohle hohen Temperaturen um 1.500 °C und starkem Sauerstoffmangel ausgesetzt werden. In der MFC-Anlage kann dann nicht nur der Phosphoranteil des Klärschlamms zurückgewonnen werden, sondern auch ein Teil des Kohlenstoffs. Denn das Material wird nicht verbrannt und damit vollständig zu CO_2 und Wasserdampf umgewandelt. Vielmehr entsteht ein Synthesegas, eine Mischung aus CO und Wasserstoff, dass in der chemischen Industrie als Rohstoff eingesetzt werden kann. Das Verfahren kann so einen wichtigen Beitrag für eine zukünftige Kreislaufwirtschaft leisten – nicht nur in Bezug auf Phosphor, sondern auch auf Kohlenstoff; und auch nicht nur für Klärschlamm, sondern auch für andere kohlenstoffhaltige Materialien, wie Abfälle oder Biomasse [54].

Im Bereich der Entwicklung thermischer Energiespeicher besteht ein enger Kontakt zu anderen Forschungseinrichtungen in Deutschland, die sich ebenfalls mit dieser Thematik beschäftigen, so z.B. zum Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) am Standort Garching, zu verschiedenen Fraunhofer-Instituten (z.B. dem Fraunhofer IFAM Dresden oder dem Fraunhofer UMSICHT Sulzbach-Rosenberg) und zum Institut für Energietechnik der TU Dresden. Zugegebenermaßen ist die wissenschaftliche „Community“ im Bereich der latenten Wärmespeicherung überschaubar. Dabei richtet sich der Blick nicht nur auf die Entwicklung latenter Wärmespeicher für die Betriebsoptimierung dezentraler Energieerzeugungsanlagen.

Prinzipiell sind während der Bearbeitung des Projektes keine Fortschritte anderer Forschungseinrichtungen bekannt geworden, die die Ergebnisse des hier dokumentierten Projektes tangieren oder in Frage stellen. Die Adaptierung der Rohrbündel-Wärmeübertrager-Technologie für latente Wärmespeicher ist kein neuer

Ansatz, sondern ein gut geeigneter Weg zur erfolgreichen Entwicklung kapazitäts- und leistungsoptimierter Latentwärmespeicher unter Anwendung verfügbarer und kostengünstiger Fertigungstechnologien.

Die Beobachtung der Aktivitäten anderer Forschungseinrichtungen und Unternehmen zeigt, dass sehr intensiv an der Verkapselung von Phasenwechselmaterialien in Kunststoffen gearbeitet wird, um auf dieser Basis sog. hybride Wärmespeicher zu entwickeln, die die hohe Leistung eines sensiblen Wärmwasserspeichers mit der hohen Speicherkapazität der latenten Wärmespeicher kombinieren. Informationen bezüglich marktverfügbarer Latentwärmespeicher für den speziellen Anwendungszweck wie hier im Projekt erforderlich, sind nach wie vor nicht bekannt.

2.4 Verwertungspotenzial der Vorhabensergebnisse

2.4.1 Beiträge des Vorhabens zur Erhöhung der eigenen wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit

In der Arbeitsgruppe des Teilprojektleiters Prof. Zschunke wurden insbesondere die mess- und analysetechnischen Fähigkeiten weiterentwickelt. Dies ist besonders bedeutsam unter dem Aspekt der spezifischen Eigenschaften der Brennstoffe und Zwischenprodukte dieses Prozesses und unter dem Aspekt der Vielstufigkeit der Verfahren. So konnten die Fähigkeiten des Teams und seiner Mitglieder weiterentwickelt werden, um komplexe energieverfahrenstechnische Prozesse noch umfangreicher als bisher zu diagnostizieren, zu beherrschen und zu verbessern. Insbesondere gilt dies für Emissionsminderung und Effizienzsteigerung.

Ein großer Schritt für die Erhöhung der wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit des Teams war der Prozess der Nutzbarmachung der Laser-Doppler-Technologie für die Analyse des Hauptproduktgasstroms. Hintergrund ist, dass die absolute Genauigkeit aller gängigen Volumenstrom-Messverfahren bisher nicht ausreicht, um als belastbare Primärinformation in die Prozessanalyse einzugehen. Mit der Erschließung der Möglichkeiten des erworbenen und angepassten Laser-Doppler-Anemometers (LDA) wurde die Fähigkeit implementiert, ausgeprägte Strömungsprofile in partikelbeladenen Gasströmungen berührungsfrei zu messen. Im Zusammenhang damit ist auch die Integration eines Gasmessgeräts nach dem Prinzip Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) zu sehen. Wodurch die Leistungsfähigkeit zur Analyse von Gasströmungen ebenfalls erweitert werden konnte.

Prof. Zschunke und Hr. Schneider waren Mitglied einer VDI-Arbeitsgruppe zur Ausarbeitung der VDI 3461 „Emissionsminderung Thermochemische Vergasung von Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplung“ deren Weißdruck im Dezember 2018 erschienen ist. Zahlreiche Ergebnisse aus dem Projekt TCV III sind in diese Richtlinie eingeflossen.

In der Arbeitsgruppe des Teilprojektleiters Prof. Meinert wurden während der Laufzeit des Projektes TCV III mehrere Forschungsprojekte bearbeitet, die die Entwicklung latenter oder hybrider thermischer Energiespeicher zum Inhalt hatten. Das Projekt TCV III deckte dabei einen ganz wesentlichen Aspekt ab, nämlich die Entwicklung latenter Wärmespeicher mit maßgeschneiderten Eigenschaften (Kapazität, Leistung, Temperaturniveau) auf der Basis einer Rohrbündel-Geometrie. Andere Projekte fokussierten auf Plattengeometrien oder die Verkapselung der PCM in Kunststoffen, sodass diese sich in idealer Weise ergänzten. Ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal des Projektes TCV III besteht darin, dass hier prototypische Speicher im Technikumsmaßstab für den praktischen Einsatz an einem BHKW entwickelt und gebaut wurden, die im Anschlussprojekt HORA umfangreichen Praxistests unterzogen werden sollen. Die genannten Fakten unterstreichen den bedeutsamen Anteil des Projektes an

der Vervollkommnung der wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit der Arbeitsgruppe ganz besonders in Bezug auf die Überführung latenter Wärmespeicher in die Praxis. Neben dem deutlichen Ausbau des grundlegenden fachlichen Knowhows im Bereich der Latentwärmespeicherung innerhalb des Fachgebietes sind dieser Praxisbezug und die daraus resultierenden Erfahrungen von großer Bedeutung und erhöhen die wissenschaftliche Reputation.

Bei der wärmetechnischen Auslegung der Latentwärmespeicher wurde – wie auch in anderen laufenden Projekten – offensichtlich, dass die Kenntnis der thermophysikalischen Stoff- und Transportgrößen der Speichermedien (Phasenwechselmaterialien) von großer Bedeutung für die Qualität der Speicherauslegung ist. Leider können die Hersteller nur einen Bruchteil der benötigten Stoffdaten bereitstellen. Aus diesem Grund wurde mit Mitteln der SMWK-Vorlaufforschung sehr erfolgreich eine neue Arbeitsrichtung initiiert, die sich der Bestimmung dieser Stoff- und Transportgrößen widmet. Eine wesentliche Motivation resultiert diesbezüglich aus dem Projekt TCV III.

Nicht zuletzt konnten aus den Mitteln des Projektes TCV III wichtige Anschaffungen für das Labor Energiesystemtechnik getätigt werden und es fand eine deutliche Erweiterung und Optimierung der Funktionalität der Wärmespeichertestanlage als Teil des Zittauer Kraftwerkslabors (ZKWL) statt. Diese Verbesserungen können auch für zukünftige wissenschaftliche Projekte sehr zielführend eingesetzt werden und werten das verfügbare versuchstechnische Knowhow nachhaltig auf.

Fachliche Ergebnisse des Projektes wurden zur Erhöhung des Praxisbezuges von Lehrveranstaltungen in den Diplom- und Master-Studiengängen Energie- und Umwelttechnik sowie Energietechnik genutzt, speziell für das Modul Energiesystemtechnik, das sich schwerpunktmäßig mit thermischen Energiespeichern befasst. Das Ziel besteht darin, Studierende weiterhin aktiv in die Forschung einzubinden oder auch die Qualifizierung wissenschaftlichen Personals im Rahmen einer kooperativen Promotion zu unterstützen.

Prof. Meinert ist zurzeit der Obmann eines Normungsausschusses beim DIN e.V. und maßgeblich an der Erstellung des Entwurfes der DIN 2384 „Thermische Energiespeicher – Terminologie, Anforderungen, Kenngrößen, Prüfgrundlagen“ beteiligt, die noch bis 31.12.2019 zur Stellungnahme publiziert ist. Zahlreiche Ergebnisse aus dem Projekt TCV III sind in diese Norm eingeflossen.

2.4.2 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der eigenen wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit

1. Bedarfsanalyse/-abschätzung für die Vorhabensergebnisse

Die Technologie der Strom- und Wärmenutzung von Holz und anderen holzartigen Biomassen auf Basis von Vergasung mit motorischer Verbrennung kann zu hocheffizienten und weitgehend klimagasfreien dezentralen Energieversorgungskonzepten beitragen. Dies wurde im Projekt nachgewiesen. Während die damals zielgerichtete EEG-Förderung ein Umfeld geschaffen hatte, in der die Wirtschaftlichkeit der Technologie weitgehend durch die staatlich festgelegte Vergütung des erzeugten elektrischen Stroms ermöglicht wurde, sind derzeit die von EEG- und KWKG-Förderung ausgehenden Impulse zu gering für ein volkswirtschaftliches Ausrollen. Allerdings bietet die Technologie der Möglichkeit, auf sich verändernde Bedingungen für die Eigennutzung selbst erzeugten Stroms zu reagieren und die Substitution von Netzstrom voranzutreiben. Dies und eine in den letzten Jahren wiederum positiv veränderte Sicht auf die dezentrale Holzverstromung seitens der Förderinstitutionen (BMU, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR))

führt zu einer Zunahme von Beratungsnachfragen aus der Wirtschaft. Dies wurde in der Projektdokumentation nachgewiesen. Gerade auch angesichts der politisch motivierten Anforderungen an die Verminderung von Klimagasemissionen ist zu erwarten, dass sich dieser Trend in nächster Zeit ausweiten und stabilisieren wird und dass die Holzgastechnologie den ihr angemessenen Platz (eine von vielen Technologien, auf die aber wegen der großen Anforderungen nicht verzichtet werden kann) im Portfolio der Erneuerbaren Energiequellen erhält. In diesem Szenario ist das Projektteam in der Lage, mit extrem kurzer Einarbeitungszeit hochwirksame Beratungs- und Forschungsdienstleistungen anzubieten. Das Team ist außerdem in der Lage, strukturelle Inventionen im Bereich der Holzgastechnologie zu erkennen, zu bewerten und ggf. in Innovationen und Markterfolge zu überführen. Die Fähigkeit, durch beharrliche Arbeit an der Technologie auf solche strukturellen Innovationen zu stoßen, ist auf Basis der Förderung durch die Projekttätigkeit aufgebaut worden und muss in nächster Zeit erhalten und stabilisiert werden.

2. Möglichkeiten zur Erschließung von privaten und öffentlichen Finanzierungsquellen

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

Wenn die Möglichkeiten der Technologie zur Gestaltung einer Energieversorgung im Zieldreieck von Versorgungssicherheit, Ökologie und Ökonomie zunehmend wieder in den Fokus rücken, ergeben sich folgende wirtschaftliche Möglichkeiten.

- Interessierte Betreiber dezentraler Energieversorgungssysteme beauftragen Beratungsleistungen, Monitoring und anwendungsorientierte Lösung von Detailproblemen.
- Das Klimakabinett der Bundesregierung setzt Rahmenbedingungen, in denen die für die Umsetzung zuständigen Ministerien und ihre wissenschaftlichen Institutionen Förderimpulse setzen. Verbünde unseres Teams mit anderen Forschungseinrichtungen und mit Anlagenherstellern können sich dann auf mehrjährige Projektförderungen bewerben.
- Zielstellungen in anderen europäischen Ländern, der EU als Ganzes, der assoziierten Partner und anderer Akteure weltweit führen dazu, dass interessierte Anwender Finanzmittel in die anwendungsorientierte Forschung unseres Teams lenken.
- Weiterer Kompetenzaufbau in dem sich positiv entwickelnden Umfeld führt dazu, dass möglicherweise grundsätzliche (strukturelle) Neuerungen entstehen und in unternehmerischen Neugründungen wirtschaftlich umgesetzt werden.

Auch wenn eine Hochschule als Anstalt des öffentlichen Rechts keine wirtschaftlichen Interessen verfolgt, so bietet das im Projekt erworbene wissenschaftliche Knowhow die Möglichkeit der Einwerbung von Dienstleistungsaufträgen z.B. zur Auslegung wärmetechnischer Komponenten (Wärmespeicher, Wärmeübertrager) oder zu deren strömungs- und wärmetechnischen Charakterisierung. Die so eingeworbenen Drittmittel kommen dann in der Regel der Verbesserung der versuchstechnischen Ausstattung der Labore zugute.

3. Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen in der Wissenschaft

Mit dem Vorhaben wurden für einen begrenzten Zeitraum Arbeitsplätze in der anwendungs- und praxisorientierten Wissenschaft geschaffen. Außerdem konnte die Basis dafür verbessert werden, weitere Drittmittel einzuwerben. Die bearbeiteten Themen (z.B. Maßnahmen zur Emissionsminderung Biomasse-Vergasungs-BHKW) sind weiterhin von großer Bedeutung, weshalb die Chancen für eine nachhaltige Entwicklung im Drittmittelbereich sehr groß sind.

Ein Charakteristikum der Entwicklung thermischer Energiespeicher besteht darin, dass diese bei vorgegebenen wärme- und strömungstechnischen Randbedingungen flexibel in unterschiedlichen energietechnischen Systemen eingesetzt werden können. Das Im Projekt TCV III erarbeitete wissenschaftliche Knowhow und die verbesserte versuchstechnische Ausstattung bietet daher optimale Voraussetzungen für die Einwerbung von Anschlussprojekten mit einer Förderung der öffentlichen Hand oder auch in direkter Zusammenarbeit mit der regionalen Wirtschaft. Damit wird es auch weiterhin möglich sein, Arbeitsplätze für Forschungsmitarbeiter an der HSZG zu erhalten und ggf. weitere zu schaffen.

2.4.3 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der Wirtschaft im Freistaat Sachsen

1. Verbesserung der Informationsbereitstellung für die Wirtschaft

Alle Ergebnisse des Forschungsvorhabens stehen diskriminierungsfrei Dritten zur Verfügung. So wurden zu den Forschungsaktivitäten im Rahmen des Projektes einzelne Forschungsberichte erstellt und diese über die Webseite (http://ipm.hszg.de/de/fachgebiete/kraftwerks-dampferzeuger-und-feuerungstechnik/publikationen.html) der Hochschule Zittau/Görlitz der Öffentlichkeit zum Download bereitgestellt. In dieser Form wurden außerdem alle Zwischenberichte zum Vorhaben veröffentlicht.

2. Verbesserung des Wissenstransfers in die Wirtschaft

Durch die Durchführung einer jährlich stattfindenden Tagung zur energetischen Biomassenutzung (Biomass to Power and Heat) mit einem breit gefächerten nationalen und internationalen Publikum konnte der Wissenstransfer unterstützt werden. Im Rahmen der Veranstaltungen wurden Firmenbörsen durchgeführt, die ebenfalls einen Austausch von praktischen Erfahrungen und wissenschaftlichen Ergebnissen unterstützen. Ebenso wurden die Präsentationen bzw. die Tagungsbänder der Veranstaltungen allen Interessierten bereitgestellt. Darüber hinaus bilden die in Kapitel 2.4.4 aufgeführten Veröffentlichungen einen Wissenstransfer in die Wirtschaft.

Die Projektergebnisse im Bereich der Wärmespeicherentwicklung kommen Unternehmen aus der Region z.B. in Form häufig stattfindender Beratungsgespräche zwischen den beteiligten Wissenschaftlern und Vertretern der regionalen Wirtschaft zugute. Dies betrifft nicht nur die Entwicklung von Wärmespeichern, sondern aktuell in zunehmendem Maße auch die Erstellung von Abwärmenutzungskonzepten für industrielle Anlagen. Das Knowhow, das bei der wärmetechnischen Systemanalyse des Biomasse-Vergasungs-BHKW erarbeitet wurde, fließt unmittelbar in diese Gespräche ein. Außerdem wurde und wird die versuchstechnische Ausstattung an der Hochschule genutzt, um energietechnische Komponenten, die von Unternehmen der Region entwickelt wurden, vor der Markteinführung zu charakterisieren. Aktuellstes Beispiel ist ein sensibel-latentes Wärmespeichermodul der Firma PECEM aus Bautzen mit 50 kWh Speicherkapazität, das mit Hilfe der Wärmespeicher-Testanlage untersucht wurde. Dieses Modul ist eines von 15 Modulen eines mobilen Latentwärmespeichers (Kapazität

750 kWh), der von der Firma PECEM am 11.10.2019 in Königswartha gemeinsam mit dem Kooperationspartner kluge GmbH (Maschinenbauer) der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt wurde.

3. Potenzial zur Ausgründung von innovativen Unternehmen

Potenzielle Anwendungsbereiche sind die Erweiterung der Wärmeversorgung von kommunalen und gewerblichen Wärmeversorgungsanlagen (ohne Stromerzeugung) zu Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Der KWK-Betrieb ist bei Betrachtung der Energiebilanzen ein sehr wertvoller Beitrag zur Energieversorgung. Es ist damit zu rechnen, dass sich angesichts der Anforderungen der Transformation des Energiesystems die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so weiterentwickeln werden, dass sie dieser technischen Eigenschaft gerecht werden. Dies kann durch Weiterentwicklung der Marktbedingungen geschehen, die selbst wiederum durch politische Steuerinstrumente angeregt werden. Die Nachfrage nach dezentraler, wärmegekoppelter Stromerzeugung mit hoher Eigenerzeugungskomponente wird steigen (müssen). Damit wird sich ein wirtschaftliches Nachfrageumfeld für die Erkenntnisse des Vorhabens ergeben. Es liegt in der Logik der deutschen „Energiewende“, dass vom Erreichen eine Vorbildwirkung für andere europäische Regionen ausgegangen werden darf, wo sich erfolgversprechende Marktsituationen für solche dezentrale Technik herausbilden werden.

2.4.4 Angabe der bereits erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Wissenschaftliche Artikel

- Herrmann, A., Schneider, R., Zeymer, M., Schmersahl, R., Heidecke, P., Ling, H., Volz, F., Schüßler, I: „*Permanentgasmessung im Produktgas*“, In: Zeymer, M., Herrmann, A., Thrän, D., (Hrsg.): Messen und Bilanzieren an Holzvergasungsanlagen, Band 14 der Schriftenreihe des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Leipzig, 2016.
- Schneider, R., Böhm, C.: *Wie wirtschaftlich sind Anbau und Verwertung von Energieholz aus Agroforstwirtschaft in einem südbrandenburgischen Landwirtschaftsbetrieb?* In: Böhm, C. (Hrsg.): Bäume in der Land(wirt)schaft – von der Theorie in die Praxis, Tagungsband zum 5. Forum Agroforstsysteme, ISBN 978-3-940471-27-7, Cottbus, März 2017
- Vakalis, S., Moustakas, K., Sénéchal, U., Schneider, R., Salomo, B., Kurz, M., Malamis, D., Sotiropoulos, A., Zschunke, T.: *Assessment of Potassium Concentration in Biochar before and after the After-burner of a Biomass Gasifier*, CEt Chemical Engineering Transactions Vol. 56, 2017, Online verfügbar unter: www.aidic.it/cet, ISBN 978-88-95608-47-1, ISSN 2283-9216
- 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., Spindler, H., Schneider, R., Sénéchal, U., Pohl, R.: *Katalytische Vergasungsversuche am Holzvergaser-BHKW des TCV*, In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Wissenschaftliche Berichte, Heft 131 – 2017, Nr. 2713-2727. Tagungsband zum Fachkolloquium „Biomass to Power and Heat 2017“, ISBN 978-3-941521-26-1, Zittau, Oktober 2017

- Meinert, J., Ebermann, C., Titze, E.: *Latente Speicher für die Wärmeversorgung von Gebäuden – Zwischen Simulation und Technikum* in: GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis 2017, Ausgabe 5, S. 384 – 397
- Schneider, R., Zschunke, T.: *Brennstoffvariation bei der kleintechnischen Holzvergasung*, In: Reader zur 8. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“, Leipzig, September 2019

Forschungsberichte

- Schneider, R., Sénéchal, U., Pohl, R., Zschunke, T.: *Katalytische Vergasungsversuche am Holzvergaser-BHKW des TCV,* Forschungsbericht, Zittau., Januar 2017
- Schneider, R., Weidner, M.: Forschungsbericht: *Parametervariation Reformerrost am Holzvergaser-BHKW des TCV*, Forschungsbericht, Zittau, August 2017
- Titze, E.: *Untersuchungen zur Dämpfung von Volumenstrom-Pulsationen in Rohrleitungen,* Forschungsbericht, Zittau, 2018
- Schneider, R., Grusla, S.: *Brennstoffvariation am Holzvergaser-BHKW des TCV*, Forschungsbericht, Zittau, April 2019

Vorträge und Poster

- Sénéchal, U., Salomo, B., Zschunke, T.: *Untersuchungen zum Temperatur- und Konzentrationsfeld in der mechanisch bewegten Festbett-Vergasungsschicht*, Posterbeitrag zur DGMK-Tagung “Konversion von Biomassen und Kohlen”, Rotenburg a.d.F., 09.-11.05.2016
- Schneider, R., Böhm, C.: *Wie wirtschaftlich sind Anbau und Verwertung von Energieholz aus Agroforstwirtschaft in einem südbrandenburgischen Landwirtschaftsbetrieb?*, Vortrag zum 5. Forum Agroforstsysteme, Senftenberg, 01.12.16
- Zschunke, T., Spindler, H., Sénéchal, U., Schneider, R.: *Katalytische Vergasungsversuche am Holzvergaser-BHKW des TCV*, Vortrag zum Fachkolloquium „Biomass to Power and Heat 2017“, Zittau, 01.06.2017
- Weidner, M.: *Rückstände von Holzvergasungsanlagen – erste Bewertungen analytischer Untersuchungen*, Vortrag zum FEE-Herstellertreffen, Fulda, 07.07.2017
- 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
- Titze, E.: *PCM-Latentwärmespeicher – Überblick und Anwendung im Projekt TCV III –*, Vortrag zum IPM-Kolloquium, Zittau, 07.03.2018
- Sénéchal, U.: *Theoretische Untersuchungen und numerische Berechnungen am thermochemischen Versuchsfeld (TCV*), Poster zum Fachkolloquium „Biomass to Power and Heat 2018“, Zittau, 06.06.2018
- Salomo, B., Schneider, R.: *Systemanalyse der NOx-Emissionen einer Biomasse-KWK-Anlage*, Vortrag zum IPM-Kolloquium, Zittau, 12.12.2018
- Schneider, R.: *Experimentelle Mitverwertung von Reststoffen im Thermochemischen Versuchsfeld*, Vortrag zur Transferveranstaltung „Energieforschung vor Ort“ der HSZG, Zittau, 21.06.2019

- Schneider, R.: *Brennstoffvariation bei der kleintechnischen Holzvergasung*, Vortrag zur 8. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“, Leipzig, 18.09.2019

Darüber hinaus wurden alle Zwischenberichte des Projektes TCV III auf der Institutswebseite veröffentlicht.

Weitere geplante Veröffentlichungen

- Schneider, R., Zschunke, T.: *Fuel variations in small scale gasification of biomass*, Chemical Engineering Technology, Special Issue: Bioenergy: X-Factor, 2020

2.5 Beiträge des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen

Die Nutzung von Holz und holzartigen Brennstoffen für die effiziente Bereitstellung von Nutzwärme und Elektroenergie ist ein Weg, um die Nutzung von fossilen Brennstoffen und Kernenergie zu substituieren. In einem üblichen Anwendungsfall wird durch den Betrieb einer Holz-KWK-Anlage weitgehend CO_2-neutral Elektroenergie (komplette Prozesskettenbetrachtungen siehe andere Projekte unter Mitwirkung der HSZG, z.B. [1] und [56]) erzeugt. Herkömmliche Stromerzeuger können um den entsprechenden Betrag ihre Leistung, ihren Brennstoffbedarf und damit ihre fossilen CO_2-Emissionen - sofern auftretend - oder andere Emissionen entsprechend verringern. Durch die gekoppelte Bereitstellung von Nutzwärme können zugleich am Aufstellungsort der Anlage der Brennstoffbedarf und damit die lokalen Emissionen der herkömmlichen Wärmeerzeugung (Ölheizung, Gasheizung) verringert werden. Dies betrifft sowohl das Klimagas CO_2 als auch die Schadstoffe Stickstoffoxid und Kohlenstoffmonoxid. Zugleich hat eine Holz-KWK-Anlage ihrerseits Emissionen durch die ausgestoßenen Motorabgase, die entstehenden Schallemissionen und die verbleibenden festen Reststoffe (vgl. Asche) aufzuweisen.

Der Einsatz von Holz-KWK-Anlagen hat **gravierende positive Umweltwirkungen**, wenn durch ihren Einsatz die Nutzung von zentral bereitgestellter Elektroenergie aus fossilen Energieträgern und von Wärme aus Kohle- Öl- und Gasheizungen vermieden wird. In diesem Falle werden eigene Emissionen in Kauf genommen, um vor allem die Klimagaswirksamkeit der Energieerzeugung in Kauf zu nehmen. Von diesem Ausgangspunkt aus sollen durch die wissenschaftlich-technische Arbeit die lokalen Emissionen der Anlage und der Brennstoffverbrauch gesenkt werden. Hierzu hat das Projekt TCV III inhaltlich beigetragen. Dazu gehört

- die Vorbereitung sinnvoller Nutzungswege für die Rest- und Abfallstoffe,
- die Überwachung, Beurteilung und Minimierung der Motorabgasemissionen
- sowie die Verbesserung des Brennstoffausnutzungsgrades und damit die Verringerung der Waldflächennutzung und die Vergrößerung der möglichen Klimawirksamkeit pro Hektar.

Ebenso hat die Entwicklung thermischer Energiespeicher in Bezug auf die Verbesserung der Umweltbedingungen eine enorme Bedeutung. Mit direktem Bezug zum Projekt TCV III geht es um die Optimierung des Betriebsverhaltens eines Biomasse-Vergasungs-BHKW, speziell um die Verkürzung der Kaltstartphase des BHKW mittels gespeicherter Abwärme und die daraus resultierende Minderung umweltschädlicher Emissionen.

Das Thema Wärmespeicher greift jedoch noch viel weiter. In Deutschland werden mehr als 50 % der Endenergie in Form von Wärme verbraucht, allein die deutsche Industrie benötigt pro Jahr rund 450 Milliarden kWh Prozesswärme, die Stand heute zu maximal 15 % aus regenerativen Energieträgern erzeugt wird. Ein Teil dieser aus fossilen

Primärenergieträgern erzeugten Wärme (10 % wären 45 Mrd. kWh!) könnte durch Abwärme substituiert werden, die mit Hilfe geeigneter Wärmespeicher z.B. aus zyklischen thermischen Prozessen bereitgestellt wird. Dazu müssen die Energiesysteme der Anwender analysiert, Szenarien zur Auskopplung von Wärme entwickelt und Möglichkeiten der direkten oder indirekten Nutzung der Wärme gefunden werden. Diese Arbeitsschritte lesen sich wie ein Teil des Arbeitsplanes des Projektes TCV III, sodass die Bedeutung des Projektes für die Verbesserung der Umweltbedingungen deutlich wird. Zur direkten zeitversetzten Nutzung von Abwärme in thermischen Prozessen werden Wärmespeicher benötigt. Das Knowhow zur Entwicklung dieser Speicher und vor allem zu deren Überführung in die Praxis wurde im Projekt TCV III geschaffen oder zumindest vervollkommnet.

2.6 Einschätzung des Finanzierungs- und Zeitplanes

Hinsichtlich des Projektbalkenplanes und der darin festgelegten zeitlichen Abfolge der Arbeitspunkte (AP) wurden im Berichtszeitraum Änderungen gemäß den Anschreiben vom 18.11.16 und im Nachgang des Statusseminars am 24.5.17 beantragt und genehmigt. Darauf bezugnehmend hatten sich die Bearbeitungszeiträume der AP und die Termine der Meilensteine nach Tab. 2-37 geändert. Mit dem Änderungsbescheid der SAB vom 05.06.2018 wurde darüber hinaus die beantragte kostenneutrale Verlängerung des Bewilligungszeitraumes bis zum 30.04.2019 genehmigt.

Die Änderungen im Arbeitsplan betrafen vor allem AE1.2 aufgrund der Lieferschwierigkeiten des ausgeschriebenen Laser-Doppler-Anemometers und der daraufhin notwendigen Neuausschreibung des Messsystems. Teile des Arbeitspaketes 1 – Systemanalyse wurden verstetigt um dauerhaften Validierungen an der Mess- und Anlagentechnik zu ermöglichen. Entsprechend wurden die Arbeiten in der AE1.3 (Simulation und Modellierung) reduziert. Außerdem wurde die Bearbeitung der AE3.1 und der AE3.2 auf das für die Systemanalyse bzw. Bilanzierung benötigte Maß reduziert und entsprechend die Arbeiten zur Reststoffverwertung (Recherche Verwertungswege, thermische/chemische Nachbehandlung) nicht weiterbearbeitet. Damit war es möglich, die AE3.3 vorzuziehen und die primären bzw. sekundären Maßnahmen zur Emissionsminderung intensiver als ursprünglich geplant zu bearbeiten.

Tab. 2-37 Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung nach Änderungsbescheid

AP/MS	Zeitplan	Aktueller Stand
AE1.1	01/16 bis 06/16	Abgeschlossen
AE1.2	06/16 bis 04/19*	Abgeschlossen
AE1.3	02/16 bis 04/19*	Abgeschlossen
AE2.1	04/16 bis 05/17	Abgeschlossen
AE2.2	12/16 bis 12/18	Abgeschlossen
AE2.3	10/18 bis 04/19*	Abgeschlossen
AE3.1	01/16 bis 09/18	Abgeschlossen
AE3.2	07/17 bis 04/19*	Nur teilweise abgeschlossen**
AE3.3	08/17 bis 06/18	Abgeschlossen
Meilensteine		
M 1	06/2016	Erfolgt
M 2	12/2018	Erfolgt
M 3	04/2019*	Erfolgt

* gemäß kostenneutraler Verlängerung bis zum 30.04.2019
** aufgrund Änderung des AP-Inhaltes entspr. Antrag und Genehmigung

Hinsichtlich des Finanzierungsplanes wurden ca. 94 % alle geplanten sachbezogenen Mittel im Rahmen der Projektarbeiten verwendet. Da die ursprünglich geplanten

Investitionskosten für die Position *Erst- und Ergänzungsausstattung - Laser-Doppler-Anemometer (LDA)* nicht in vollem Umfang verwendet wurden, konnte eine Teilumwidmung auf die Position *Erst- und Ergänzungsausstattung - Emissionsmesstechnik* vorgenommen werden. Dadurch war es möglich, in Bezug auf die Motorabgasanalytik eine Heißgasanalyse nach dem Prinzip der Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR) zu beschaffen und somit die Qualität und Quantität der im Projekt durchgeführten Emissionsmessungen maßgeblich zu erhöhen.

Aufgrund einer längerfristigen Krankheit eines Projektbearbeiters (März bis Oktober 2018) und des Arbeitgeberwechsels eines weiteren Projektbearbeiters (ab Januar 2019) konnten ca. 5 % der geplanten Personalkosten trotz kostenneutraler Verlängerung nicht abgerufen werden.

2.7 Angabe der Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

- Wassergehaltsmessung Schüttgüter

Die ursprünglich geplante Beschaffung und Festinstallation einer Online-Erfassung des Wassergehaltes von Feststoffen im Bereich der Biomassetrocknungsanlage konnte nicht realisiert werden. Hierfür auf dem Markt verfügbare Applikationen (v.a. auf Basis von Infrarotreflektionsverfahren) werden üblicherweise bei relativ homogenen Stoffen (wie z.B. Getreide oder Sägespäne) eingesetzt, eignen sich jedoch nur bedingt zum Einsatz bei relativ inhomogenen Stoffen wie z.B. HHS. Von eigenen Entwicklungen hierzu wurde aus Kapazitätsgründen abgesehen. Aufgrund dessen wurde alternativ eine Schnellanalyse des Wassergehaltes von biogenen Brennstoffen ausgeschrieben und angeschafft. Dieses mobile System (Humimeter BMA-2, Fa. Schaller GmbH) kann unter Nutzung von Kennlinien für verschiedene Messgüter und bei Kompensation von Temperatur und Schüttdichte den Wassergehalt einer Brennstoffprobe innerhalb von ca. zwei Minuten ermitteln. Das Messprinzip basiert auf dem kapazitiven Verfahren. Umfangreiche Untersuchungen im Rahmen von [55] konnten für dieses Verfahren eine gute Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Referenzmethode nach DIN 51718 (Trockenschrank im Analytiklabor) nachweisen.

- Laser-Doppler-Anemometer (LDA)

Für den Einsatz einer berührungslosen Messung der Geschwindigkeitsverteilung in der Produktgasleitung mit Hilfe eines LDA wurde eine Partikelmessung direkt im Produktgasstrom durchgeführt, um das Partikelgrößenspektrum festzustellen und schlussfolgernd die Nutzbarkeit der im Produktgas noch vorhandenen Partikel für eine LDA-Messung einzuschätzen. Als Ergebnis der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die vorliegenden Aerosole im Produktgas für eine LDA-Messung im Rückstreuverfahren gut geeignet sind und keine zusätzliche Einbringung von Tracer-Partikeln in den Gasstrom erforderlich ist. Nach Aufbau und Einsatztest des Messsystems konnte dies für den stationären Anlagenzustand nicht bestätigt werden. Nachdem die Anlage durchgewärmt war und Kondensationseffekte verschwanden, war es nicht mehr möglich, prozessinterne Partikel für die Signalgenerierung zu nutzen. Somit war es notwendig, über ein s.g. Seeding ein Aerosol als Tracerpartikel hinzuzugeben. Aufgrund der prozessinternen Gegebenheiten (keine Zugabe von oxidierbaren Gasen, aufgrund der evtl. Bildung eines explosionsfähigen Gemisches) konnte das Hinzuführen des Aerosols nur mit einem Inertgas (Stickstoff) erfolgen.

Im Rahmen der ersten Testeinsätze des LDA wurde außerdem festgestellt, dass es für eine störungsfreie Erfassung der Geschwindigkeitsverteilung weiterer spezifischer Anpassungen bedarf. Ursprünglich wurden mithilfe der Software MATLAB® eigene Auswertefunktionen zur Strahlverfolgung, Lagekorrektur und Durchflussbestimmung programmiert. Diese orientierten sich u. a. an der VDI/VDE 2640 „Netzmessung in

Strömungsquerschnitten“ (Blatt 1 (Stand: 1993, geprüft: 1999) und Blatt 3 (Stand: 1983)). Jene Norm wurde allerdings ursprünglich für die Verwendung von konventionellen Strömungssonden konzipiert und ist aufgrund der vorangeschrittenen Erkenntnisse in der Strömungsforschung im Allgemeinen sowie für LDA-Messungen im Speziellen nur (noch) bedingt einsetzbar. Die im Rahmen der Auswertung programmierten Skripte sind somit nur unter gewissen vereinfachenden Voraussetzungen (z. B. Rotationssymmetrie der Strömung; fehlerfreie Ausrichtung der optischen Achse zur Rohrachse; Abtastung nur entlang eines Messpfades) anwendbar. Die Reproduzierbarkeit der Messungen ist entsprechend eingeschränkt. Ein weiteres großes Problem bestand in den im wandnahen Bereich auftretenden, durch Reflexionen verursachten Störsignalen, welche aufwändig gefiltert werden mussten. Recherchen ergaben, dass die Fa. Optolution Messtechnik GmbH der einzig bekannte Anbieter ist, welcher eine Software zur Berechnung von Durchflüssen aus LDA-Messungen an kreisrunden Rohrleitungen unter Berücksichtigung der Strahlverfolgung und Rohrmittelpunktsbestimmung zur Verfügung stellen kann. Diese äußerst spezielle Software ist für die Umsetzung der Durchflussbestimmung im Vorhaben enorm hilfreich, da sie den immensen Aufwand der Programmierung eines eigenen vollumfänglichen Auswertealgorithmus nicht notwendig macht und schon ein hoher Anteil an Entwicklungszeit und praktischem Abgleich eingeflossen ist. Das zukünftige Vermessen weiterer Messpfade setzt ein genaues Wissen über die aktuelle Position des Messvolumens innerhalb des Rohrquerschnitts voraus. Aufgrund der Rohrkrümmung können zusätzliche Messpfade also nur über Korrekturrechnungen der Strahlen erschlossen werden. Dies beginnt bereits bei der Bestimmung des Rohrmittelpunktes und setzt sich entlang eines jeden Messpfades fort. Das Modellieren von Wandfunktionen ist dabei ebenso Bestandteil, wie die automatische Korrektur von Position und Gestalt des Messvolumens, wenn die Laserstrahlen zur Vermeidung von störenden Reflexionen nicht exakt orthogonal, sondern mit leichtem Winkelversatz in das Rohr eintreten. Die angestrebte Software verfügt über die exakt benötigten Tools und das damit in Verbindung stehende Knowhow konnte im Vorhaben genutzt werden, um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen zu verbessern. Die genannten Fehlereinflüsse traten erst im Zuge der Auswertung der Vormessungen zutage und waren zum Zeitpunkt der Ausschreibungsformulierung so noch nicht absehbar. Die Beschaffung der Software ist deshalb für die vollumfängliche Funktion des Gerätes und für die Erfüllung der damit verbundenen wissenschaftlichen Aufgaben notwendig.

- Produktgas-Speicherdemonstrator

Für die Entwicklung eines dauerhaft in der Anlage integrierten Speichers wurden diverse Richtlinien und Sicherheitsbestimmungen recherchiert und auf die Anwendung übertragen (vgl. Kapitel 2.3.1). Dabei wurde eine nicht zu realisierende Umsetzung festgestellt, da einige den Brand- und Personenschutz betreffende Vorschriften nicht oder nur unzureichend eingehalten werden können. Dies betrifft insbesondere die Toxizität und Brennbarkeit des Produktgases. Das Kriterium zum Ausschluss der Integration eines Produktgasspeichers sind die nicht einhaltbaren Schutzabstände zu Brandlasten nach den technischen Regeln für Betriebssicherheit. Daher musste von einer Weiterführung der Integration eines druckaufgeladenen Produktgasspeichers abgesehen werden.

2.8 Angabe eventuell bereits angefallener Nettoeinnahmen

Es wurden im Rahmen der Projektarbeit keinerlei zusätzliche Einnahmen generiert.

2.9 Ausführungen zur bisherigen Nutzung der geförderten Investitionsgegenstände

Die im Rahmen des Projektes geförderten Investitionsgegenstände wurden bisher ausschließlich für die Projektbearbeitung eingesetzt.

2.10 Ableitung zukünftiger Untersuchungsschwerpunkte

Die ökonomische und ökologische Systemintegration von Biomasse-Vergasungs-BHKW in bestehende Energiesysteme setzt einen wirtschaftlichen, flexiblen und umweltschonenden Betrieb voraus. Unter Nutzung des vorhandenen Biomasse-Vergasungs-BHKW soll dies durch Erreichung der nachfolgenden zukünftigen Untersuchungsschwerpunkte umgesetzt werden.

So besteht weiterhin das Ziel, im Rahmen der fortlaufenden Systemanalyse das Verständnis der hochgradig gekoppelten Wärme- und Stofftransportvorgänge zu verbessern und limitierende Einzelphänomene zu identifizieren. Damit können Potenziale zur weiteren Effizienzsteigerung des Anlagenbetriebs von Biomasse-Vergasungs-BHKW und damit eine Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades geschaffen werden. Zum anderen sollten weitere Informationen zum Verständnis der ablaufenden Energieumwandlungsprozesse hinsichtlich der Emissionsproblematik erarbeitet werden, um damit die Grundlagen für umwelttechnische Weiter- und Neuentwicklungen zur Emissionsminderung zu schaffen.

Für eine zuverlässige energetische und stoffliche Prozessbilanzierung ist die Messung stoffgebundener und stoffungebundener Energieströme von grundlegender Bedeutung. Mit dem vorhandenen Laser-Doppler-Anemometer (LDA) wird die berührungslose – und damit rückwirkungsfreie – Messung der Geschwindigkeitsverteilungen in allen bilanzrelevanten Querschnitten weiterverfolgt. Das LDA soll des Weiteren zur Optimierung der Strömungsverhältnisse in Wärmespeichern mit gasförmigem Wärmeträger und zur Analyse der Partikelbeladung von Gasen eingesetzt werden. Neben berührungslosen Messverfahren werden weitere Messgrößen wie Temperaturverteilungen, Wärmeströme (speziell Wärmeverluste), Stoffkonzentrationen und andere Betriebsparameter weiterhin laufend erfasst und ausgewertet. Insbesondere wird der Messung von Stoffkonzentrationen noch deutliches Potenzial zur Erhöhung der Ergebnisverlässlichkeit unter Praxisbedingungen zugesprochen.

Aus ökologischer und ökonomischer Sicht müssen die Biomassevergasungsanlagen zukünftig nicht nur Energierohstoffe, wie z.B. HHS aus Waldrestholz, energetisch effizient verwerten können, sondern vielmehr auch unter dem Aspekt der Kaskadennutzung anfallende Rest -und Abfallstoffe aus der stofflichen Nutzung von Biomasse ebenso effizient verarbeiten können. Die bisher durchgeführten Brennstoffvariationen sollen weitergeführt, nach erfolgreichen Kurzzeittests in Langzeittests überführt sowie weitere Rest- und Abfallstoffe eingesetzt werden. Entsprechende Materialien die im Fokus der Brennstoffvariationen stehen sind z.B. Klärschlämme, Gärreste oder auch Abfälle aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK).

Ein weiterer zukünftiger Untersuchungsschwerpunkt sollte die wärme- und strömungstechnische Auslegung sowie Integration thermischer Speichersysteme mit optimal angepassten Speicherkapazitäten, -leistungen und Wirkungsgradanforderungen am Biomasse-Vergasungs-BHKW beinhalten. Die Grundlage dafür bilden die Erkenntnisse aus der Systemanalyse sowie die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Speicherdemonstratoren. Das Hauptaugenmerk soll dabei einerseits auf der im Anlagenbetrieb thermodynamisch bedingt anfallenden überschüssigen Wärme im

Produktgaskühlkreislauf und andererseits dem Wärmebedarf der Anlage während des Anfahrprozesses (Vorwärmung des Produktgaskühlkreislaufs und Vergasungsmittels) liegen. Das Ziel besteht darin, vorzugsweise Latentwärmespeichersysteme einzusetzen, die den Phasenwechsel fest/flüssig eines Speichermediums zur Wärmespeicherung nutzen und dabei eine ideale Kombination zwischen energetisch effizientem und wirtschaftlichem Betrieb ermöglichen. Hohe Speicherkapazitäten und konstruktiv einstellbare Speicherleistungen und eine mögliche Kaskadierung von Speichern garantieren optimale Eigenschaften zur Anpassung an die Anlagenparameter und das Erreichen hoher exergetischer Wirkungsgrade (Minimierung von Wärme- und Temperaturniveauverlusten). Damit soll ein entscheidender Schritt hin zur Etablierung dieser effizienten Speichertechnologie im Bereich der dezentralen Energieversorgungssysteme (Kraft-Wärme-Kopplung) initiiert werden.

Beim Einsatz moderner Biomasse-Vergasungs-BHKW entstehen prozessbedingt feste Reststoffe sowie gasförmige Emissionen. Gasförmige Emissionen werden insbesondere beim Anlagenstart („Kaltstart“) frei, wobei eine flexible Systemintegration der Anlagen zur Häufung dieser Betriebszustände führt. Ziel wird es daher sein, die Entstehung schädlicher Gase in allen Betriebsphasen zu minimieren (z.B. durch Vorwärmkonzepte mit Abwärme), sodass die Umweltgefährdungen minimiert werden. Mit Hilfe eines Pulsationsdämpfers innerhalb der Produktgasstrecke vor dem BHKW könnte ein definierter Druckverlust eingebracht werden, um damit eine Glättung des pulsierenden Produktgasvolumenstromes zu realisieren. Dies würde zu einem vergleichmäßigten Betrieb des Gasmotors führen, der in Folge dessen energetisch effizienter betrieben werden kann. In diesem Zusammenhang könnte dies zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltverträglichkeit der Motorabgasemissionen führen. Die Besonderheit der direkt zeitlich gekoppelten Gaserzeugung (Biomasse-Vergasung) und Gasnutzung (Gasmotor) lässt jedoch im Moment keinen optimalen Betriebspunkt zu. Am Markt verfügbare Technologien zur primären und sekundären Emissionsminderung an Verbrennungsmotoren können nicht ohne spezielle Anpassungen des Gesamtprozesses eingesetzt werden. Die Dämpfung der variierenden Qualitäten und Quantitäten des Produktgases durch einen Pulsationsdämpfer würde daher zahlreiche neue Optionen des Einsatzes von Verfahren zur wirkungsvollen Emissionsminderung mit sich bringen. Darüber sollten verschiedene sekundäre Minderungsmaßnahmen (Katalysatoren) einzeln oder in sinnvoller Verschaltung hinsichtlich ihrer Emissionsminderungsleistung getestet und deren Alterungsverhalten untersucht werden. Ziel ist dabei die Minimierung der Emissionen schädlicher Gase entsprechend dem Stand der Technik oder mind. auf das Niveau am Markt verfügbarer (Erd-)Gas-BHKW-Anlagen.

Literaturverzeichnis

[1] ZSCHUNKE, T. / SCHNEIDER, R. / SCHÜßLER, I.: *Abschlussbericht Verbundprojekt Bundesmessprogramm zur Weiterentwicklung der kleintechnischen Biomassevergasung*; BMU FKZ 03KB017B

[2] 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, 2013

[3] ZSCHUNKE, T. ET AL.: *Abschlussbericht Zittauer Kraftwerkslabor Thermochemisches Versuchsfeld*; gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Sachsen, FKZ 100081307

[4] SIERRA VARGAS, F.: Zur katalytischen Vergasung von Biomasse; Dissertation, Universität Kassel, 2006

[5] SCHNEIDER, R. / SÉNÉCHAL, U. / POHL, R. / ZSCHUNKE, T.*: Katalytische Vergasungsversuche am Holzvergaser-BHKW des TCV,* Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2017

[6] SCHNEIDER, R.*: Vergasungsversuche mit KUP-HHS,* Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2016

[7] SCHNEIDER, R. / GRUSLA, S.: *Brennstoffvariation am Holzvergaser-BHKW des TCV,* Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2019

[8] UNGER, C. / SCHULZKE, T*: Thermodynamische Herausforderungen der Biomassevergasung,* Vortrag zur 5. Internationalen Anwenderkonferenz für Biomassevergasung, Stuttgart, 2011

[9] SCHNEIDER, R. / SÉNÉCHAL, U.*: Kratzkettenförderer,* Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2018

[10] BIRTH, T.: *Status Quo der Holzvergasungstechnologien in der Schweiz, Österreich und Deutschland*, Vortrag zum 18. Fachkongress Holzenergie, Würzburg, 2018

[11] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002 (GMBI, 2002, Nr. 25-29, S. 511-605)

[12] ZEYMER, M. / NOËL, Y. / SCHNEIDER, R.: *Abgasemissionen kleintechnischer Holzvergasungsanlagen: Stand der Technik*, VDI-Gefahrstoffe-Heft 2015

[13] VDI 3461: 2018-12 Emissionsminderung Thermochemische Vergasung von Biomasse und Kraft-Wärme-Kopplung (Emission Control Thermochemical gasification of biomass in combined heat and power configurations). Berlin: Beuth Verlag

[14] STERNER, M. / STADLER, I.: *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*; Verlag Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2014

[15] RUMMICH, E.: *Energiespeicher*; Expert Verlag, Renningen, 2009

[16] MEINERT, J.: *Transport und Speicherung von Energie,* Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Heft 3/4 (2007), S. 125-131

[17] MEINERT, J. / ANDERSEN, O. / QUADBECK, P. / STEPHANI, G. / KIEBACK, B.: *Wärmespeichertechnologien im Fokus der aktuellen Entwicklung*; Sächsisches Forum für Brennstoffzellen und Energiespeicher, Leipzig, 23. Oktober 2012

[18] MEINERT, J. / KIEBACK, B.: *Wärmespeichertechnologien;* Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida, Nr. 6 (2011), S. 30-33

[19] DINCER, I. / ROSEN, M. A.: *Thermal Energy Storage – Systems and Applications*; John Wiley & Sons Ltd., 2011

[20] GIL, A. ET AL.: *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 – Concepts, materials and modellization*; Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010), pp. 31-55

[21] VDI e.V.: *VDI-Wärmeatlas, Kapitel N 1 – Wärmeübertragung in Regeneratoren*, 11. Auflage, Verlag Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2013

[22] MEINERT, J. / ANDERSEN, O. / FIEBACK, K. / SCHUBERT, V. / KIEBACK, B.: *High-power latent heat storage based on metallic fibre structures*; Proceedings 2nd International Conference on Materials for Energy, EnMat 2013, Karlsruhe, 12.-16.05.2013

[23] ANDERSEN, O. / MEINERT, J. / STUDNITZKY, T. / STEPHANI, G. / KIEBACK, B.: *Highly heat conductive open-porous aluminium fibre based parts for advanced heat transfer applications*; Materials Science and Eng. Technology, 43, No. 4, 2012, pp. 328-333

[24] MEINERT, J. / ANDERSEN, O. / QUADBECK, P. / STEPHANI, G. / KIEBACK, B.: *High-power latent heat systems for thermal storage and management applications*; 2nd International Conference Thermal Management of EV/HEV, Darmstadt, 27.-29. June 2012

[25] MEDRANO, M. ET AL.: *Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems*; Applied Energy, Vol. 86 (2009), pp. 2047-2055

[26] MEINERT, J. / EBERMANN, C. / TITZE, E.: *Latente Speicher für die Wärmeversorgung von Gebäuden – Zwischen Simulation und Technikum* in: GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis 2017, Ausgabe 5, S. 384 – 397

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

[28] VDI 3461: 2018-12 Emissionsminderung Thermochemische Vergasung von Biomasse und Kraft-Wärme-Kopplung (Emission Control Thermochemical gasification of biomass in combined heat and power configurations). Berlin: Beuth Verlag

[29] SÉNÉCHAL, U. / SCHNEIDER, R. / TITZE, E. / SILBERMANN, S. / GRUSLA, S. / POHL, R.: *3. Zwischenbericht – Thermochemisches Versuchsfeld III – (Thermodynamische und fluiddynamische Optimierung einer Biomasse- Festbettvergasung mit BHKW)*, Zittau, 2018

[30] SÉNÉCHAL, U. / SCHNEIDER, R. / TITZE, E. / WEIDNER, M. / POHL, R.: *2. Zwischenbericht – Thermochemisches Versuchsfeld III – (Thermodynamische und fluiddynamische Optimierung einer Biomasse- Festbettvergasung mit BHKW)*, Zittau, 2017

[31] GERSTEN, K. / HERWIG, G.: *Strömungsmechanik - Grundlagen der Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung aus asymptotischer Sicht*, 1. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 1992

[32] HERDIN, G. / HERDIN, R.: *Grundlagen Gasmotoren*, Skriptum, Professional Gas Engine Solutions GmbH, 2012

[33] Das europäische Parlament und der Rat. (Februar 2014). ATEX-Richtlinie zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten

Bereichen. Richtlinie 2014/34/EU des europäischen Parlaments und des Rates. Das europäische Parlament und der Rat.

[34] SÉNÉCHAL, U. / SCHNEIDER, R. / TITZE, E. / WEIDNER, M.: *1. Zwischenbericht – Thermochemisches Versuchsfeld III – (Thermodynamische und fluiddynamische Optimierung einer Biomasse- Festbettvergasung mit BHKW)*, Zittau, 2016

[35] MEINERT, J. / EBERMANN, C. / TITZE, E.: *Latente Speicher für die Wärme-versorgung von Gebäuden – Zwischen Simulation und Technikum* in: GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis 2017, Ausgabe 5, S. 384 – 397

[36] Ausschuss für Gefahrstoffe -AGS-Geschäftsführung -BAuA. (Februar 2016). Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS). Ausschuss für Gefahrstoffe -AGS-Geschäftsführung -BAuA.

[37] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). (März 2017). Gefahrstoffverordnung -GefStoffV. Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).

[38] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz. (Februar 2015). Betriebssicherheitsverordnung -BetrSichV. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln. Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz.

[39] Ausschuss für Gefahrstoffe -AGS-Geschäftsführung -BAuA. (Oktober 2016). Ortsfeste Druckanlagen für Gase. Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS). Ausschuss für Gefahrstoffe -AGS-Geschäftsführung -BAuA.

[40] Das europäische Parlament und der Rat der Europäische-Union. (Dezember 2008). Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen. Amtsblatt der europäischen Union (EG) Nr. 1272/2008. EU: Das europäische Parlament und der Rat der Europäische-Union.

[41] SCHNEIDER, R. / SÉNÉCHAL, U. / POHL, R. / ZSCHUNKE, T.: Forschungsbericht: *Katalytische Vergasungsversuche am Holzvergaser-BHKW des TCV*, Zittau., 20.01.2017, Online verfügbar unter: http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/Bericht_Katalytische_Vergasung_final.pdf

[42] 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

[43] SCHNEIDER, R. / GRUSLA, S.: *Brennstoffvariation am Holzvergaser-BHKW des TCV*, Forschungsbericht, Zittau, April 2019

[44] STÖCKMANN, L.: *Erfassung und Darstellung der thermischen Verluste am bestehenden Holzvergaser-BHKW im Rahmen des Forschungsprojektes „TCV“ am Standort der HSZG*, Projektarbeit, Zittau, März 2017

[45] KAIWAY, R.: *Berechnung und Darstellung der thermischen Verluste an einem bestehenden Holzvergaser-BHKW im Rahmen des Forschungsprojektes „TCV“ am Standort der HSZG*, Diplomarbeit, Zittau, November 2018

[46] Kleiber: http://www.kleiberinfrared.de/index.php/de/amanwendungen/emissions grade.html. 2017.

[47] Bossert: *Emissionsgrade*. https://www.bossert-weissinger.de/pdf/kataloge_fluke_ su-emmissiongrad.pdf. : s.n., 2018.

[48] Testo: *Temperatur-Fibel: Messtechnik und Kalibrierung*, 3. Auflage. s.l. : Testo Industrial Service GmbH (Hrsg.), 2018.

[49] Air Liquide. (Juni 2018). Sicherheitsdatenblatt -Kohlenmonoxid.

[50] SCHNEIDER, M.: *Experimentelle und mathematische Modellierung der Festbettvergasung am Beispiel der Gleichstromvergasung von Holzhackschnitzeln - ein Beitrag zur Erhöhung der Prozeßtransparenz*, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, 2003, Dissertation.

[51] GNIELINSKI, V. *VDI-Wärmeatlas: Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt und im ebenen Spalt*, Kapitel G2, Berlin: Springer, 11. Auflage.

[52] STEINBRECHT, D.: *Verbrennung von Ersatzbrennstoff in der stationären Wirbelschicht*, Studie, 2000/2002.

[53] STEINBRECHT, D.: *Abschnitt II: Wirbelschichtfeuerungen, Schwerpunkt Stationäre Wirbelschichtfeuerungen*, 2. Auflage, Universität Rostock, 2008

[54] RWE AG: *RWE errichtet Versuchsanlage zur Phosphorgewinnung aus Klärschlamm*, Pressemitteilung, Online verfügbar unter: https://www.bvse.de/verwertung/nachrichten-altholz-ersatzbrennstoffe-bioabfall/4916-rwe-errichtet-versuchsanlage-zur-phosphorgewinnung-aus-klaerschlamm.html, abgerufen am 29.10.2019

[55] MENDEL, T. / KUPTZ, D. / ÜBERREITER, A. / HARTMANN, H.: *Schnellbestimmung des Wassergehaltes von Holzhackschnitzeln*, Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Berichte aus dem TFZ 52, Straubing, 2017, ISSN: 1614-1008

[56] SCHEBEK, L. ET AL.: *Bereitstellung einer aktuellen und harmonisierten Datenbasis als Beitrag zur Weiterentwicklung einer nachhaltigen Bioenergiestrategie*, Abschlussbericht zum Verbundvorhaben BioEnergieDat, BMU FKZ 03KB039