



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Institut für Prozeßtechnik,
Prozeßautomatisierung
und Meßtechnik



Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und
Feuerungstechnik



SACHBERICHT

HOCHTEMPERATURKONVERSION VON REST- UND ABFALLSTOFFEN FÜR ENERGIEDIENSTLEISTUNGEN

Autoren	Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze Dipl.-Ing. (FH) Bert Salomo Dipl.-Ing. (FH) Ralf Pohl Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Ausgabe	29.04.2022
Revision	4

Sachbericht

HORA

<Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen>

April 2022

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Autoren	Roman Schneider, Enrico Titze, Ralf Pohl, Bert Salomo, Prof. Jens Meinert, Prof. Tobias Zschunke
Projektlaufzeit	01.05.2019 – 31.12.2021
Dienststelle	Hochschule Zittau/Görlitz, University of Applied Sciences Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik (IPM) Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und Feuerungstechnik Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau
Thema	Biomassevergasung

Abstract

Das Projekt „Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen“ (HORA) hatte zum Ziel, unter Nutzung der thermochemischen Vergasung als zentralem Verfahrensschritt einer Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kopplung, die thermochemischen und fluiddynamischen Herausforderungen einer Flexibilisierung hinsichtlich des strombedarfsgeführten Anlagenbetriebes zu lösen. Dabei sollen als Energierohstoff Biomasse sowie biogene Rest- und Abfallstoffe eingesetzt und gleichzeitig Umweltverträglichkeit und Effizienz weiter verbessert werden.

Im Rahmen der Systemanalyse und Weiterentwicklung des Versuchsfeldes wurde das Laser-Doppler-Anemometer zur Volumenstrombestimmung im Produktgas messfahrtbegleitend eingesetzt und die Ergebnisse mit denen der üblichen Differenzdruckmessung verglichen. Auch konnte die Integration und Kalibrierung des Karmans-Vortex-Systems als weiteres Luftmengenmesssystem für das BHKW abgeschlossen werden.

Weiterhin wurden diverse Parametervariationen an der Biomassevergasungsanlage durchgeführt und die Prozessauswirkungen dokumentiert. Neben Brennstoffvariationen mit diversen Rest- und Abfallstoffen, wurde die Reaktoreintrittstemperatur des Vergasungsmittel Luft systematisch variiert und die Prozessauswirkungen dokumentiert. Die Katalysatorstrecke zur Minimierung der Motorabgasemissionen wurde kontinuierlich eingesetzt und diesbezüglich eine maßgebliche Minderung von Schadstoffemissionen auch im Rahmen einer Langzeitbetrachtung nachgewiesen.

Es wurden thermische Speichersysteme für ihren Einsatz in Biomassevergasungsanlagen ausgelegt, experimentell validiert sowie schließlich integriert und erfolgreich eingesetzt. Vorzugsweise wurden hierfür Latentwärmespeichersysteme verwendet, bezüglich der Vorwärmstrecke für das Vergasungsmittel erfolgte jedoch die Integration eines sensiblen Wärmespeichers auf Basis keramischen Materials. Es wurden Langzeitmessfahrten mit Be- und Entladung der thermischen Speichersysteme in verschiedenen Kombinationen durchgeführt und dabei die Anlagenstartzeiten und Kondensatbildungen v.a. in der Anfahrphase in den gasführenden Komponenten teilweise drastisch reduziert, was zu einer Verringerung des Anlageninstandhaltungs- und Wartungsaufwand führt.

FREIGABE

Autor(en)

Geprüft

Freigegeben

Änderungen

Rev	Datum	Name	Änderung(en)
0	03.03.2022	Schneider	Erster Entwurf
1	13.04.2022	Schneider	Einarbeitung wiss. und techn. Ergebnisse
2	21.04.2022	Schneider	Einarbeitung wiss. und techn. Ergebnisse, Gesamtformatierung
3	25.04.2022	Schneider	Weitere Überarbeitungen
4	28.04.2022	Schneider	Abschließende Überarbeitung und Formatierung

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Teil 1: Kurzfassung	12
1.1 Zielstellung.....	12
1.2 Realisierte Ergebnisse	12
1.3 Anwendungsmöglichkeiten.....	14
2 Teil 2: Ausführlicher Sachbericht	17
2.1 Ziel des Vorhabens	17
2.2 Stand der Wissenschaft und Technik	18
2.2.1 Biomassevergasungsanlagen	18
2.2.2 Speichertechnologien.....	21
2.3 Darstellung und Wertung.....	24
2.3.1 Erzielte wissenschaftliche und technische Ergebnisse	24
2.3.2 Vergleich zu Fortschritten bei anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen	118
2.4 Verwertungspotenzial der Vorhabensergebnisse	120
2.4.1 Beiträge des Vorhabens zur Erhöhung der eigenen wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit	120
2.4.2 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der eigenen wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit	122
2.4.3 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der Wirtschaft im Freistaat Sachsen	123
2.4.4 Angabe der bereits erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	125
2.5 Beiträge des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen.....	127
2.6 Einschätzung des Finanzierungs- und Zeitplanes	129
2.7 Angabe der Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	131
2.8 Angabe eventuell bereits angefallener Nettoeinnahmen.....	132
2.9 Ausführungen zur bisherigen Nutzung der geförderten Investitionsgegenstände.....	132
2.10 Ableitung zukünftiger Untersuchungsschwerpunkte	132
Literaturverzeichnis	134
Anlagen	138

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Biomassevergasungsanlage im Thermochemischen Versuchsfeld (TCV) der HSZG	20
Abb. 2-2	Vergaserprototyp X5 der Fa. MFC GmbH im Thermochemischen Versuchsfeld (TCV) der HSZG	21
Abb. 2-3	Überblick bezüglich der wichtigsten thermischen Speichertechnologien (aus [13]) und typischer Speichermedien: (1) Salzhydrat, (2) bzw. (3) Paraffin fest bzw. flüssig zwischen den Rohren eines Rohrbündel-Latentwärmespeichers, (4) Zuckeralkohol.	22
Abb. 2-4	Latentwärmespeicher in Rohrbündel-Bauweise (aus [13]); V.l.n.r.: Rohrbündel und Halterung als CAD-Darstellung, Latentwärmespeicher mit Sensorik (ungedämmt bzw. gedämmt)	23
Abb. 2-5	Typischer Messplot zur Charakterisierung eines Latentwärmespeichers (aus [13]) zur Bestimmung der wärmetechnischen Kenngrößen (siehe fiktives Typenschild)	24
Abb. 2-6	Erfassung der Partikelgrößenverteilung mit dem Particle Sizer 3321 sowie dem Diluter 3302A von TSI	25
Abb. 2-7	Partikelverteilungsspektren des Produktgases während des Anfahrvorgangs (oben) und während des stationären Betriebs (unten)	26
Abb. 2-8	Zeitverläufe des LDA-Signals während des Anfahrvorgangs bei Positionierung des Messvolumens in der Rohrmitte	27
Abb. 2-9	Beginnende Kondensatbildung während des Anfahrvorgangs (links) und stark benetzte Innenwand des Schauglases (rechts)	28
Abb. 2-10	Geschwindigkeitsprofile der Ganzfeldmessung vom 12.11.2019 im stationärem Betrieb	28
Abb. 2-11	3D-Plot und dimensionsloser 2D-Plot der Ganzfeldmessung vom 12.11.2019 (stationärer Betrieb)	29
Abb. 2-12	Allgemeiner Aufbau der Kalibrierstrecke (links: Eintritt über Ansaugkasten und anschließend Einlaufstrecke, Mitte: LDA-Messstrecke, rechts: Gebläse)	30
Abb. 2-13	Aufbau der LDA-Messstrecke mit Venturirohr und Messkammer	31
Abb. 2-14	Aufbau der Kalibrierstrecke: a) Seedingflansch, b) Ansaugkasten mit KV, c) Messstrecke und LDA an Traverse, d) Laserschutzvorhang (LSV) um Messstrecke, e) Gebläse, f) Versuchsstand komplett (ohne LSV), g) Seeding-Generator	32
Abb. 2-15	Beeinflussung der Parameter Drehzahl (links), Differenzdruck (mittig) und Absolutdruck im Rohrquerschnitt p_1 (rechts) durch Variation der relativen Drehfrequenz	34
Abb. 2-16	Vermessung der Geschwindigkeitsprofile am optischen Zugang (links), Strahleintritt und Schlierenbildung an Rohrrinnenwand durch Seeding (mittig) und Messvolumen innerhalb der Messstrecke (rechts)	35
Abb. 2-17	Vergleich der mittels LDA und Netzmessung ermittelten Kennlinien des Karman-Vortex-Systems	36
Abb. 2-18	Beispielhafte Darstellung der Verteilung relativer Häufigkeiten h_n bei der Erfassung von f_{KV} (links) und Δp (rechts) sowie der Zeitverläufe beider Signale (mittig)	37

Abb. 2-19	Darstellung der ermittelten Volumenströme in Abhängigkeit der relativen Gebläsedrehfrequenz (links) und finaler Kalibrierzusammenhang des KV im Vergleich mit der bisher verwendeten Funktion ECU (rechts)	37
Abb. 2-20	Sankey-Diagramm der Massebilanz für die Messfahrt vom 24.11.2020 bei Verwendung des Karman-Vortex-Systems und der mittels LDA ermittelten Kennlinie	39
Abb. 2-22	Profile (N = 8) der vertikalen Temperatur im Reaktor mit Darstellung der Reaktorgeometrie.....	41
Abb. 2-23	Zuordnung der Reaktionsphasen in Abhängigkeit von der Temperatur im Reaktor	42
Abb. 2-24	Verlauf der Temperatur im Reaktor und Festbettmaterialzusammensetzung in Abhängigkeit von der Betthöhe.....	44
Abb. 2-25	Übersicht der Ablaufschritte zur Einsatzbewertung der Rest- und Abfallstoffe	45
Abb. 2-26	links: Macadamianusschalen, rechts: Standardbrennstoff Nadelholz-Hackschnitzel.....	54
Abb. 2-27	Differenzdrücke in der Produktgasstrecke bei Umstellung von HHS auf Macadamianusschalen.....	55
Abb. 2-28	Links: Verblockung des LPM zwischen Zuführschnecke und Schleuse im Bereich eines 90°-Bogens, rechts: Blick von oben in Schleusenfallschacht	58
Abb. 2-29	Links: Verblockung im Schleusenraum; rechts: Brückenbildung im oberen Teil des Reaktors (hier Blick von oben in den Reaktor)	59
Abb. 2-30	Nach Einsatz der LPM-Presslinge; links: Blick von oben in den Reaktor; rechts: aus dem Reaktor entfernte Schlackebrocken	60
Abb. 2-31	Bereitstellungsformen des LPM, A: Brikett, B: Hackgut, C: Feinhackgut, D: zylindrische Presslinge.....	60
Abb. 2-32	Holziges Material aus dem Siebüberlauf; links: Laborprobe; rechts: Material für Vergasungstest	62
Abb. 2-33	Verlauf der Reaktorwandtemperaturen und der Produktgastemperatur, ab ca. 15 Uhr Einsatz der Siebüberlauf-HHS	64
Abb. 2-34	Verlauf der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter sowie elektrische BHKW-Leistung, ab ca. 15 Uhr Einsatz der Siebüberlauf-HHS	64
Abb. 2-35	Nach Einsatz der Siebüberlauf-HHS; links: Blick von oben in den Reaktor; rechts: aus dem Reaktor entfernte Schlackebrocken	65
Abb. 2-36	Kaltgaswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Vergasungslufttemperaturen [8].....	67
Abb. 2-37	Integration des Lufterhitzers in die Vergasungsmittelzuführung zum Reaktor	68
Abb. 2-38	Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der Messfahrten	69
Abb. 2-39	Grafische Darstellung des Verlaufes der Vergasungsmitteltemperaturen an unterschiedlichen Betriebsstellen und des stationären Zustandes in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur nach der internen Luftvorwärmung	71
Abb. 2-40	Mittlere Zusammensetzung und entsprechender Heizwert des Produktgases während der Versuchsphasen	74
Abb. 2-41	Verlauf der Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen	75

Abb. 2-42	Verlauf der Vergasungsmitteltemperaturen während der Versuchsphasen	76
Abb. 2-43	Verlauf der Temperaturen (Vergasungsmittel Reaktoreintritt, Reaktorwandtemperatur, Produktgas Reaktorausstritt)	77
Abb. 2-44	Verlauf der Volumenströme von Vergasungsmittel und Produktgas während der Versuchsphasen	77
Abb. 2-45	Verlauf der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter sowie elektrische Leistung des BHKW während der Versuchsphasen	78
Abb. 2-46	Profil der vertikalen Festbetttemperatur während der Versuchsphasen 1 und 2 mit Darstellung der Reaktorgeometrie	79
Abb. 2-47	Bilanzraum zur Bewertung der Versuche	81
Abb. 2-48	Vergleichende Darstellung von Mess- und Versuchsdaten in Abhängigkeit der Vergasungsmitteltemperatur	83
Abb. 2-49	Min-, Max-, u. Mittelwerte von Produktgasanteilen im Vergleich der Versuchsphasen 1 bis 3, Phase 1: blau; Phase 2: gelb; Phase 3: rot	84
Abb. 2-50	Für Versuchsabschnitt 1 (N = 19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Bewertungsparameter und -kennzahlen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur	86
Abb. 2-51	Für Versuchsabschnitt 1 (N = 19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur	87
Abb. 2-52	Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur	88
Abb. 2-53	Aufstellort der PCM-Speicher unter dem Vorratsbehälter der Anlage	89
Abb. 2-54	R&I-Fließschema der Biomassevergasungsanlage, Markierung: Anschlussstelle des Speicherkreislaufes	90
Abb. 2-55	Linkes Bild: Anschlussstelle des Speicherkreislaufes mit Umwälzpumpe, Membranausgleichsgefäß und Wärmeübertrager; rechtes Bild: gesamter Kreislauf mit Rohrstrecke zu den Speichern unter dem Brennstoffbehälter	91
Abb. 2-56	Schema des Speicherkreislauf, Reihenschaltung der PCM-Speicherdemonstratoren PCM1 und PCM2, Revision nach erfolgtem Aufbau	91
Abb. 2-57	LuVo-Speicher 2 an der Vergasungsluftstrecke	92
Abb. 2-58	Schema der Vergasungsluftstrecke mit integriertem LuVo-Speicher	93
Abb. 2-59	Exemplarischer Messdatenplot einer typischen Beladung der PCM-Speicherdemonstratoren an der Biomassevergasungsanlage	94
Abb. 2-60	Temperaturverlauf der Messstellen am LuVo-Speicher 2 während einer Beladung	95
Abb. 2-61	Temperaturverlauf der Messstellen am LuVo-Speicher 2 während einer Entladung	96
Abb. 2-62	Visualisierung der Zeitdauer zwischen Vergaser- und BHKW-Start (blau, Mittelwert aller Fahrten ohne Speichereinsatz 24,8 min [Strichlinie]) und bis zum Erreichen des stationären Betriebszustandes der Biomassevergasungsanlage (orange)	98
Abb. 2-63	Kondensatbildung am Schauglas in der Produktgasleitung – links: ohne Speichereinsatz; rechts: viermal bei unterschiedlichen Messfahrten mit verschiedenem Speichereinsatz a) PCM; b) PCM; c) LuVo; d) kombiniert	99
Abb. 2-64	Verlauf des Kondensatvolumens über der Schauglas-/Rohrhöhe	99

Abb. 2-65	CO-Emissionen Motorabgas – Langzeitverhalten.....	104
Abb. 2-66	NO _x -Emissionen Motorabgas – Langzeitverhalten	105
Abb. 2-67	Elektrische BHKW-Leistung – Langzeitverhalten	106
Abb. 2-68	Verlauf der Motorabgasemissionen bei Versuchsfahrt E2_a (HHS) und E2_LPM (Landschaftspflegematerial).....	107
Abb. 2-69	Zusammenhang der Motorabgastemperatur und der gemessenen NO _x - Emissionen (Messfahrt E2_f)	109
Abb. 2-70	Motorabgasemissionen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur	110
Abb. 2-71	Bilanzraum zur Stoff- und Energiestrombilanzierung.....	111
Abb. 2-72	Stoffstrombilanzierung der Gesamtanlage mittels Sankey-Diagramm	115
Abb. 2-73	Energiestrombilanzierung der Gesamtanlage mittels Sankey-Diagramm	116
Abb. 2-74	Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren [47]	128
Abb. 2-75	aktualisierter Balkenplan zum Projekt HORA gemäß der Änderungsbescheide vom 14.10.2020 und 03.05.2021	129

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Übersicht der im Berichtszeitraum 01/21 bis 12/21 durchgeführten Messfahrten im Projekt HORA	13
Tab. 1-2	Übersicht der Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Wissenschaft im Projekt HORA	15
Tab. 2-1	Gliederung der erzielten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse in HORA	24
Tab. 2-2	Vermessung des Zeitverlaufes während des Anfahrens der Biomassevergasungsanlage	26
Tab. 2-3	Ganzfeldmessungen im Nennbetrieb der Biomassevergasungsanlage	29
Tab. 2-4	Komponenten der Kalibrierstrecke	31
Tab. 2-5	Ermittelte Kalibrier- und Regressionskoeffizienten am E5T08171 9219A. 38	
Tab. 2-6	Vergleich der Massenbilanzierung für die Messfahrt vom 24.11.2020 unter Verwendung verschiedener Durchflussmesser und Kennlinien	38
Tab. 2-7	Für Reaktorbettproben angewendete Analysemethoden und Normen nach [20].....	43
Tab. 2-8	Zusammenfassung der Laborergebnisse für die Feststoffanalysen	43
Tab. 2-9	Übersicht der untersuchten Rest- und Abfallstoffe.....	46
Tab. 2-10	Zusammenstellung der Laboranalysenergebnisse für die Proben der Rest- und Abfallstoffe	49
Tab. 2-12	Ergebnisse Elementaranalyse Macadamianussschalen im Vergleich zu HHS	52
Tab. 2-13	Ergebnisse Immediatanalyse, Asche-Schmelz-Verhalten und Heizwert der Macadamianuss-schalen im Vergleich zu HHS	53
Tab. 2-14	Gegenüberstellung Zusammensetzung und Heizwert Produktgas bei Einsatz von Macadamianussschalen oder HHS, Mittelwerte über dem jeweiligen Auswertungszeitraum	55
Tab. 2-15	Gegenüberstellung Motorabgasemissionen bei Einsatz von Macadamianussschalen oder HHS	56
Tab. 2-16	Gegenüberstellung Brennstoffparameter und Wirkungsgrade bei Einsatz von Macadamianussschalen oder HHS.....	56
Tab. 2-17	Laboranalysenergebnisse des LPM bei unterschiedlichen Aufbereitungsstufen	58
Tab. 2-18	Zusammenfassung der LPM-Einsatztests	61
Tab. 2-19	Laboranalysenergebnisse für Siebüberlauf-HHS bei unterschiedlichen Aufbereitungsstufen	63
Tab. 2-20	Zusammenfassung des Siebüberlauf-HHS-Einsatztests	65
Tab. 2-21	Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme	68
Tab. 2-22	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten	70
Tab. 2-23	Reaktoreintrittstemperaturen des Vergasungsmittel Luft in den Versuchsphasen	70
Tab. 2-24	Ergebnisse der Immediat-, Brennwert- und Elementartanalyse der Brennstoff- und Filterstaubproben, Messfahrt LuVo 2-2	72
Tab. 2-25	Brennstoffcharakteristika für die Versuchsphasen.....	73
Tab. 2-26	Vergasungsmittelcharakteristika der Versuchsphasen	73
Tab. 2-27	Mittlere Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen	74
Tab. 2-28	Produktgascharakteristika der Versuchsphasen.....	74
Tab. 2-29	Anfallmenge Filterstaub.....	75

Tab. 2-30	Versuchsdatenauszug für die jeweilige Versuchsphase	80
Tab. 2-31	Daten der Stoffstrombilanzen für die Versuchsphasen in kg/h.....	82
Tab. 2-32	Daten der Energiestrombilanzen für die Versuchsphasen in kW	82
Tab. 2-33	Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse für die Vergasungsmitteltemperaturen	87
Tab. 2-34	Vergleich Messfahrten mit / ohne Speichereinsatz, bei etwa gleichen Rahmenbedingungen, schwarz: kein Speichereinsatz, blau: Latentwärmespeichereinsatz, grün: LuVo-Speicher im Einsatz, lila: beide Speichertypen im Einsatz.....	97
Tab. 2-35	Emissionsminderungspotenzial der für den weiteren Versuchsbetrieb ausgewählten Emissionsminderungstechnologie	101
Tab. 2-36	Darstellung der über den Auswertezeitraum gemittelten Emissionen und erzeugten elektrischen Leistung der emissionsoptimierten Betriebsweise des BHKW	102
Tab. 2-37	Relevante Anlagenparameter zur Bewertung des zeitabhängigen Emissionsverhaltens und der BHKW-Leistung	103
Tab. 2-38	Zeitintervalle der Versuchsfahrten E2_a (HHS) und E2_LPM (Landschaftspflegematerial)	107
Tab. 2-39	Versuchsfahrt E2_a (HHS) und E2_LPM (Landschaftspflegematerial)....	108
Tab. 2-40	Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten.....	112
Tab. 2-41	Daten der Stoffstrombilanz in kg/h	113
Tab. 2-42	Daten der Energiestrombilanz in kW	114
Tab. 2-43	Zusammenstellung ausgewählter technischer Kennwerte	117
Tab. 2-44	Zusammenstellung der berechneten Bewertungskriterien	117
Tab. 2-45	Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung nach Änderungsbescheid	130

Abkürzungsverzeichnis

A	Aschegehalt
AGR	Abgasrezirkulation
AE	Arbeitsetappe
anl	Anlieferungszustand
AP	Arbeitspunkt
BHKW	Blockheizkraftwerk
BTEX	leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol)
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlenfaserverstärkte Kunststoffe
CH ₂ O	Formaldehyd
C ₂ H ₆	Ethan
C ₆ H ₆	Benzol
Cl	Chlor
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
DT	Erweichungstemperatur, engl.: Deformation Temperature
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	expandiertes Polystyrol
F	Volumenstrom (KKS)
FEE	Fördergesellschaft für Erneuerbare Energien
FKZ	Förderkennzeichen
Flü	Flüchtige Bestandteile (Immediatanalyse)
FT	Fließtemperatur, engl.: Flow Temperature
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GC	Gaschromatograph
GR	Gärrest
GuD	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk
H	Elementarer Wasserstoff
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HHS	Holzhackschnitzel
HHV	Brennwert, engl.: higher heating value
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
HVG	Holzvergaser (Vergaser)
IEA	International Energy Agency
IPM	Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization

KAT	Emissionsminderungsstrecke (KAT-Strecke)
KK	Kühlkreislauf
KKS	Kraftwerk-Kennzeichensystem
KV	Karman-Vortex-Durchflussmesser
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Q	Zusammensetzung (KKS)
LDA	Laser-Doppler-Anemometer
LHV	Heizwert, engl.: lower heating value
LOI	Interessensbekundung, engl.: Letter of Intent
LPM	Landschaftspflegematerial
LuVo	Luftvorwärmung
LWS	Latentwärmespeicher
M	Meilenstein
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MDF	Mitteldichte Holzfaserplatte
MF	Messfahrt
MS	Messstelle
n	Drehzahl
N	Probenanzahl
N	Elementarer Stickstoff
N ₂	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxide
O	Elementarer Sauerstoff
O ₂	Sauerstoff
P	Druck (KKS)
P _{el}	Elektrische Leistung
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCM	Phase-Change-Material
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
S	Schwefel
SCR	Selektive katalytische Reaktion
SO ₂	Schwefeldioxid
T	Temperatur (KKS)
TCV	Thermochemisches Versuchsfeld
TRL	Rücklauftemperatur
TS	Trockensubstanz
Tu	Turbulenzgrad
TVL	Vorlauftemperatur
U	Thermische Leistung (KKS)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VZÄ	Vollzeitäquivalent
wf	wasserfrei
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor
WRG	Wärmerückgewinnung
WÜ	Wärmeübertrager
WT	Wärmeübertrager (Wärmetauscher)
ZKWL	Zittauer Kraftwerkslabor

1 Teil 1: Kurzfassung

1.1 Zielstellung

Gesamtziel des Vorhabens war es, unter Nutzung der thermochemischen Vergasung als zentralem Verfahrensschritt einer Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kopplung, die thermochemischen und fluiddynamischen Herausforderungen einer Flexibilisierung hinsichtlich des strombedarfsgeführten Anlagenbetriebes zu lösen. Dabei sollen als Energierohstoffe Biomasse sowie biogene Rest- und Abfallstoffe eingesetzt und gleichzeitig Umweltverträglichkeit und Effizienz weiter verbessert werden.

1.2 Realisierte Ergebnisse

Durch die Projektarbeit wurde das Thermochemische Versuchsfeld (TCV) der Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG) insgesamt (beinhaltet die Versuchsanlagen inkl. der Mess- und Analysetechnik) durch eine fortwährende Systemanalyse stetig weiterentwickelt, sodass vorhandene Schwachstellen überarbeitet, zusätzliche Möglichkeiten zur Systembewertung aufgebaut und weitere Versuchsanlagen integriert werden konnten.

Im Rahmen des Projektes HORA wurden

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

im Berichtszeitraum insgesamt 64 Versuchsfahrten im bestehenden TCV durchgeführt. 17 dieser Versuchsfahrten beinhalteten u.a. Langzeitmessfahrten zur Be- und Entladung der Latentwärmespeicher und des LuVo-Speichers. Weitere sieben Versuchsfahrten sind für die Integration und Betriebsparameteranpassung einer zusätzlichen KAT-Strecke zur Minimierung der Motorabgasemissionen durchgeführt worden. Der Einsatz und die Variation möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen in Bezug auf das Motorabgas wurde mit Hilfe der KAT-Strecke im Rahmen von fünf Messfahrten untersucht. Darüber hinaus fanden umfangreiche Tests (15 Versuchsfahrten) mit einem neu im TCV integrierten Prototyp zur Festbett-Gleichstrom-Vergasung mit Stroh statt. In weiteren 13 Versuchsfahrten wurden im Rahmen der AE1.2 Brennstoffvariationen (z.B. Macadamianusschalen, Landschaftspflegematerial) durchgeführt und einer detaillierten Auswertung unterzogen. Für die Vorbereitung und Durchführung zur Betriebsvariation der Vergasungsmitteltemperatur wurden insgesamt sieben Versuchsfahrten durchgeführt.

Für den Überblick sind in Tab. 1-1 alle im hier relevanten Berichtszeitraum von 01/21 bis 12/21 durchgeführten Messfahrten mit ihrem jeweiligen Untersuchungsziel dargestellt. In [1] ist dies analog für den Berichtszeitraum des Zwischenberichtes (05/19 bis 12/20) erfolgt.

Tab. 1-1 Übersicht der im Berichtszeitraum 01/21 bis 12/21 durchgeführten Messfahrten im Projekt HORA

Datum	Betreffende Anlage	Beschreibung
13.01.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest Landschaftspflegematerial
02.02.2021	Vergaser, BHKW	Beladung Latentwärmespeicher
05.02.2021	Vergaser, BHKW	Ent- und Beladung Latentwärmespeicher
08.02.2021	Vergaser, BHKW	Entladung Latentwärmespeicher
10.03.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest Landschaftspflegematerial-Pressling und Staubmessung Motorabgas
22.03.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo-Speicher klein
23.03.2021	Vergaser, BHKW	Entladung LuVo-Speicher klein
15.-16.04.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo-Speicher klein, Variation Pausenzeiten (10h, 5h)
19.05.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo-Speicher groß
20.05.2021	Vergaser, BHKW	Entladung LuVo-Speicher groß, Pause 15h
25.05.2021	Vergaser, BHKW	Vertikale Temperaturverteilung Reaktor, Prozessabbruch und Reaktorspülung mit N ₂ sowie anschl. Probenahme der Reaktorbettschichten
9.-10.06.2021	Vergaser, BHKW	Be- und Entladung LuVo-Speicher groß, Pause 10h
29.-30.06.2021	Vergaser, BHKW	Be- und Entladung LuVo-Speicher groß und Latentwärmespeicher, Pause 15h
01.11.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo
15.11.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo
18.11.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo u. vertikale Temp.-verteilung Reaktor
06.12.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo
10.12.2021	Vergaser, BHKW	Einsatztest LuVo
17.12.2021	Vergaser, BHKW	Einsatz LuVo und vertikale Temp.-verteilung Reaktor
21.12.2021	Vergaser, BHKW	Einsatz LuVo und vertikale Temp.-verteilung Reaktor

Ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt war die Nutzung und Weiterqualifizierung des vorhandenen Laser-Doppler-Anemometers (LDA) als berührungslose Geschwindigkeitsmessung im Produktgas, die für ausgewählte Messfahrten begleitend eingesetzt wurde und deren Ergebnisse mit denen der bestehenden Messtechnik (Differenzdruckmessung) verglichen wurden. Darüber hinaus konnte das LDA als Referenzmesseinrichtung und damit zentraler Bestandteil einer neu installierten Kalibrierstrecke für Gasvolumenstrommessungen genutzt werden. Somit konnte die Kalibrierung des Karman-Vortex-Systems (KV) als weiteres Luftmengenmesssystem für das BHKW mit Hilfe der neu aufgebauten Kalibrierstrecke abgeschlossen werden.

Weiterhin wurden diverse Parametervariationen an der Biomassevergasungsanlage durchgeführt und die Prozessauswirkungen dokumentiert. Neben Brennstoffvariationen mit diversen Rest- und Abfallstoffen, wurde mit einem Luftherhitzer eine zusätzliche Vorwärmstrecke für das Vergasungsmittel Luft integriert und eingesetzt, die es erlaubt, das Vergasungsmittel mit einer definierten Temperatur dem Reaktor zuzuführen. Die Brennstoffvariationen beinhalteten umfangreiche Laboranalysen und Einsatztests, u.a. von Landschaftspflegematerial, holziger Siebüberlauf einer biologisch-mechanischen Abfallbehandlungsanlage, Macadamianussschalen, sowie Untersuchungen zur Einsatzfähigkeit von Abfällen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK). Als Ergebnis dieser Brennstoffvariationen war sowohl der Einsatz von Landschaftspflegematerial als auch des holzigen Siebüberlaufes nicht erfolgreich und bedarf weiterer Untersuchungen. Demgegenüber war der Testeinsatz der Macadamianussschalen im Rahmen mehrere Vergasungsversuche (Kurzzeit-, Kaltstart- sowie Langzeitmessfahrten) nach Anpassung einiger Anlagenparameter erfolgreich und wird weiterverfolgt. Durch den umfangreichen Testeinsatz von Strohpellets im zusätzlich im TCV installierten Prototyp zur Festbett-Gleichstrom-Vergasung konnte die erfolgreiche Vergasung von Weizenstrohpellets

nachgewiesen werden, die in bisherigen vergleichbaren technischen Konzepten nicht möglich war.

Die Betriebsvariation der Vergasungsmitteltemperatur mit einer marktüblichen Biomassevergasungsanlage konnte durch Integration einer Lufterhitzerstrecke und deren Einbindung in die Anlagensteuerung erfolgreich durchgeführt werden. Das grundlegende Ziel dieser Parametervariation, die Optimierung der thermochemischen Reaktionen um damit eine signifikante Steigerung der Effizienz (Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsetzungsgrad) zu erreichen, konnte nur teilweise nachgewiesen werden. Jedoch ist durch die Kombination der Gaserzeugung und Gasnutzung im Motor die Gesamtanlage in ihrem Betriebspunkt festgelegt. Somit fehlen für eine Variation bestimmter Betriebsparameter zur Untersuchung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen die Freiheitsgrade in der Anlagenfahrweise.

In Bezug auf die Speichertechnologien wurden thermische Speichersysteme für ihren Einsatz in Biomassevergasungsanlagen ausgelegt, experimentell validiert sowie schließlich integriert und erfolgreich eingesetzt. Vorzugsweise sind hierzu Latentwärmespeichersysteme betrachtet worden. Bezüglich der Vorwärmstrecke für das Vergasungsmittel erfolgte die Integration eines sensiblen Wärmespeichers auf Basis keramischen Materials. Es wurden Langzeitmessfahrten mit Be- und Entladung der thermischen Speichersysteme in verschiedenen Kombinationen durchgeführt und dabei eine signifikante Vorwärmung von Anlagenkomponenten erreicht. Demzufolge konnten die Anlagenstartzeiten und Kondensatbildungen v.a. in der Anfahrphase in den gasführenden Komponenten teilweise drastisch reduziert werden, was zu einer Verringerung des Anlageninstandhaltungs- und Wartungsaufwand führt.

Bezüglich der Motorabgasemissionen wurde die neu integrierte KAT-Strecke weiterhin messfahrtbegleitend eingesetzt. Hierbei konnten mit der emissionsoptimierten Anlagenfahrweise die Emissionen ggü. dem Auslieferungszustand in Bezug auf Kohlenstoffmonoxid (CO) um bis zu 25 % und bei Stickoxiden (NO_x) sogar um bis zu 60 % reduziert werden. Diese Emissionsminderungsraten konnten darüber hinaus auch unter Beachtung des Langzeitverhaltens von Motor und Katalysatoren nachgewiesen werden. Im Zusammenhang mit den durchgeführten Betriebsvariationen (Vergasungsmittel, Brennstoff) wurden ebenfalls die Motorabgasemissionen erfasst und bewertet.

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. 62 % und ein Brennstoffausnutzungsgrad von 70 % ermittelt.

1.3 Anwendungsmöglichkeiten

Im Zusammenhang mit etwaigen Anwendungsmöglichkeiten der Projektstätigkeiten und Ergebnisse stehen die vielfachen Interessensbekundungen (in Form von Letter of Intent (LOI), siehe Anlage 1 bis 8) aus der Industrie. So wurden neben den schon zu Projektbeginn bestehenden Kooperationen mit sächsischen Unternehmen aus verschiedenen Technologiefeldern (ULT AG; ECU.de; SRW Metalfloat GmbH; AEL Apparatebau GmbH; WätaS Wärmetauscher GmbH) während der Projektbearbeitung weiteres Interesse aus Industrie und von kommunalen Entsorgungsbetrieben, vor allem in Bezug auf die Verwertung von biogenen Rest- u. Abfallstoffen, bekundet. Diesbezüglich wurden weitere LOI durch die Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH (EGS) und durch die Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (WEV) bekundet, welche auch Materialproben von Rest- und Abfallstoffen für Einsatztests zur Verfügung stellten. Die Prüfung der Machbarkeit der energetischen Verwertung von Macadamianussschalen als Reststoff der Macadamianussproduktion

erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit und in Zusammenarbeit mit der Naturamus GmbH (Tochtergesellschaft der WALA Heilmittel GmbH) und der Klimaschutzorganisation Atmosfair gGmbH. Einen Überblick der wissenschaftlichen Zusammenarbeit im Projekt HORA mit Einrichtungen aus Wissenschaft und Wirtschaft gibt Tab. 1-2 und zeigt damit das Potenzial für Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse.

Tab. 1-2 Übersicht der Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Wissenschaft im Projekt HORA

Einrichtung	Standort	Thematische Zusammenarbeit
ULT AG	Löbau	Gasfiltertechnik
ECU.de (Glaubitz GmbH & Co.KG)	Zittau	Volumenstrommessungen
SRW metalfloat GmbH	Rötha	CFK-Entsorgung
RTT GmbH	Zittau	CFK-Entsorgung
AEL Apparatebau GmbH	Leisnig	Wärmespeicher
WätaS Wärmetauscher GmbH	Olbernhau	Wärmespeicher
Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH	Merseburg	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH	Großpösna	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
naturamus GmbH (WALA Heilmittel GmbH)	Aichelberg	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Atmosfair gGmbH	Berlin	Vergasung von Rest- und Abfallstoffen
United Tobacco Processing Ltd.	Sri Lanka	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
MEHA Dämmstoff und Handels GmbH	Schifferstadt	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Süd-Oberlausitzer Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungs- GmbH	Zittau	Vergasung von Rest- und Abfallstoffen
Burkhardt GmbH	Mühlhausen	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Spanner Re ² GmbH	Neufahrn i.NB	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
MFC GmbH	Dresden	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
GICON - Großmann Ingenieur Consult GmbH	Dresden	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Lighter Leaf Ltd.	London, GB	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Stadtwerke Soltau GmbH & Co. KG	Soltau	Vergasung von Rest- und Abfallstoffen
Arsham Clean energy	Eskisehir, Türkei	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
Deutsches Biomasseforschungszentrum	Leipzig	Energetische Nutzung von Biomasse allg.
Jan Evangelista University Usti nad Labem	Usti nad Labem, CZ	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
SRH Berlin	Berlin	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
TU Dresden	Dresden	Energetische Nutzung von Biomasse allg.
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)	Hermesdorf	Kombination von Vergasung und Brennstoffzelle
Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)	Jena	Energetische Nutzung von Biomasse allg.
HTWK Leipzig	Leipzig	Vergasung von biogenen Rest- und Abfallstoffen

Das Potential für den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen in der Energiebereitstellung Deutschlands liegt bei 10 bis 15 % des Primärenergiebedarfs [10]. Dabei ist berücksichtigt, dass das stoffliche Recycling Priorität hat. Damit gehören die Rest- und Abfallstoffe seit jeher zum Portfolio der nationalen Energiequellen, die zur

Unabhängigkeit der Energieversorgung beitragen. Zu den Technologien, die diese Einbindung effizient ermöglichen, gehört auch die Vergasung. Die Bedeutung dezentraler Nutzung von monovalenten Strömen an Rest- und Abfallstoffen in effizienten und dafür gestalteten Anlagenkonzepten könnte durch die aktuellen politischen Entwicklungen des Jahres 2022 nun die angemessene und notwendige Aufmerksamkeit erhalten. Es wird dadurch voraussichtlich zu einem Nachfrageschub kommen, auf den wir von wissenschaftlich-technischer Seite her durch langfristigen gezielten Fördermitteleinsatz gut vorbereitet sind.

Die Projektergebnisse aus dem Bereich der Wärmespeicherentwicklung kommen Unternehmen aus der Region dadurch zugute, dass sich u.a. der Fachbereich Technische Thermodynamik der HSZG weiter zu einem wichtigen regionalen Kompetenzträger auf dem Gebiet der wärmetechnischen Auslegung und systemischen Integration von Wärmespeichern entwickelt. Der Transfer dieser Kompetenzen in die regionale Wirtschaft erfolgt z.B. in Form häufig stattfindender Beratungsgespräche, im Rahmen von Forschungs- und Dienstleistungsaufträgen und durch Partnerschaften mit Unternehmen der Region in geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Dies betrifft jedoch nicht mehr nur die Entwicklung und Systemintegration von Wärmespeichern, sondern aktuell in zunehmendem Maße auch Aktivitäten zu deren Normung und deren Einsatz als Hauptkomponente bei der Erstellung von Abwärmenutzungskonzepten für thermische Industrieprozesse in Unternehmen der Region Oberlausitz.

2 Teil 2: Ausführlicher Sachbericht

2.1 Ziel des Vorhabens

Gesamtziel des Vorhabens war es, unter Nutzung der thermochemischen Vergasung als zentralem Verfahrensschritt einer Versuchsanlage zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) die thermochemischen und fluiddynamischen Herausforderungen hinsichtlich der strombedarfsgeführten Flexibilisierung des Anlagenbetriebes zu lösen. Dabei sollen als Energierohstoffe Biomasse sowie biogene Rest- und Abfallstoffe eingesetzt und gleichzeitig Umweltverträglichkeit und Effizienz weiter verbessert werden. Denn die Voraussetzung für eine zukünftig verstärkte Integration von KWK-Anlagen 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), Menge sowie Leistung an die von den Netzen vorgegebenen Bedarfe und darüber hinaus eine umweltverträgliche Emissionskontrolle und Reststoffaufbereitung.

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-, Produktgas- und Abgasströmen. Diese Daten bilden die Basis für die Entwicklung anwendungsorientierter Simulationsalgorithmen des Betriebsverhaltens der Anlage und deren messtechnischer Validierung. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Phasen des An- und Abfahrens der Anlage. Thermische Energieverlustströme sollen detektiert und quantifiziert werden, um Konzepte zur effizienten anlageninternen Nutzung der Abwärme zu erarbeiten und umzusetzen.

Ein wichtiges Teilziel bestand außerdem in der Entwicklung maßgeschneiderter thermischer Speicherkomponenten (Wärmespeicher) für unterschiedliche Einsatzszenarien im System. Dazu zählt neben der bereits erwähnten 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 zeitversetzter, exergetisch effizienter Nutzung innerhalb (Brennstofftrocknung, thermische Abgasnachbehandlung, Warmhaltebetrieb) oder außerhalb der Anlage (Heiz-, Prozesswärme). Gerade zur anlageninternen Abwärmenutzung während der Startphase derartiger Anlagen bieten sich Potenziale. Mit bevorrateter Wärme aus vorangegangenen Fahrzyklen lassen sich Anlagenkomponenten als auch das Vergasungsmittel vorwärmen. Dies hat einen signifikant beschleunigten Anfahrprozess zur Folge, wobei weniger minderwertiges Produktgas anfällt und die Anlageneffizienz gesteigert würde. Diesbezüglich sollen die vorhandenen Konzepte zur Einbindung von Wärmespeichertechnologien in die Biomassevergasungsanlage umgesetzt und validiert werden.

Die beim Anlagenbetrieb entstehenden Umweltbelastungen, v.a. hinsichtlich der Motorabgasemissionen, sollten weiter reduziert werden, z.B. durch geeignete und miteinander kombinierte Primär- und Sekundärmaßnahmen gegen die Entstehung von z.B. Stickstoffoxiden.

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.2.1 Biomassevergasungsanlagen

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-Blockheizkraftwerke (Gasmotoren-BHKW). 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 Besonderheit der Technologie besteht vor allem darin, dass aus einem festen Energieträger ein brennbares Gas erzeugt wird. Anstelle der technisch aufwändigen Umwandlung von Wärme in Strom, z.B. in einem extern befeuerten Dampfkraftprozess, kann dieses brennbare Gas in Motoren unmittelbar zur Stromerzeugung genutzt werden. Das führt als entscheidender Vorteil der Vergasung dazu, dass bereits bei vergleichsweise kleinen elektrischen Leistungen 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. Durch die vergleichsweise hohen elektrischen Wirkungsgrade sind Vergasungsanlagen besonders für den dezentralen Einsatz prädestiniert. Entsprechend bieten diese ein hohes Wärmenutzungspotenzial und ein hohes Maß an regionaler Wertschöpfung. Die komplexe Verfahrenstechnik von der Gaserzeugung über die Gasreinigung bis zur Gasnutzung führt jedoch immer noch zu spezifisch hohen Investitionskosten. Die Wirtschaftlichkeit wird folglich nur erreicht, wenn durch entsprechende Auslegung eine Anlage zumindest etwa 5.000 Stunden pro Jahr (Vollastbenutzungsdauer) betrieben und die dabei entstehende Wärme möglichst vollständig auch mit kommerziellem Gegenwert genutzt werden kann. Während diese vorangehenden Abschätzungen für hochwertige (Energie-)Rohstoffe gelten, kann die Wirtschaftlichkeit durch integrierte Betrachtung in der Gesamtprozesskette der Rest- und Abfallstoffnutzung schon bei geringeren Vollastbenutzungsdauern erreicht werden, wenn andere Entsorgungspfade als Referenz in die Betrachtung einbezogen werden. Dies kann dazu führen, dass die betriebswirtschaftliche Belastung durch Brennstoffkosten entfällt und möglicherweise sogar durch Entsorgungsgutschriften ersetzt wird.

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.

Aus Biomassevergasungsanlagen mit anschließender motorischer Gasnutzung werden mit dem Motorabgas verschiedene luftverunreinigende Stoffe (CO, NO_x, Benzol (C₆H₆) etc.) freigesetzt. Eine Einordnung der Emissionswerte und ausführliche Darstellung des

diesbezüglichen Standes von Wissenschaft und Technik liefert [2]. Gerade im Kontext der aktuellen Diskussion um den prioritären Einsatz von biogenen Rest- und Abfallstoffen, scheint es angebracht, die entsprechenden 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.

Aus den Ergebnissen eines Verbundprojektes zur Weiterentwicklung der kleintechnischen Biomassevergasung (siehe [3] und [4]) kristallisierten sich mit Stand 2012 folgende Schwachstellen bei der Anlagentechnik zur Biomassevergasung mit KWK heraus:

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

Im Rahmen der Projekte ([1], [5], [6]) konnten u.a. folgende Erkenntnisse erarbeitet werden, die auch den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik der kleintechnischen Biomassevergasung beschreiben:

- 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 nur sehr stark eingeschränkt 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 Einsatztests alternativer Brennstoffe (biogene Rest- und Abfallstoffe) wurde u.a. im Projekt HORA festgestellt, dass sich vor allem durch niedrige Ascheerweichungstemperaturen einige dieser alternativen Brennstoffe für den Einsatz in marktüblichen Festbett-Gleichstrom-Vergasern nicht eignen und das bei deren Einsatz die Stickstoffoxidemissionen im Motorabgas zum Teil deutlich über dem Emissionsniveau bei Verwendung des Standardbrennstoffes liegen. Somit ist es notwendig, geeignete zusätzliche Emissionsminderungsmaßnahmen einzusetzen.
- In diesem Zusammenhang ist der Einsatz von Stroh für die Festbett-Gleichstrom-Vergasung nicht Stand der Technik [7]. Im Rahmen von HORA konnten jedoch unter Nutzung eines Vergaserprototyps für eine Versuchsreihe Strohpellets als Brennstoff erfolgreich eingesetzt werden.
- 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, selten Gasanalytik) ist für eine energetische Optimierung noch nicht ausreichend.

Hinsichtlich der derzeitigen praktischen Anwendung kleintechnischer Biomassevergasungsanlagen im europäischen Raum kann nach Angabe der International Energy

Agency (IEA) [9] davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt 2021 mehr als 1700 Anlagen und dabei v.a. Festbettvergaser mit Holzhackschnitzel (HHS) als Einsatzstoff betrieben werden. Als Anlagenstandorte werden hauptsächlich Deutschland, Österreich und Italien aufgeführt. Darüber hinaus werden dezentralen Anlagen an mehreren Standorten in Großbritannien sowie in Form von Anlagenparks im Baltikum, in Kanada und in Japan betrieben. In Nordeuropa (Schweden, Finnland) werden v.a. großtechnische Anlagen mit Wirbelschichtvergasung und Methanisierung des Synthesegases entwickelt und betrieben (z.B. GoBiGas der Göteborg Energi, Meva Energy AB).

Während der Projektlaufzeit erschienen u.a. folgende Veröffentlichungen, die den Stand von Wissenschaft und Technik der hier betrachteten Technologie beschreiben:

- SCHRAUBE, C., FEHRENBACH, D., KREMERS, E., BÜCHNER, D., THEURICH, S., WURDINGER, S.: **DBFZ Report Nr. 42**, Rahmenbedingungen für einen optimierten Betrieb von kleinen biomassebasierten BHKW, Leipzig, DBFZ, 2021, ISBN: 978-3-946629-75-7, DOI: 10.48480/w956-8a59
- KLEMM, M.: **Small Scale Biomass Gasification for Rural Electrification**. In: KALTSCHMITT, M. (ed.), Energy from Organic Materials (Biomass) (S. 715), 2019, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_252
- Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V.: **Holzgas-Branchenguide 2020**, https://www.feeev.de/images/FEE__Holzgas_Branchenguide_2020.pdf

Es wurden außerdem Forschungsprojekte identifiziert, die eine thematische Ähnlichkeit aufweisen. Eine Übersicht dieser ist in Kapitel 2.3.2 aufgeführt. Ersichtlich sind dabei die thematischen Schwerpunkte hinsichtlich Einsatz alternativer Brennstoffe, der Verwertungsoptionen fester Vergaserrückstände und der Produktgasaufbereitung zu Synthesegas.

Für die praktischen Versuche wurde die im Projekt Zittauer Kraftwerkslabor – Thermochemisches Versuchsfeld [5] an der HSZG aufgebaute marktübliche Biomassevergasungsanlage inklusive der notwendigen Peripherie (vgl. Abb. 2-1) mit vorgeschalteter Biomassetrocknungsanlage eingesetzt. Außerdem erfolgte der Einsatz eines weiteren Vergasungsversuchsstandes (vgl. Abb. 2-2). Dieser Prototyp einer Vergasungsanlage der Fa. MFC Multifuel Conversion GmbH ist aufgrund seiner Ausführung und zusätzlicher mechanischer Komponenten in der Lage, Brennstoffe über ein Festbett-Gleichstrom-Vergasungsverfahren umzusetzen, die einen – im Vergleich zu Holz – niedrigen Asche-Schmelz-Temperaturbereich und relativ hohe Aschegehalte aufweisen.



Abb. 2-1 Biomassevergasungsanlage im Thermochemischen Versuchsfeld (TCV) der HSZG



Abb. 2-2 Vergaserprototyp X5 der Fa. MFC GmbH im Thermochemischen Versuchsfeld (TCV) der HSZG

2.2.2 Speichertechnologien

Ein wichtiges Teilziel des Projektes HORA bestand darin, thermische und stoffliche Speichertechnologien zukünftig sowohl anlagenintern als auch prozessunterstützend in Biomassevergasungsanlagen einzusetzen und deren Betrieb dadurch energetisch effizienter und emissionsärmer zu gestalten. Ein konkretes Problem thermischer Energiespeicher dabei ist, dass deren Betriebsparameter optimal auf die Charakteristik der Anlage abgestimmt sein müssen und diese daher aufgrund des eingeschränkten Angebotes am Markt nicht „von der Stange“ beschaffbar sind. Stoffliche Speicher dagegen sind als energietechnische (Einzel-)Komponenten in großer Auswahl Stand der Technik (z.B. in Form von Behältern 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. Dabei müssen für eine Integration gewisse Randbedingungen und Regularien eingehalten werden, welche in Hinblick auf die Brennbarkeit (Explosivität) und Toxizität des Produktgases sehr umfangreich sind. Ein sehr detaillierter Überblick über alle Formen von Energiespeichern ist u.a. in [11] enthalten. Dabei sowohl mechanische als auch elektrische, thermische und chemische (= stoffliche) Speicher klassifiziert und hinsichtlich der physikalischen und chemischen Grundlagen sowie Einsatzszenarien beschrieben. An dieser Stelle soll aus den o.g. Gründen der weitere Fokus ausschließlich auf die thermischen Energiespeicher gerichtet werden.

Thermische Energiespeicher speichern Wärme in Form von innerer Energie oder als physikalische oder chemische Bindungsenergie bei Temperaturen oberhalb ("Wärme") oder unterhalb ("Kälte") der Umgebungstemperatur. Kältespeicher spielen für den Einsatz in Verbindung mit Biomassevergasungsanlagen kaum eine Rolle, solange Abwärme nicht zur Kälteerzeugung (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) genutzt wird. Die am Ende des Jahres 2020 veröffentlichte DIN 2384 (Thermische Energiespeicher – Terminologie, Anforderungen, Kenngrößen, Prüfgrundlagen) [12], die unter Federführung des Inhabers des Fachgebietes Technische Thermodynamik an der HSZG erarbeitet wurde, fasst alle wichtigen thermischen Speichertechnologien, deren physikalische Wirkprinzipien sowie die wichtigsten Kenngrößen für deren Charakterisierung und systemische Integration zusammen. Ein Überblick über den Inhalt dieser Norm ist auch in [13] zu finden.

Im aktuellen Kontext der Dezentralisierung der Energieversorgung mit dem Fokus auf den Einsatz erneuerbarer Energien, der Notwendigkeit der Substitution fossiler Energieträger auch und vor allem bei der Wärmeversorgung zur Bewältigung der Klimakrise und der Erreichung einer zeitnahen Unabhängigkeit von Importen fossiler Energieträger erhält die Entwicklung effizienter thermischer Speichertechnologien einen enormen Auftrieb. Es ergibt sich ein riesiges Potenzial weiterer erschließbarer Einsatzfelder und der Zeitraum bis zur Amortisation thermischer Speichersysteme verkürzt sich infolge ständig steigender Energiepreise, damit werden diese Technologien wirtschaftlich interessanter und setzen sich am Markt durch.

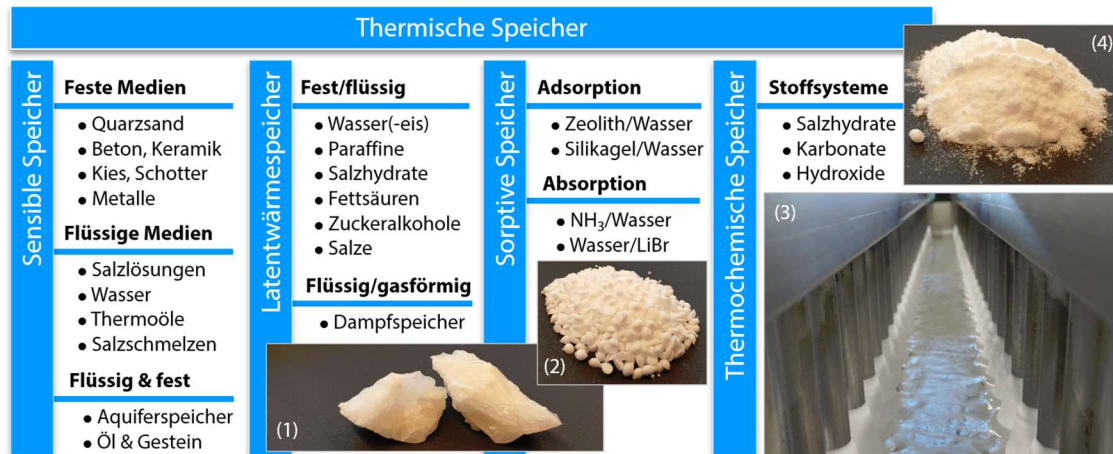


Abb. 2-3 Überblick bezüglich der wichtigsten thermischen Speichertechnologien (aus [13]) und typischer Speichermedien: (1) Salzhydrat, (2) bzw. (3) Paraffin fest bzw. flüssig zwischen den Rohren eines Rohrbündel-Latentwärmespeichers, (4) Zuckeralkohol.

An dieser Stelle soll lediglich noch einmal ein kurzer Überblick bezüglich der verfügbaren thermischen Speichertechnologien gegeben werden, typische Speichermedien sind in Abb. 2-3 aufgelistet.

- **Sensible** thermische Speicher nutzen die Wärmekapazität eines festen oder flüssigen Speichermediums im Zusammenspiel mit einer Temperaturdifferenz. Beim Beladen mit Wärme steigt die Temperatur im Speicher, beim Entladen sinkt die Temperatur – deshalb wird der Begriff sensible (= fühlbare) Wärme genutzt. Das BHKW verfügte bereits über einen sensiblen Warmwasserspeicher. Zur Vorwärmung der Anlagenkomponenten wurde im Projekt ein weiterer sensibler Speicher (sog. LuVo-Speicher) entwickelt.
- **Latentwärmespeicher** nutzen den Phasenwechsel fest/flüssig eines schmelzenden (Wärmezufuhr = Beladen) bzw. erstarrenden Speichermediums (Wärmeabfuhr = Entladen). Dieses Speichermedium wird als PCM (Phase Change Material) bezeichnet. Da dieser Speichervorgang bei nahezu konstanter Temperatur abläuft bezeichnet man dies als latente (= versteckte) Wärme.
- **Sorpptive** und **thermochemische** Speicher sind technisch komplexe Zweistoff-Systeme und für den Einsatz in BHKW aktuell nicht von Bedeutung.

Wie in Abb. 2-3 zu sehen, gibt es eine Vielzahl von Speichermedien (PCM) für Latentwärmespeicher. Im aktuellen Projekt wurden eine Fettsäure und ein Salzhydrat jeweils mit einer Schmelz- und damit Speichertemperatur von 70 °C eingesetzt. Das größte Problem dieser Speichermedien ist deren geringe Wärmeleitfähigkeit, so dass die benötigten Zeiten für den Wärmetransport in den bzw. aus dem Speicher hoch sind und die Speicherleistung damit niedrig ist. Der wichtigste Aspekt bei der wärmetechnischen Auslegung von Latentwärmespeichern ist deshalb die Anpassung

der Speicherleistung an die des thermischen Energiesystems, in das der Speicher integriert wird, damit dessen Funktionalität sichergestellt ist.

Die Leistung eines Latentwärmespeichers kann durch konstruktive Parameter beeinflusst werden, eine umfängliche Zusammenfassung des diesbezüglichen Wissensstandes ist in [14] gegeben. Dabei ist besonders die Rohrbündel-Bauweise in Anlehnung an klassische Rohrbündel-Wärmeübertrager ein sowohl wärmetechnisch als auch fertigungstechnisch und damit wirtschaftlich interessanter Ansatz.

Abb. 2-4 zeigt im Vorgriff auf die später dargestellten Projektergebnisse einen (Bildmitte, ungedämmt) bzw. beide (rechts, gedämmt) im Rahmen des Projektes HORA entwickelten Latentwärmespeicher in Rohrbündel-Bauweise. Durch Variation der Rohrabstände und der strömungstechnischen Verschaltung der Rohre kann die Leistung des Speichers angepasst werden. Dabei gilt jedoch, dass eine Erhöhung der Speicherleistung immer zu Lasten des speicherbaren Wärmehaltes geht. In den letzten Jahren rückten und rücken hybride Wärmespeichersysteme immer mehr in den Vordergrund. Hybridspeicher kombinieren Anteile sensibler Wärmespeicher mit denen von Latentwärmespeichern. Typische Bauformen sind Behälter, die mit einer Schüttung z.B. in Kugelform verkapselter PCM gefüllt sind (latenter Anteil) und von Wasser als Wärmeträger und Speichermedium (sensibler Anteil) durchströmt werden. An der HSZG werden hybride Wärmespeicher für stationäre und mobile Anwendungen wärme- und strömungstechnisch charakterisiert.



Abb. 2-4 Latentwärmespeicher in Rohrbündel-Bauweise (aus [13]); V.l.n.r.: Rohrbündel und Halterung als CAD-Darstellung, Latentwärmespeicher mit Sensorik (ungedämmt bzw. gedämmt)

Da die Berechnung des Be- und Entladeverhaltens von Latentwärmespeichern mit vertretbarem Aufwand nur näherungsweise möglich ist müssen deren Betriebsparameter messtechnisch bestimmt werden. Dazu werden in [12] Hinweise gegeben. Mit Hilfe der Wärmespeicher-Testanlage als Teil des Zittauer Kraftwerkslabors (ZKWL) können derartige Untersuchungen durchgeführt werden. Abb. 2-5 zeigt einen typischen Messplot, der während eines Tests eines Latentwärmespeichers aufgenommen wurde, der im Rahmen eines anderen Projektes an der HSZG entwickelt und gebaut wurde. Für den in Abb. 2-5 gezeigten Beladevorgang des Latentwärmespeichers wurden die nahezu konstante Vorlauftemperatur und auch die Rücklauftemperatur des genutzten Wärmeträgers Wasser gemessen, so dass daraus sowohl der Wärmehalt als auch die Momentanleistung des Speichers als wichtige Kennzahlen berechnet werden können. Im Messplot erkennt man auch das Temperaturniveau bei der Temperatur des Speichermediums während des Phasenwechsels bei knapp über 60 °C.

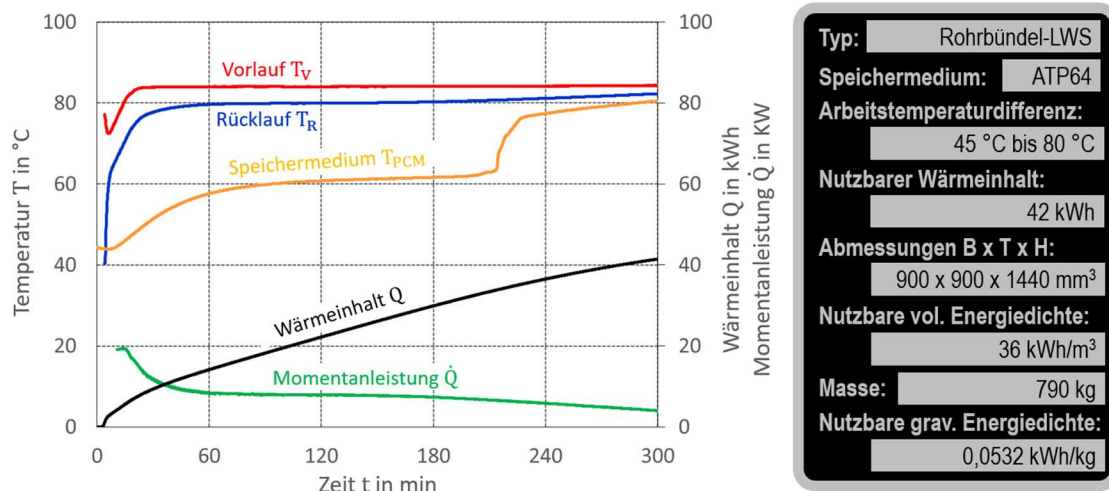


Abb. 2-5 Typischer Messplot zur Charakterisierung eines Latentwärmespeichers (aus [13]) zur Bestimmung der wärmetechnischen Kenngrößen (siehe fiktives Typenschild)

Seit Herbst 2021 ist der Fachbereich Technische Thermodynamik der HSZG in einem deutschlandweiten Konsortium, dass sich die „Erarbeitung von Vergleichskennzahlen für thermische Energiespeicher“ zum Ziel gesetzt hat (Förderung durch BMWK, FKZ 03TN0028C). Auch die im Projekt entwickelten Latentwärmespeicher sollen als Testspeicher in dieses Projekt einbezogen werden und wichtige Daten zu deren Betriebsverhalten liefern.

2.3 Darstellung und Wertung

2.3.1 Erzielte wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Eine ausführliche Erläuterung der im Projekt HORA erarbeiteten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse erfolgt in diesem Kapitel unter Beachtung der in Tab. 2-1 aufgeführten thematischen Gliederung.

Tab. 2-1 Gliederung der erzielten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse in HORA

Nr	Thema	Arbeitspunkt
1	Einsatz Laser-Doppler-Anemometer	AE1.1
2	Aufbau und Betrieb einer Kalibrierstrecke mit Integration des Laser-Doppler-Anemometer als Referenzmessung	AE1.1
3	Kalibrierung und Einsatz einer Karman-Vortex-Volumenstrommessung	AE1.1
4	Erfassung des vertikalen Temperaturprofils im Reaktor	AE1.1
5	Untersuchung der Feststoffumsetzung im Reaktor	AE1.1
6	Brennstoffvariationen	AE1.2
7	Variation Vergasungsmitteltemperatur	AE1.2
8	Technische Integration der Speicher in die Biomassevergasungsanlage	AE2.2
9	Abstimmung der Speicher auf den Anlagenbetrieb	AE2.3
10	Bewertung der Emissionen und Festlegung der Emissionsminderungstechnologie für den weiteren Versuchsbetrieb	AE3.2
11	Stoff- und Energiestrombilanzierung	AE1.1

1. Einsatz Laser-Doppler-Anemometer

Im Rahmen von HORA wurden neben der Kalibrierung des Karman-Vortex-Durchflussmessers (siehe Kapitel 3.3) mehrere Messfahrten an der Biomassevergasungsanlage durchgeführt, die mittels Laser-Doppler-Anemometer (LDA)-Messungen begleitet wurden. Diesbezüglich folgt nun eine detaillierte Darstellung der entsprechenden Vorgehensweise, Auswertung und der Ergebnisse.

Partikelmessung zur Seedingbewertung

Um eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Produktgasströmung zu erhalten, bestand die Absicht zur Nutzung der mit der Strömung transportierten Partikel (Kondensattröpfchen, Staub etc.) als Tracerpartikel. Hierfür spielt neben der Häufigkeit der Partikel auch der aerodynamische Durchmesser d_p eine wichtige Rolle. Sind die Partikel zu klein, werden die erzeugten Dopplersignale bei konstanter Laserleistung nicht mehr erfasst. Bei zu großen Durchmessern hingegen ist den Partikeln kein schlupffreies Folgen der Strömung mehr möglich. Eine ideale Partikelgröße wird in [15] mit $d_p \approx 1 \mu m$ empfohlen. Für eine genaue Kenntnis des Partikelspektrums auch im Anfahrzustand wurde in Ergänzung der Partikelmessung vom 24.11.2016 (siehe [6]) am 27.11.2019 eine weitere Partikelmessung vorgenommen (vgl. Abb. 2-6).



Abb. 2-6 Erfassung der Partikelgrößenverteilung mit dem Particle Sizer 3321 sowie dem Diluter 3302A von TSI

Einerseits erfolgte die Messung während des Anfahrvorgangs, welcher durch die Bildung von Kondensattröpfchen geprägt ist. Andererseits wurde während des stationären Anlagenzustands im Nennbetrieb gemessen. Die Ergebnisse finden sich in Abb. 2-7. Dort ist die Partikelhäufigkeit über dem aerodynamischen Durchmesser aufgetragen. Hieraus gehen nun zwei Sachverhalte hervor:

- **Partikeldichte:** Während des Anfahrvorgangs treten Häufigkeiten in der Größenordnung von $25 \cdot 10^3$ Partikel/cm³ auf. Dies wird während des stationären Betriebs bei Weitem nicht erreicht. Hier liegen lediglich etwa 25 Partikel/cm³ vor, was demnach nur einem Tausendstel der Partikeldichte während des Anfahrvorgangs entspricht.
- **Partikelgröße:** Im Anfahrprozess herrscht ein ausgebildetes Spektrum an Partikeln vor, welches auch die bereits angesprochene Größenklasse von $d_p \approx 1 \mu m$ beinhaltet. Selbige und angrenzende Größen sind während des Nennbetriebs nicht mehr vorzufinden. Es existieren dann nur noch Partikel mit $d_p \leq 0,542 \mu m$.

Die seltenen und zu kleinen Partikel deuten darauf hin, dass eine Messung im Nennbetrieb ohne separat hinzugefügtes Seedingmaterial nicht sinnvoll ist.

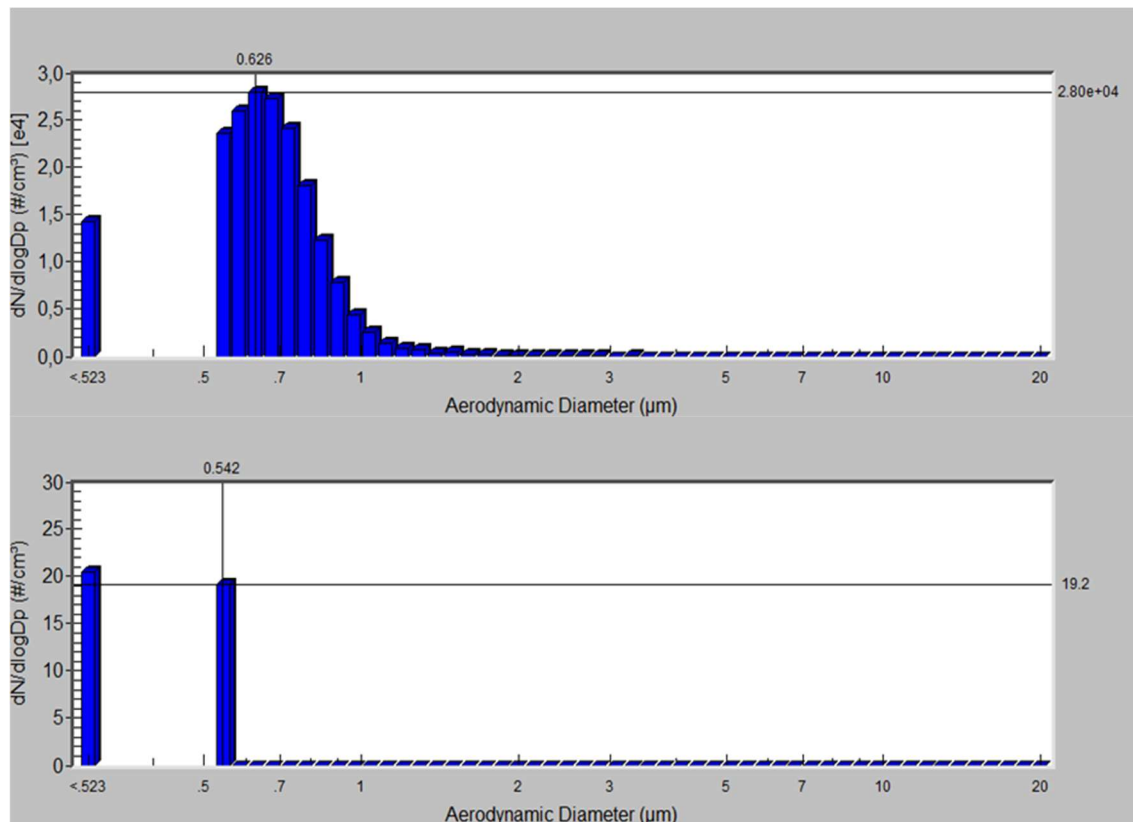


Abb. 2-7 Partikelverteilungsspektren des Produktgases während des Anfahrvorgangs (oben) und während des stationären Betriebs (unten)

Zur Erfassung des Zeitfensters, in welchem eine Ausnutzung prozessinterner Partikel als Tracer gelingen kann, erfolgte zu den in Tab. 2-2 dargestellten Terminen die Aufnahme von Zeitverläufen. Dazu wurde das LDA-Messvolumen in der Rohrmittle positioniert und die Geschwindigkeitssignale permanent erfasst.

Tab. 2-2 Vermessung des Zeitverlaufes während des Anfahrens der Biomassevergasungsanlage

ID	Messtag	Startzeit
1	12.11.2019	09:21
2	27.11.2019	09:31 bzw. 09:51
3	18.12.2019	09:15 bzw. 09:47

In Abb. 2-8 sind diese Zeitverläufe dargestellt. Hieraus lassen sich die wesentlichen Ablaufroutinen des Anfahrprozesses gut erkennen, auch wenn nicht alle Messverläufe störungsfrei verliefen.

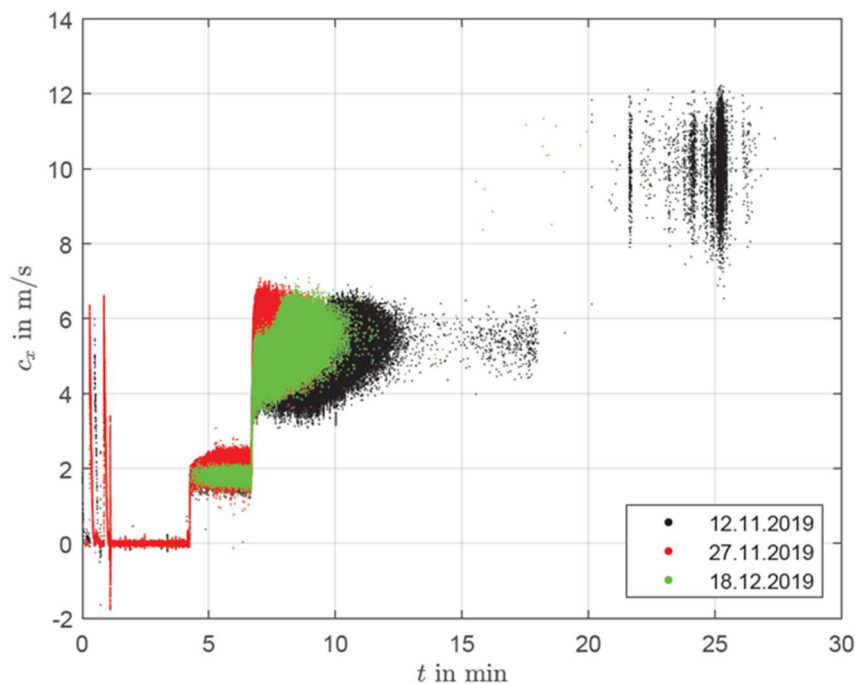


Abb. 2-8 Zeitverläufe des LDA-Signals während des Anfahrvorgangs bei Positionierung des Messvolumens in der Rohrmitte

Zunächst erfolgt der Test der Filterabreinigung durch zwei Druckstöße. Das Gebläse befindet sich noch im ausgeschalteten Zustand, während die Zündung im Reaktor über elektrische Heizstäbe startet. Nach einem definierten Zeitintervall wird das Gebläse auf 20 % seiner Leistung hochgefahren und die Heizstäbe deaktiviert. Das Niveau der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit liegt hier bei etwa $c_x = 2$ m/s. Nach einem weiteren Zeitintervall erhöht sich die Gebläseleistung auf 50 %, was einer Strömungsgeschwindigkeit in Rohrmitte von etwa $c_x = 5$ m/s entspricht. Erreicht der Mittelwert der Reaktorwandtemperaturen 300 °C , wird der Motor gestartet. Der Nennbetrieb erfolgt dann bei einer Gebläseleistung von 52,5 bis 57,5 %. Durch den zusätzlichen Saugbetrieb des Motors steigert sich die Strömungsgeschwindigkeit auf etwa $c_x = 10$ m/s. Die anfangs spärlich vorhandenen Kondensattröpfchen verdichten sich, was die Datenrate stark ansteigen lässt. Teilweise geschieht dies in der Form, dass der Prozessor die Signale nicht mehr sauber trennen kann und ein Datenoverload entsteht, was durchaus zum Abbruch der Datenerfassung führen kann. Andererseits benetzt das Kondensat im Laufe der Zeit die Rohrwand und sorgt für einen Flüssigkeitsfilm, welcher die Messungen durch Brechungseffekte stark behindern kann (vgl. Abb. 2-9). Durch das allmähliche Erwärmen der Rohrwand verschwindet schließlich der Flüssigkeitsfilm wieder. Von diesem Zeitpunkt an ist die Messung nur noch mit externem Seeding möglich. Diese Zeit ist z.B. stark von dem Wassergehalt der vergasten Biomasse abhängig, reicht aber erfahrungsgemäß nicht aus, um eine Ganzfeldmessung mit ausreichender Messpunktanzahl durchzuführen.

Da eine punktuelle Messung entweder nach Beendigung einer vorher festzulegenden Zeitspanne oder durch das Erreichen einer maximalen Sampleanzahl abgebrochen wird, können derartige Messreihen auch unvollständig sein. Der oben beschriebene Ablauf wird hier durch die Messung vom 12.11.2019 nahezu vollständig wiedergegeben.

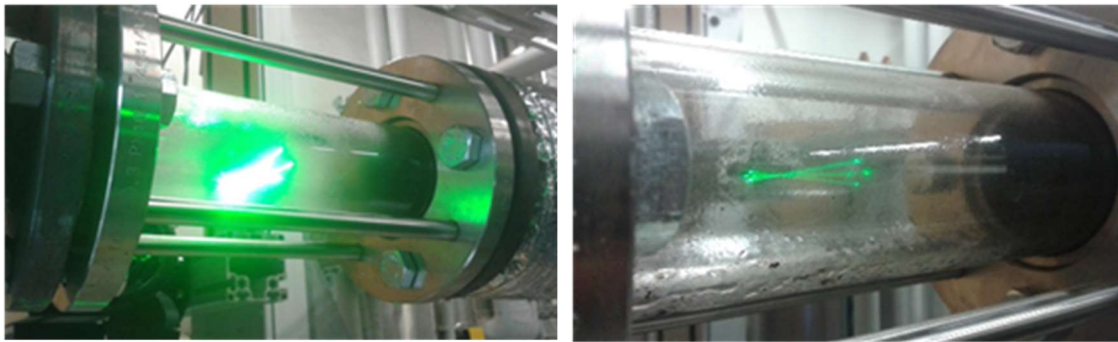


Abb. 2-9 Beginnende Kondensatbildung während des Anfahrvorgangs (links) und stark benetzte Innenwand des Schauglases (rechts)

Ganzfeldmessungen zur Ermittlung der Betriebsvolumenströme

Die Bereitstellung von Seedingmaterial (Öltröpfchennebel aus Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS)) erfolgte unter Verwendung von Stickstoff als Treibgas. Somit waren die durchgeführten Messfahrten nicht von prozesseigenen Partikeln abhängig.

Die Messdurchführung erfolgte nach Festlegung eines Messrasters mithilfe einer traversengeführten Lasersonde. Dies führte zur Aufnahme von Geschwindigkeitsverläufen innerhalb des Messquerschnitts. Anhand der Kenntnis der Gaszusammensetzung und der Betriebsparameter (Druck p , Temperatur ϑ), konnten daraus Fluidichte ρ und kinematische Viskosität ν ermittelt werden. Mithilfe der Software LDVSuite wurden diese Parameter schließlich zusammengeführt. Nach Wandschichtmodellierung sowie Filterung ergaben sich Geschwindigkeitsprofile (vgl. Abb. 2-10), deren Integration schließlich zu den Betriebsvolumenströmen führte.

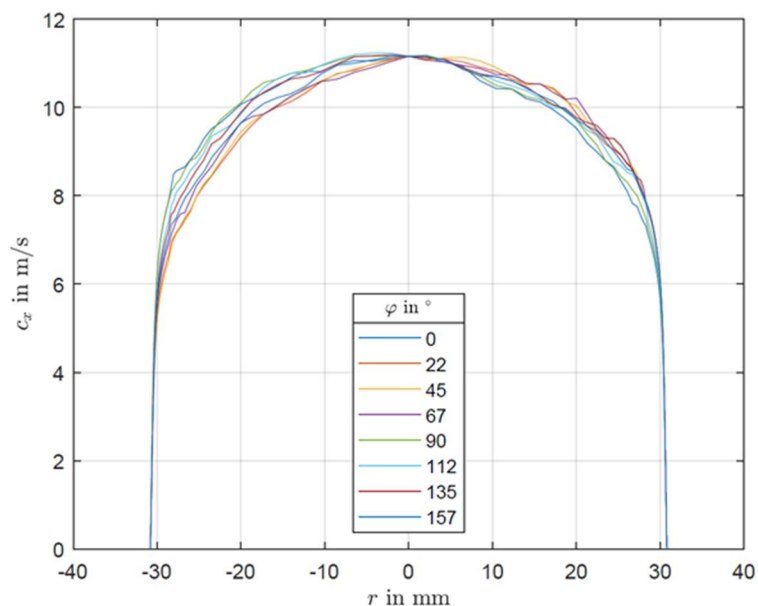


Abb. 2-10 Geschwindigkeitsprofile der Ganzfeldmessung vom 12.11.2019 im stationärem Betrieb

Die daraus ableitbaren 2D- und 3D-Plots (vgl. Abb. 2-11) liefern einen guten Einblick zur Geschwindigkeitsverteilung. Die Verteilung weist eine geringfügige Asymmetrie auf, was auf die stromauf der Messstrecke installierten Krümmer und die darauffolgende zu geringe Anlaufstrecke zurückgeführt werden kann. Allerdings ließen sich die Profile aufgrund fehlender Toträume, Rückströmungen etc. problemlos zur Durchfluss-

ermittlung verwenden. Einzig die Erfassung ohne externes Seeding lieferte stärkere Abweichungen. Die Gründe hierfür wurden bereits zuvor ausgeführt.

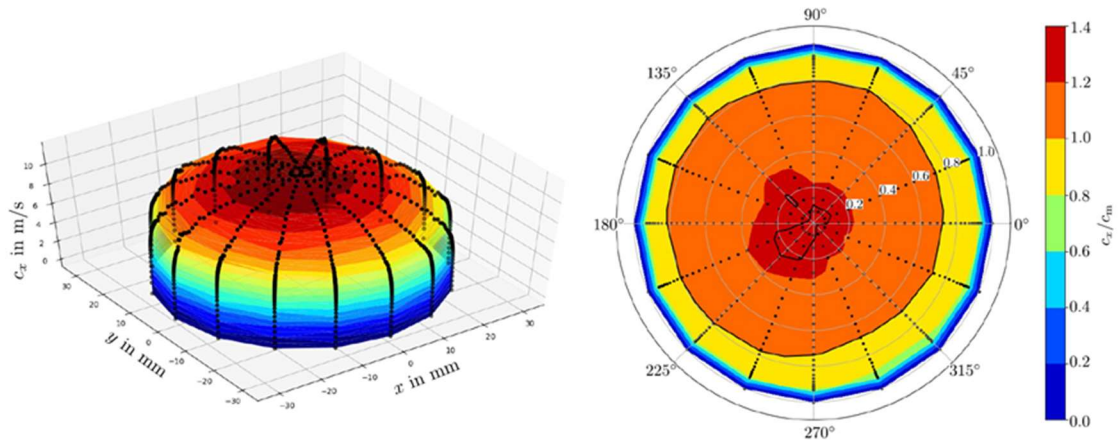


Abb. 2-11 3D-Plot und dimensionsloser 2D-Plot der Ganzfeldmessung vom 12.11.2019 (stationärer Betrieb)

Die Abfolge der Vorbereitung und Durchführung der Messungen wurde bereits in [6] ausführlich beschrieben.

In Tab. 2-3 sind die Ergebnisse der Messfahrten (mit und ohne externem Seeding) an der Vergaseranlage dargestellt. Die beim Einsatz am Vergaser bestimmten Normvolumenströme lagen im Bereich von ca. 65 bis 75 m³/h (i.N.). Die relativen Abweichungen zur Referenzmessung mittels Prandtl-Rohr bewegen sich in derselben Größenordnung $f_{\text{rel,Ref}} = (\pm 3 \dots 4) \%$, wie bereits im Zwischenbericht erwähnt. Eine Verwendung des bisher verwendeten Korrekturfaktors $K = 0,85$ für die Referenzmessung wird aufgrund dieser geringen Abweichung weiterhin empfohlen.

Tab. 2-3 Ganzfeldmessungen im Nennbetrieb der Biomassevergasungsanlage

ID	Messtag	Messreihe (MR), ohne externes Seeding (oS)	Messzeit	Normvolumenstrom in m ³ /h (i.N.)	Referenz- volumenstrom in m ³ /h (i.N.)	$f_{\text{rel,Ref}}$ in %
1	12.11.2019	MR 1	14:34-15:05	71,9	70,6	-1,8
		MR 2	15:05-15:37	71,9	71,1	-1,1
2	27.11.2019	MR oS	10:10-11:03	73,9	76,8	3,8
		MR 1	14:10-14:31	74,5	72,1	-3,4
		MR 2	14:36-15:10	74,6	72,4	-2,9
		MR 3	15:14-15:40	73,8	72,0	-2,5
		MR 4	15:41-16:06	73,7	71,6	-2,9
		MR 5	16:08-16:31	73,7	71,3	-3,5
3	18.12.2019	MR oS	10:29-11:41	70,2	79,5	11,8
4	01.07.2020	MR oS	09:50-10:22	Messabbruch	-	-
		MR 1	14:17-15:00	64,7	69,3	6,7
		MR 2	15:17-15:39	69,7	72,3	3,6
		MR 3	15:41-16:04	69,6	71,8	3,0
		MR 4	16:10-16:39	69,7	71,9	3,1

Der Vergleich der Messreihen untereinander erfolgte bezogen auf die jeweils erste Seeding-Messung des betreffenden Messtages. Die relative Abweichung lag hier jedoch bei $|f_{\text{rel}}| < 1 \%$, was für die hohe Reproduzierbarkeit der Messungen spricht.

2. Aufbau und Betrieb einer Kalibrierstrecke mit Integration des Laser-Doppler-Anemometers als Referenzmessung

Im Folgenden werden die wesentlichen Arbeitsschritte zu Aufbau, Durchführung und Auswertung der Kalibrierung mehrerer Karman-Vortex-Durchflussmesser (KV) mithilfe des in einer Kalibrierstrecke integrierten 2-Komponenten-Laser-Doppler-Anemometers (LDA) dargestellt.

Aufbau der Kalibrierstrecke

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde festgelegt, den an der HSZG zu installierenden Kalibrier-Versuchsstand möglichst vergleichbar zu jenen Einbaubedingungen des KV in der Praxis zu gestalten. So wird Luft aus der Umgebung direkt durch den KV angesaugt. Der Ansaugbereich ist durch einen nach unten offenen Ansaugkasten gestaltet, in dessen Zentrum sich der KV befindet. An der gegenüberliegenden Wand des Ansaugkastens ist der Seeding-Flansch befestigt, über welchen eine symmetrisch verteilte Zugabe von Tracerpartikeln erfolgt. Der KV ist über eine Kupplung mit einer 2 m langen Rohrleitung (Edelstahl, DN 65) verbunden, welche über eine Bohrung durch den Kasten nach außen führt. An deren Ende ist die Messstrecke angeflanscht. Diese enthält sowohl ein Venturirohr mit $D1 = 72,1$ mm und $D2 = 50$ mm zur Plausibilitätsprüfung und Überwachung der Stationarität der Strömung während der Untersuchungen als auch den optischen Zugang für die späteren LDA-Messungen. Darauf ausgerichtet ist die an einer 3-Achs-Traversiereinrichtung befestigte LDA-Sonde. Stromabwärts ist eine 1 m lange Rohrleitung angeschlossen, welche über einen Kompensator mit dem Gebläse verbunden ist. An der Druckseite des Gebläses führt nach einem Reduzierstück und einem zweiten Kompensator ein Schlauch die Abluft über das Fenster aus der Laborhalle. Der allgemeine Aufbau der Kalibrierstrecke ist der Konstruktionszeichnung nach Abb. 2-12 zu entnehmen. Die LDA-Messstrecke wiederum ist in Abb. 2-13 detaillierter abgebildet.

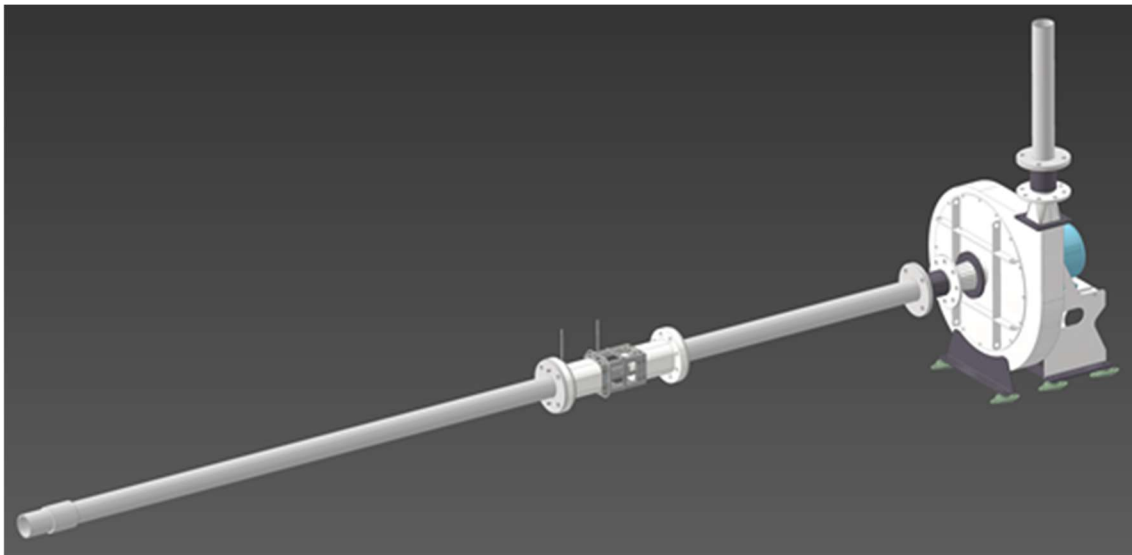


Abb. 2-12 Allgemeiner Aufbau der Kalibrierstrecke (links: Eintritt über Ansaugkasten und anschließend Einlaufstrecke, Mitte: LDA-Messstrecke, rechts: Gebläse)

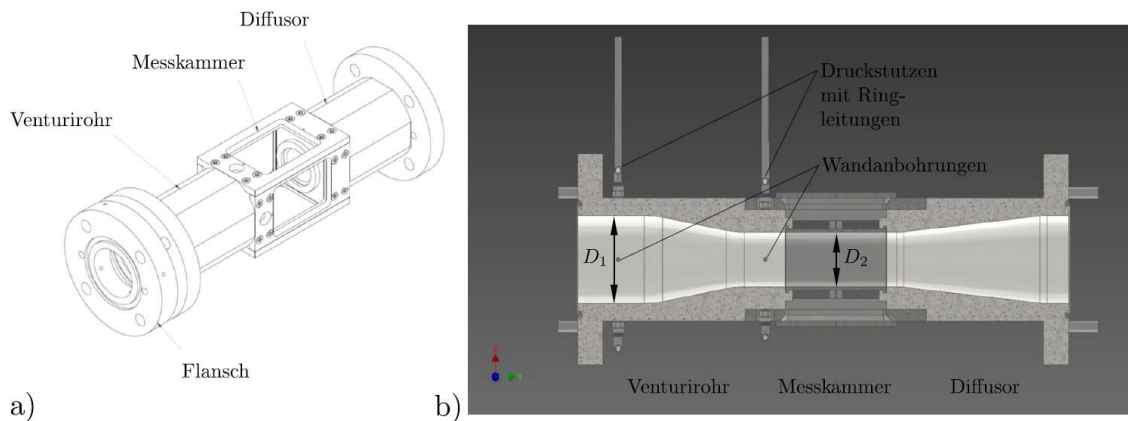
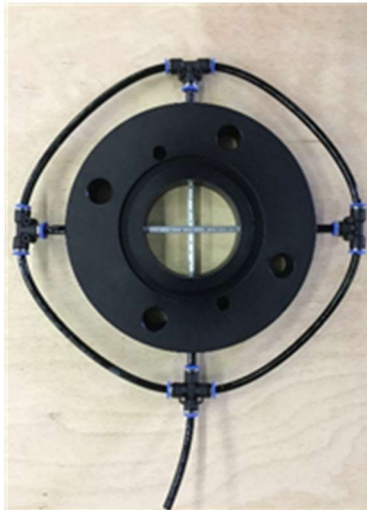


Abb. 2-13 Aufbau der LDA-Messstrecke mit Venturirohr und Messkammer

Die einzelnen Bestandteile des Kalibrierkanals werden mit Beschreibung ihrer Funktion in Tab. 2-4 aufgezählt und die wesentlichen Details zum Gesamtaufbau sind in Abb. 2-14 dargestellt.

Tab. 2-4 Komponenten der Kalibrierstrecke

ID	Komponente	Typ, Hersteller	Bemerkungen
1	Ansaugkasten	Eigenbau, HSZG	Nachbildung der Versuchsbedingungen aus der Praxis
2	Seedinggenerator	10F03, Dantec Dynamics, Optolution Seeding Generator	Erzeugung von Tracerpartikeln
3	Seedingflansch	Eigenkonstruktion, Optolution	Zuführung und Vermischung von Tracerpartikeln im Strömungsprozess
4	Karman-Vortex-Durchflussmesser	E5T08171, Mitsubishi	Untersuchungsgegenstand
5	Digitalmultimeter	3415 USB DMM, PeakTech	Erfassung der Frequenz des KV
6	Messstrecke	Eigenbau, Optolution	Optischer Zugang inkl. Venturirohr, Material: PA6GMo, Borosilikatglas
7	2-Komponenten-LDA	FlowExplorer, Dantec Dynamics	Erfassung der durch die Tracerpartikel erzeugten Doppler-Signale
8	DAQ-System	Almemo 2490, Ahlborn	Erfassung von Absolut-/Differenzdruck und Temperatur
9	Traversiereinrichtung	3D-Transpose 610, isel Germany	Positionierung der LDA-Sonde
10	Gebälse	VRZ500/20/2, Zenner Ventilatoren	Steuerung des Volumenstromes über integrierten Frequenzumrichter
11	Software	BSAFlow, Dantec Dynamics	Steuerung der LDA-Messungen, Datenspeicherung- und visualisierung
12	Software	LDVSuite, Optolution	Strahlverfolgung, Rohrmittenbestimmung, Gittergenerierung, Auswertung
13	Software	MATLAB, MathWorks®	Auswertung und Visualisierung
14	Software	FluidLab, KCE	Stoffwerteermittlung
15	Notebook	Vostro 15, Dell	Datenverwaltung der Messung



a)



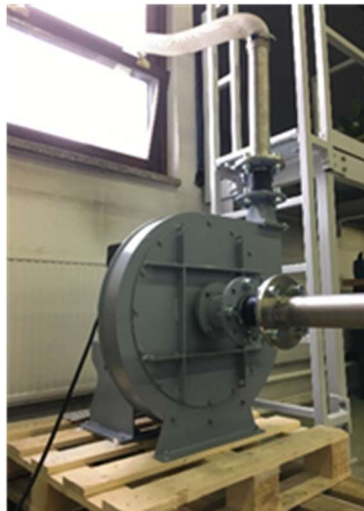
b)



c)



d)



e)



f)



g)

Abb. 2-14 Aufbau der Kalibrierstrecke: a) Seedingflansch, b) Ansaugkasten mit KV, c) Messstrecke und LDA an Traverse, d) Laserschutzvorhang (LSV) um Messstrecke, e) Gebläse, f) Versuchsstand komplett (ohne LSV), g) Seeding-Generator

Durchführung der Messungen

- Aufnahme der Versuchsbedingungen

Das für den Versuch relevante Medium ist Umgebungsluft, welche über den KV durch eine Rohrleitung zur LDA-Messstrecke hin angesaugt wird. Für die Auswertung der späteren Messungen wird deren Dichte ρ und kinematische Viskosität ν benötigt. Die Bestimmung erfolgt über die im Fachgebiet Technische Thermodynamik der HSZG entwickelte und über das Unternehmen KCE offiziell vertriebene Stoffwertdatenbank FluidLab®. Hierfür wird die Temperatur der strömenden Luft $[\vartheta] = ^\circ\text{C}$, die relative Luftfeuchtigkeit $[\phi] = \%$ sowie der Absolutdruck $[p] = \text{bar}$ benötigt. Die Messung des Absolutdruckes erfolgt über einen piezoresistiven Drucksensor, welcher das Drucksignal von vier in die Rohrwand integrierten Wandanbohrungen erhält, deren Signale über eine Ringleitung gemittelt werden. Die Lufttemperatur kann über ein Thermoelement und die relative Luftfeuchtigkeit über ein Haarnadel-Hygrometer ermittelt werden.

- Vorversuche

Zur Abschätzung der auftretenden Parameterbereiche wurden zunächst verschiedene Voruntersuchungen getätigt. Hierzu erfolgte die Variation der relativen Drehfrequenz des Gebläses und die Aufnahme von Zeitverläufen der verbauten Sensorik, um den auftretenden Parameterbereich richtig einordnen zu können. So existiert erwartungsgemäß

- ein linearer Zusammenhang zwischen der angesteuerten relativen Drehfrequenz $f/f_{\max}$ und der erreichten Drehzahl n ,
- ein quadratischer Zusammenhang mit positivem Anstieg in Bezug auf den statischen Druckunterschied Δp (Sensoren FDA602S6K bzw. FDA602S2K, Ahlborn) von Rohrquerschnitt zu engstem Querschnitt sowie
- ein quadratischer Zusammenhang mit negativem Anstieg bezüglich des statischen Absolutdruckes (Sensor FDA602L3A, Ahlborn) im Rohrquerschnitt direkt vor der Engstelle.

Die Zusammenhänge sind in Abb. 2-15 erkennbar. Diese Änderungen sind bei der Berechnung der Stoffwerte des Fluids (Dichte ρ , kinematische Viskosität ν) zu berücksichtigen. Da sich die Messsektion auf der Saugseite des Gebläses befindet, entspricht die Temperatur ϑ im Rohrquerschnitt nahezu der Umgebungstemperatur ϑ_U .

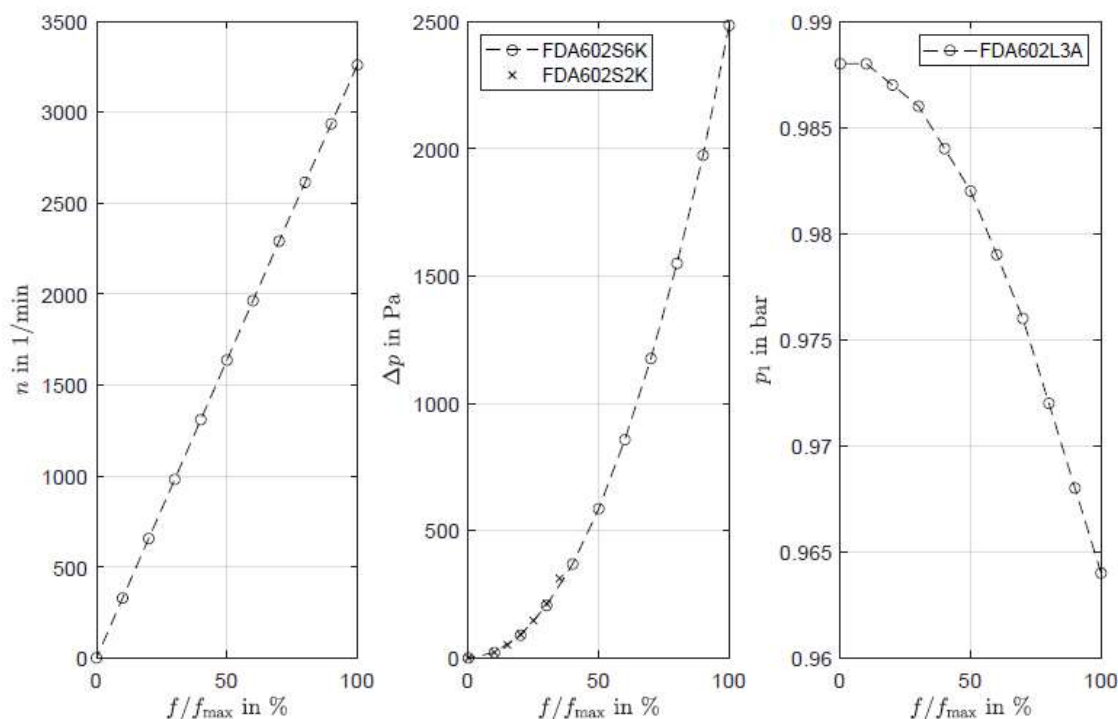


Abb. 2-15 Beeinflussung der Parameter Drehzahl (links), Differenzdruck (mittig) und Absolutdruck im Rohrquerschnitt p_1 (rechts) durch Variation der relativen Drehfrequenz

- LDA-Messungen am optischen Zugang

Durch die Variation der Drehzahl n kann eine Kennlinie abgefahren werden, in welcher der Zusammenhang zwischen variiertem Volumenstrom und der vom KV ausgegebenen Signalfrequenz f_{KV} ersichtlich wird. Die relative Gebläsedrehfrequenz liegt in einem Bereich von $f/f_{\max} = (0 \dots 100) \%$. Aufgrund einer höheren Messungenauigkeit der Drucksensoren bei geringeren Durchflüssen wurden die Betriebspunkte im niedrigen Drehzahlbereich dichter gesetzt. Somit fiel die Wahl auf $f/f_{\max} = (10; 15; 25; 50; 75; 100) \%$. Für die korrekte Messdurchführung ist ein umfangreicher Arbeitsablauf einzuhalten, welcher im Folgenden kurz dargestellt werden soll. Eine besondere Herausforderung bei gekrümmten Oberflächen ist die Tatsache, dass sich die Position des LDA-Messvolumens innerhalb eines Glasrohres durch Brechungseffekte verschiebt. Dieser Versatz vollzieht sich im Gegensatz zu einer ebenen Scheibe nicht ein- sondern aufgrund der Krümmung sogar zweidimensional, kann jedoch innerhalb der verwendeten Software LDVSuite berücksichtigt werden, da er analytisch berechenbar ist. Ausführliche Hinweise zur Strahlverfolgung finden sich z.B. in [16]. Somit kann durch Eingabe von Stoffwerten sowie Parametern des optischen Zugangs und des LDA-Systems ein Gitter erstellt werden. Um die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Messquerschnittes mit dem Durchmesser D2 bei hinreichend hoher örtlicher Auflösung zu erfassen, ist auf eine ausreichende Anzahl an Messpunkten zu achten. Hierfür wurden $M = 8$ Messpfade gewählt, die ein sternförmiges Muster bilden und den Koordinatenursprung als gemeinsamen Punkt aufweisen. Bei $N = 25$ Punkten pro Radius ergeben sich somit 393 Messpunkte. Zur besseren Auflösung einer eventuell vorhandenen, ausgeprägten Grenzschicht liegen die äußeren Messpunkte dichter beieinander. Davon ist im vorliegenden Fall allerdings nicht auszugehen, da durch den Einbau des Venturirohres ein Konditionierungseffekt, d.h. eine Vergleichmäßigung des Strömungsprofils, bewirkt wird (vgl. [17]). Um direkt auf die LDA-Sonde rückwirkende Reflexionen zu minimieren, wird das Gitter um den Winkel $\Delta\phi_0 = 3^\circ$ gekippt, sodass alle Messpunkte mit Ausnahme des Nullpunktes außerhalb der ursprünglichen Stralebene

liegen. Bevor die eigentliche Vermessung des Strömungsquerschnittes bei einer bestimmten Gebläsedrehfrequenz durchgeführt werden kann, ist die Lage der Rohrmitte zu bestimmen. Hierfür wird ein zweites Gitter erstellt, welches nur einige Messpunkte entlang der x- und y-Achse enthält. Diese sind entlang kurzer Pfade so positioniert, dass die Rohrwand an Vorder- und Rück- sowie Ober- und Unterseite geschnitten wird. Als Ausgangspunkt wird das Messvolumen senkrecht auf die äußere Rohrwand positioniert, das Gebläse angestellt und Seedingmaterial zugesetzt. Anhand der daraufhin in Wandnähe bestimmbaren Gradienten lässt sich eine gute Aussage zur tatsächlichen Lage der Rohrmitte treffen, welche vorher nur angenähert werden kann. Auf die so ermittelten Koordinaten wird die Traverse verfahren. Alle zukünftigen Messorte befinden sich relativ zu diesem Punkt.

Nun kann das tatsächliche Messgitter geladen und nach Festlegung aller Parameter die Messfahrt (Abb. 2-16) gestartet werden. Zwar verläuft der Prozess vollautomatisiert, allerdings muss Laserleistung und Versorgungsspannung der Photomultiplier für hohe Datenraten und die Vermeidung einer reflexionsbedingten Übersättigung während der Messung permanent angepasst werden. Eine Messfahrt nimmt in Abhängigkeit der Datenraten (höhere Datenraten bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten) einen Zeitraum von bis zu 1,5 Stunden in Anspruch. Gegebenenfalls müssen einige Punkte manuell erneut gemessen werden, um die statistische Sicherheit am entsprechenden Messpunkt noch zu erhöhen. Im Anschluss werden die Messergebnisse in ein *.txt-File exportiert und gemeinsam mit dem zugehörigen Gitter erneut in LDV Suite geladen. Hierin kann nun die Auswertung der Profile hin zu einem Gesamtvolumenstrom geschehen. Jene weiteren Schritte wurden bereits in [6] geschildert.

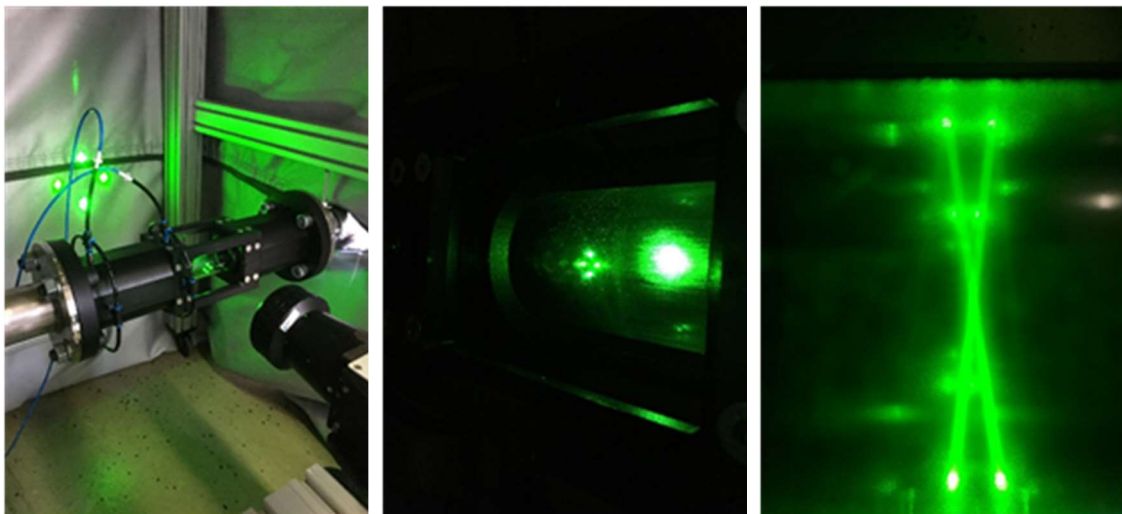


Abb. 2-16 Vermessung der Geschwindigkeitsprofile am optischen Zugang (links), Strahleintritt und Schlierenbildung an Rohrwand durch Seeding (mittig) und Messvolumen innerhalb der Messstrecke (rechts)

3. Kalibrierung und Einsatz einer Karman-Vortex-Volumenstrommessung

Die in [1] beschriebenen Arbeiten zur Kalibrierung eines Karman-Vortex-Systems zur Volumenstrommessung in der Luftansaugstrecke des Motors wurden weitergeführt und diesbezüglich die im Kapitel zuvor beschriebene Kalibrierstrecke eingesetzt.

Kalibrierung der Karman-Vortex-Durchflussmesser

Nachdem die Kalibrierung des Karman-Vortex-Durchflussmessers bereits mittels Netzmessung erfolgte, wurde die oben beschriebene Kalibrierstrecke mittels LDA eingesetzt, um die in [1] dargestellten Ergebnisse zu validieren. Abb. 2-17 zeigt einen Vergleich der mittels LDA sowie Netzmessung ermittelten Kennlinien als Volumenstrom in Abhängigkeit der jeweiligen Frequenz des KV.

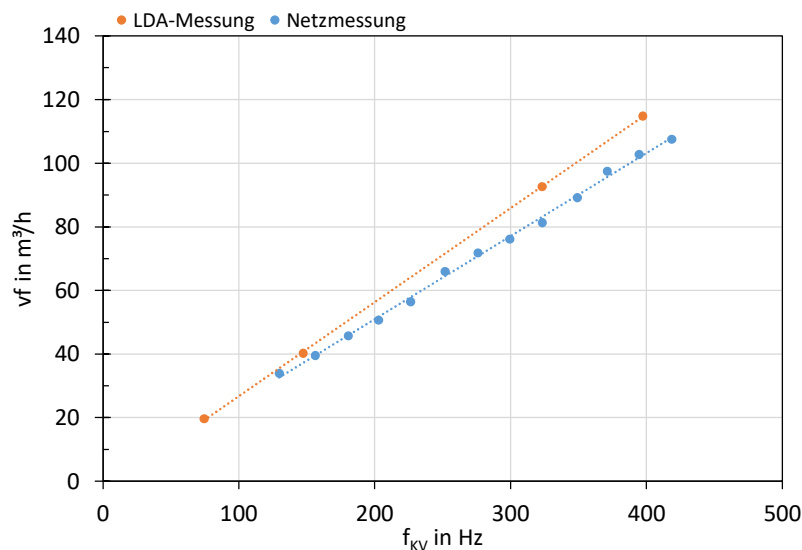


Abb. 2-17 Vergleich der mittels LDA und Netzmessung ermittelten Kennlinien des Karman-Vortex-Systems

Als finaler Schritt wird für die Messung mit LDA schließlich der Massestrom berechnet, welcher als wesentliche Größe bei der Bilanzierung von Energiesystemen Eingang findet. Zur Bestimmung der Stoffwerte wurden dazu Mittelwerte der Zeitverläufe von $p(t)$, $\Delta p(t)$ und $\vartheta(t)$ berechnet. Durch die Mittelungszeit über die komplette Messung hinweg ist somit eine gute statistische Sicherheit für jene Werte vorhanden, sodass das Histogramm der Druckdifferenz (vgl. Abb. 2-18) auf eine Normalverteilung hindeutet. Auch der Zeitverlauf des KV wird unter dem Aspekt einer aussagekräftigen Mittelwertbildung als $f_{KV}(t)$ permanent erfasst. Ein Einfluss durch das partielle Hinzuschalten der Druckluftversorgung für den Seedinggenerator kann nicht festgestellt werden. Die Verläufe lassen auf einen stationären Zustand schließen. Signifikante Schwankungen des Volumenstromes während der Messdauer sind somit ausgeschlossen. Die in Abb. 2-19 ersichtliche Darstellung zeigt einerseits den linearen Zusammenhang zwischen dem per LDA ermittelten Massestrom und der relativen Gebläsedrehfrequenz. Darüber hinaus ist erkennbar, dass die mithilfe der Referenzmessung (Venturirohr) erfassten Masseströme mit steigender Drehzahl auseinanderführen.

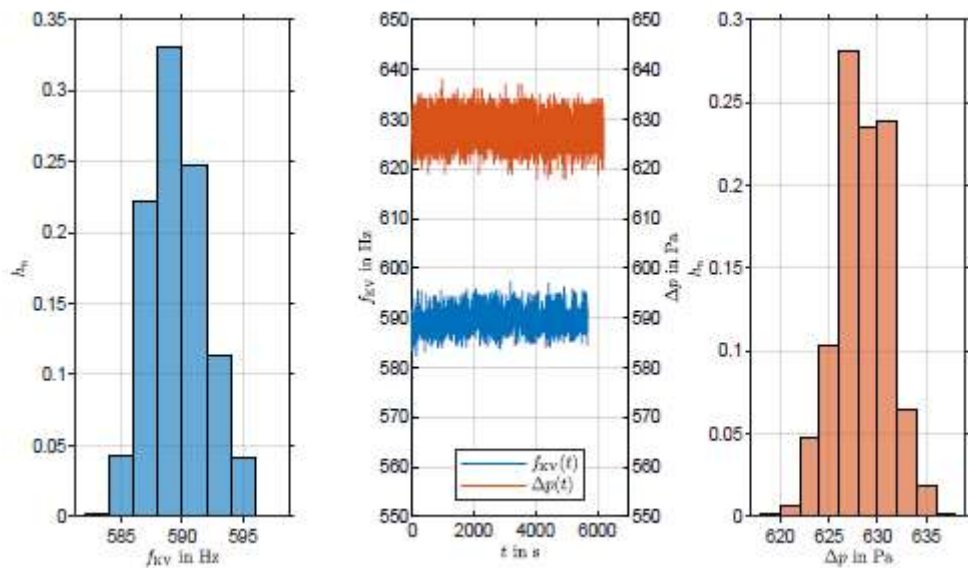


Abb. 2-18 Beispielhafte Darstellung der Verteilung relativer Häufigkeiten h_n bei der Erfassung von f_{KV} (links) und Δp (rechts) sowie der Zeitverläufe beider Signale (mittig)

So liegt der berechnete Massestrom nach DIN EN ISO 5167-3 stets geringfügig unterhalb und der nach Bernoulli- und Kontinuitätsgleichung bestimmte Massestrom oberhalb des LDA-Massestromes (vgl. Abb. 2-19). Für letzteren lässt sich dies mit dem Außerachtlassen von Reibungseffekten, also dem angenommenen Modell einer idealen Strömung, erklären, die stets zu höheren Durchflüssen führt. Der nach Norm bestimmte Wert enthält zwar durch den Durchflusskoeffizienten und die Expansionszahl reale Einflüsse, liegt aufgrund von Fertigungstoleranzen, Dralleffekten oder einer noch nicht vollständig entwickelten Strömung um $\Delta f_{rel} \approx 5\%$ unterhalb der per LDA ermittelten Masseströme. Beide Betrachtungen umschließen die Ergebnisse der Laser-Doppler-Anemometrie und weisen somit auf plausible Messungen hin.

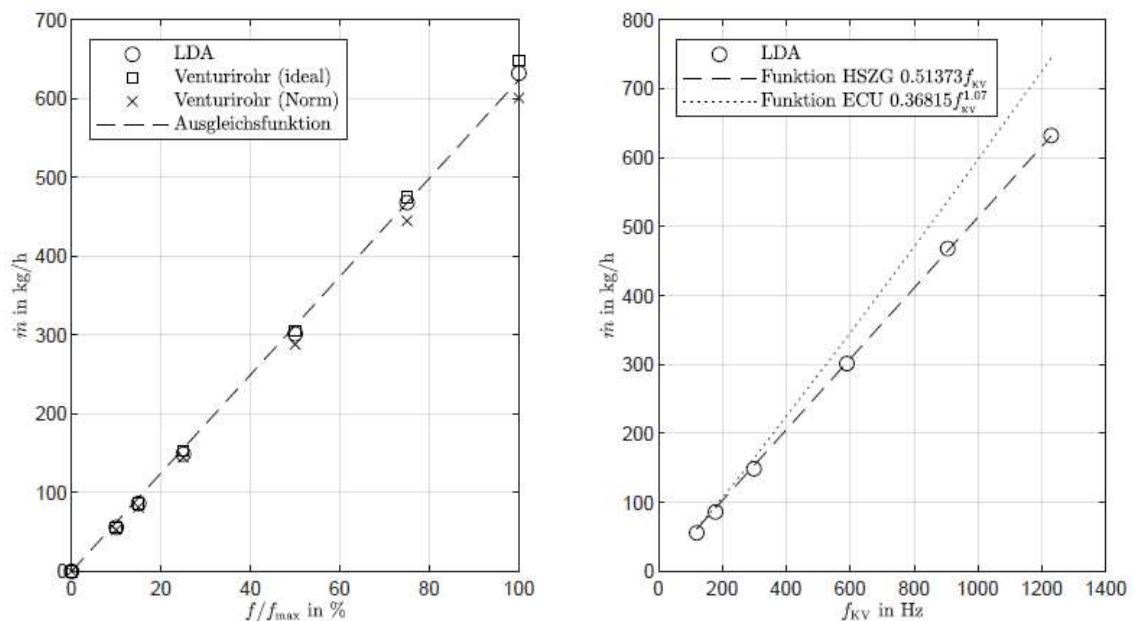


Abb. 2-19 Darstellung der ermittelten Volumenströme in Abhängigkeit der relativen Gebläsedrehfrequenz (links) und finaler Kalibrierzusammenhang des KV im Vergleich mit der bisher verwendeten Funktion ECU (rechts)

Abb. 2-19 erlaubt weiterhin den Vergleich zwischen der im Rahmen der Untersuchung gefundenen Polynomfunktion 1. Ordnung (Funktion HSZG) und der bisher in der Praxis verwendeten Potenzfunktion (Funktion ECU). Während bei sehr geringen Masseströmen der Unterschied noch vernachlässigbar ist, nimmt die Abweichung aufgrund der Krümmung letztgenannter Funktion mit steigender Frequenz immer weiter zu und beträgt unter Gebläse-Nennlast ca. 17 %. In Tab. 2-5 sind schließlich die ermittelten Kalibrierkoeffizienten inkl. Regressionskoeffizienten für zwei Fälle dargestellt. Einerseits für die Verwendung einer durch den Nullpunkt verlaufenden Kalibrierfunktion und andererseits für das Zulassen eines Absolutgliedes. Der letztere Fall liefert eine geringfügige Erhöhung des Regressionskoeffizienten, welche jedoch durchaus vernachlässigt werden kann.

Tab. 2-5 Ermittelte Kalibrier- und Regressionskoeffizienten am E5T08171 9219A

Koeffizient	Ohne Absolutglied	Mit Absolutglied
A in kg/(h Hz)	0,5137	0,52132
B in kg/h	0	-6,4259
R ²	0,9997	0,9999

Für die mit dem LDA bestimmte Kennlinie wurde weiterhin erneut die Massenbilanzierung um den Motorprozess des BHKW für die Messfahrt vom 24.11.2020 vorgenommen und mit den in [1] ermittelten Ergebnissen verglichen (vgl. Tab. 2-6).

Tab. 2-6 Vergleich der Massenbilanzierung für die Messfahrt vom 24.11.2020 unter Verwendung verschiedener Durchflussmesser und Kennlinien

Variante	Produktgas	Motorluft	AGR	Motorabgas	Bilanzfehler	Bilanzfehler
<i>Einheit</i>	<i>kg/h</i>	<i>kg/h</i>	<i>kg/h</i>	<i>kg/h</i>	<i>kg/h</i>	<i>%</i>
Lindab- Blende (Hersteller)	67,7	93,2	16,2	129,3	46,4	29,1
Lindab- Blende (Netzmessung)	67,7	85,5	12,0	129,3	35,1	23,0
KV (Netzmessung)	67,7	76,5	12,0	129,3	26,0	18,1
KV (LDA)	67,7	84,9	12,0	129,3	34,4	22,7

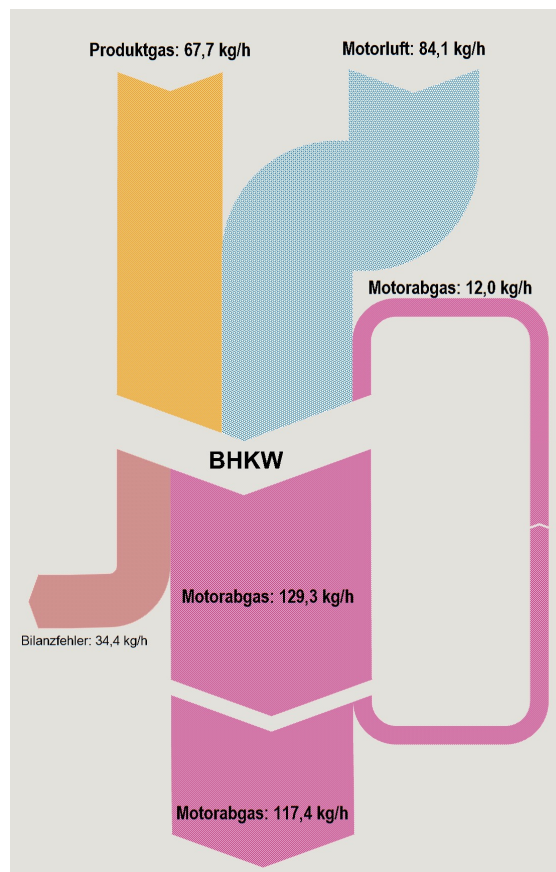


Abb. 2-20 Sankey-Diagramm der Massebilanz für die Messfahrt vom 24.11.2020 bei Verwendung des Karman-Vortex-Systems und der mittels LDA ermittelten Kennlinie

Ergänzend wurde noch ein Vergleich mit zwei weiteren KV angestellt. Zur Reduzierung des Aufwandes erfolgten hierfür lediglich Messungen mittels Venturirohr, welche Abb. 2-21 darstellt.

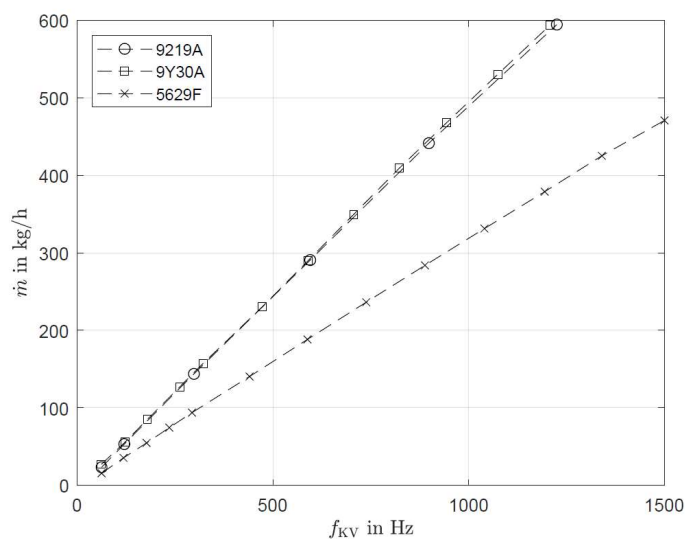


Abb. 2-21 Untersuchte KV-Durchflussmesser (links) und Vergleich der per Wirkdruckverfahren ermittelten Kennlinien aller drei Untersuchungsobjekte (rechts).

Daraus geht hervor, dass die beiden mit derselben Seriennummer E5T08171 betitelten KV 9219A und 9Y30A in guter Näherung dieselbe Kennlinie aufweisen, während E5T05371 5629F sich hingegen deutlich von jenen beiden unterscheidet. Dies ist bei den zukünftigen Kalibrieraufgaben unbedingt zu berücksichtigen.

Zusammenfassung

Innerhalb des Projektes erfolgte die Kalibrierung eines Karman-Vortex-Durchflussmessers mithilfe der Laser-Doppler-Anemometrie. Hierzu wurde eine Kalibrierstrecke konzeptioniert und aufgebaut, mit welcher es möglich ist, unter Variation von Volumenströmen den Durchfluss laseroptisch zu bestimmen. Die aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile wurden einer definierten Auswerteprozedur unterzogen, um in Masseströme überführt zu werden. Ein ebenfalls installiertes Wirkdruckverfahren bestätigte die Plausibilität der Ergebnisse. Die bisher verwendete Funktion weicht bei mittleren und hohen Masseströmen deutlich von der im Rahmen der Untersuchung erhaltenen Funktion ab. Diese Abweichung beträgt bei dem maximal erreichbaren Massestrom etwa 17 %. Die innerhalb der Kalibrierungsprozedur verwendete Funktion ist zu korrigieren, wenn gesichert ist, dass eine korrekte Anschlussbelegung vorherrschte. Der blaue, als „Bereichsumschalter“ bezeichnete, Anschluss wurde hinsichtlich seines Einflusses untersucht und auf Masse gelegt. Die Ausgabewerte des KV unterschieden sich bei Hinzuschalten desselben nicht von jenen bei ursprünglicher Belegung. Ab einem Massestrom von $m^* = 160 \text{ kg/h}$ wird die Messung allerdings begrenzt. Eine Erhöhung der Genauigkeit bei geringen Durchflüssen war als Zweck dieses Anschlusses bisher nicht nachzuweisen. Hier kann nur das Nachvollziehen zugehöriger Schaltpläne Gewissheit bringen. Für eine Abschätzung der Beeinflussung durch den Ansaugkasten sowie weitere Detailfragen der Strömung innerhalb des KV können numerische Strömungsuntersuchungen eine nützliche Ergänzung darstellen. Allerdings sind die hohen Anforderungen an das Rechengitter und die sorgfältige Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells etc. im Bereich der Gleichrichterwaben sowie des umströmten Störkörpers nicht zu unterschätzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Aufbau und die Qualifizierung des Kalibrierversuchsstandes erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Es erfolgte die Gestaltung eines funktionalen Mess- und Auswerteablaufes sowie die ausführliche Dokumentation innerhalb von Protokollen.

4. Erfassung des vertikalen Temperaturprofils im Reaktor

Um schon vorhandene Messreihen [5] zu verifizieren, wurde bei weiteren Messfahrten das Temperaturprofil im Reaktor, analog zur Darstellung wie in [18], aufgenommen und verglichen. Die Kenntnis des Temperaturprofils ist sowohl für evtl. konstruktive Veränderungen der Luftdüsen als auch für die Einordnung und Bewertung der Vergasungsreaktionen und der entsprechenden Stoffumsätze wichtig.

Für die Messung der Temperatur im Reaktor wurde ein 1000 mm Thermoelement Typ N (Mantelthermoelement, Durchmesser 4,5 mm) verwendet und manuell von oben in den Reaktor eingeführt. Das Thermoelement wurde dabei vertikal in Schritten von je einer Minute jeweils einen Zentimeter nach unten bewegt. Die Messungen erfolgten stets im stationären Anlagenzustand bei Einsatz des Standardbrennstoffes HHS, bei Verwendung gleicher Luftdüsen und bei identischen Einstellungen für die Füllstandsüberwachung im Reaktor.

Ein Vergleich der Temperaturprofile der 8 Messreihen im Reaktor ist in Abb. 2-22 dargestellt. Dabei sind für jede Position im Reaktor (angegeben als Höhe über Rost) die

Temperaturmittelwerte dargestellt und zusätzlich die absoluten Temperaturpeaks zu der jeweiligen Höhe markiert. Erkennbar ist die gute Vergleichbarkeit sowohl der Temperaturprofile als auch der absoluten Temperaturen. Lediglich im Bereich zwischen 23 und 28 cm Festbetthöhe ist eine höhere Varianz der Temperaturen festzustellen, die vermutlich aus Unterschieden bei der Ausbildung der Brennstoffschüttung resultieren. Im Reaktorfreiraum oberhalb der Brennstoffschüttung lagen die Temperaturen um ca. 100 °C. Ab einer Betthöhe von 25 bis 30 cm steigen die Temperaturen auf über 1000 °C bei Betthöhe 15 cm an. Die Temperaturpeaks liegen bei den Messungen bei 13 bis 15 cm über dem Reaktorrost, damit im Bereich der Luftdüsen und betrugen ca. 1087 °C bis 1192 °C.

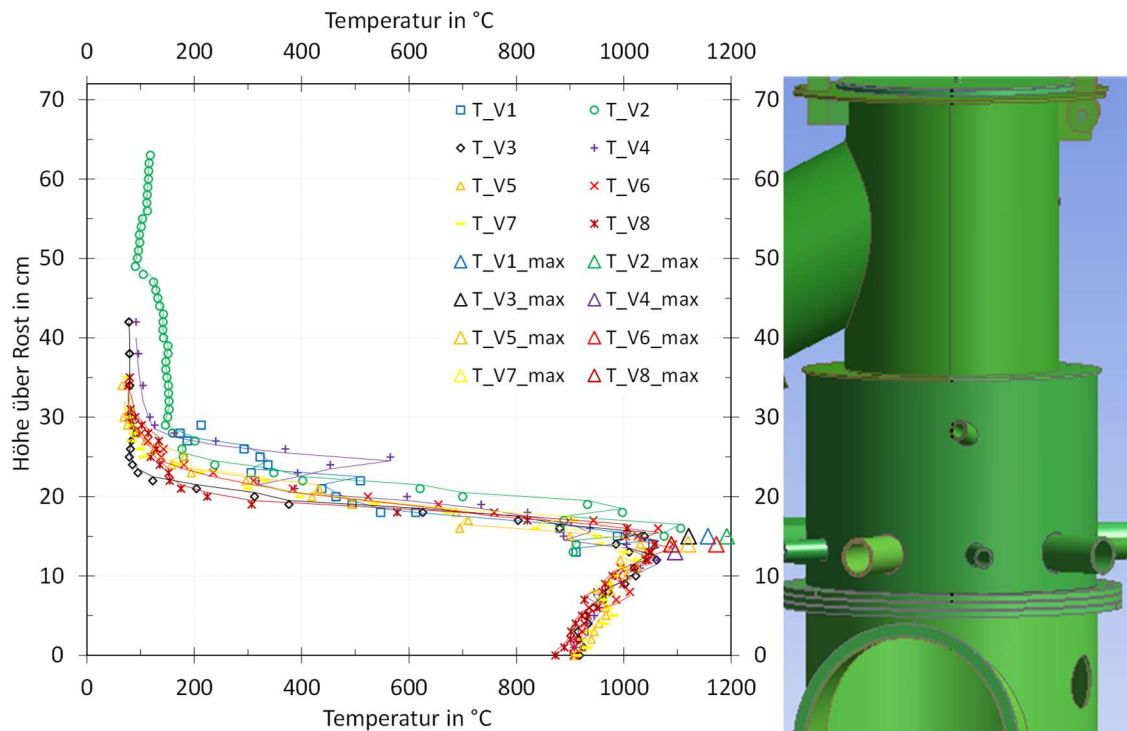


Abb. 2-22 Profile ($N = 8$) der vertikalen Temperatur im Reaktor mit Darstellung der Reaktorgeometrie

Die für die Festbett-Gleichstrom-Vergasung grundlegenden Reaktionsphasen Trocknung, Pyrolyse, Oxidation und Reduktion verlaufen im Reaktionsraum prinzipiell aufeinanderfolgend von oben nach unten ab, können jedoch auch örtlich inhomogen auftreten. All diese Prozesse laufen in einem chemischen Ungleichgewicht ab und überführen den festen Brennstoff in ein partikelbeladenes Gas. Anhand der erfassten Temperaturen im Reaktor und mit Berücksichtigung der spezifischen Temperaturen in den Reaktionsphasen, z.B. nach [19] und [29], können sehr stark vereinfacht die Reaktionsphasen im Reaktor zugeordnet werden, wie in Abb. 2-23 dargestellt. Rückschlüssen aus den erfassten Temperaturen ergeben sich bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse des Festbettes im Reaktor (siehe folgendes Kapitel).

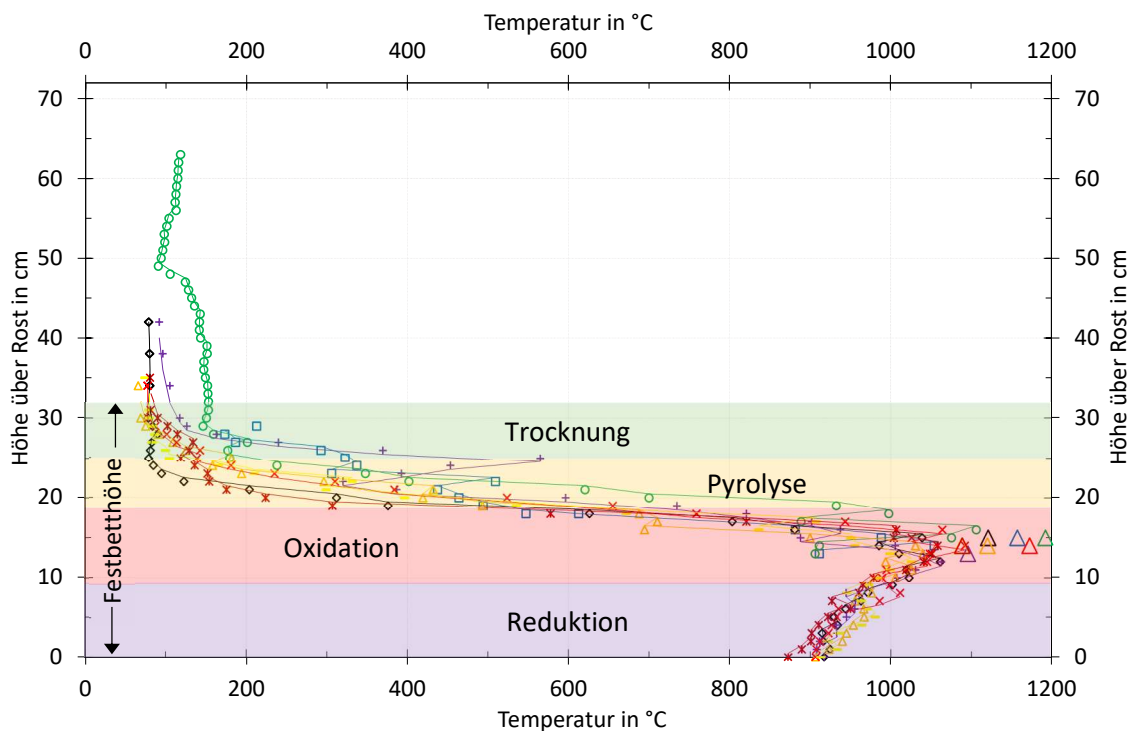


Abb. 2-23 Zuordnung der Reaktionsphasen in Abhängigkeit von der Temperatur im Reaktor

5. Untersuchung der Feststoffumsetzung im Reaktor

Im Zusammenhang mit der Erfassung des Temperaturprofils im Reaktor wurde der Feststoffumsatz während des Vergasungsvorgangs im Reaktor untersucht. In diesem Arbeitspunkt erfolgte eine Zusammenarbeit mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ), im speziellen mit dem Projekt VergaFlex [20]. Hierfür wurden händisch entnommene Schichtproben des Festbettes zuzüglich Brennstoff- und Filterstaubproben zur Verfügung gestellt und beim DBFZ umfassende Laboranalysen durchgeführt. Inhalt des Vorhabens VergaFlex ist es, durch die Entwicklung und Einführung von Produktnormen für pyrogene Kohlenstoffe – zu denen auch Vergaserkoks zählt – und die Standardisierung von Analyseverfahren für die Evaluierung, Kontrolle und Zertifizierung der Vergaserkoksqualität die Voraussetzung für dessen Nutzung und Vermarktung zu schaffen.

Da der Prozess nach dem Abschalten der Anlage aufgrund seiner thermischen Trägheit nicht sofort zum Erliegen kommt, muss mit einer gewissen Nachoxidation gerechnet werden. Des Weiteren können Kohlenwasserstoffverbindungen, die bei hohen Temperaturen gasförmig sind, an erkaltenden Anlagenteilen und natürlich auch am Bettmaterial auskondensieren und das Messergebnis beeinflussen. Daher wurde der Reaktor unmittelbar mit Anlagenstopp mit Stickstoff gespült, um eine Inertgasatmosphäre im Reaktor auszubilden und damit evtl. Nachreaktionen zu vermeiden. Zur Einschätzung des Feststoffumsatzes wurden nach dem Abkühlen des Reaktors Proben in unterschiedlichen Höhen entnommen. Die Ergebnisse der Feststoffanalysen sind in Tab. 2-8 angegeben. Neben der Angabe der Probenahmestelle, der entsprechenden Betthöhe über Rost und der dort gemessenen Betriebstemperaturen sind die Ergebnisse der Immediat- und Elementaranalyse aufgeführt. Weiterhin wurde die Probenbeladung sowohl mit den 16 polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) nach der U.S. Environmental Protection

Agency (EPA) als auch die mit Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol als leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) erfasst. Eine Übersicht der angewendeten Methoden und Normen für die Analysen ist in Tab. 2-7 enthalten.

Tab. 2-7 Für Reaktorbettproben angewendete Analysemethoden und Normen nach [20]

Methode	Norm
Gesamtwassergehalt	DIN EN 14774-2, DIN EN 14346
Elementaranalyse	DIN EN ISO 16948:2015-09
Aschegehalt 550°C	DIN EN 14775
Glühverlust 550°C	DIN EN 15935
Aschegehalt 815°C	DIN 51719
Flüchtige Substanzen	DIN EN ISO 1812
Fixer Kohlenstoff	DIN 51734: 2008-12
EPA-PAK	DIN EN 16181: 2019-08

Die Probenahmestellen im Festbett wurden nach den theoretisch grundlegenden Reaktionsphasen des Prozesses und deren Temperaturbereiche ausgewählt und entsprechend Abb. 2-23 mit „Bereich Pyrolyse, Bereich Oxidation, Bereich Reduktion A(nfang) und Bereich Reduktion E(nde)“ bezeichnet. Darüber hinaus wurden mehrere Proben des Brennstoffes und des Filterstaubes analysiert.

Tab. 2-8 Zusammenfassung der Laborergebnisse für die Feststoffanalysen

Parameter	Einheit	Brennstoff	Bereich Pyrolyse	Bereich Oxidation	Bereich Reduktion A	Bereich Reduktion E	Filterstaub
Betthöhe über Rost	cm	-	17	11	6	2	-
Temperaturen PN-Stelle	°C	-	600...800	900...1100	940...980	910...940	-
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% TS	82,9	76,0	32,2	32,7	7,6	12,5
Fixer Kohlenstoff		16,7	23,5	30,6	59,2	83,6	49,3
Aschegehalt 815°C		0,4	0,5	1,5	8,1	8,8	38,3
Aschegehalt 550°C		-	0,6	1,9	9,9	10,1	46,0
Glühverlust 550°C		-	99,6	98,1	90,1	89,9	54,1
Kohlenstoff		51,6	56,8	75,8	77,2	85,6	62,0
Wasserstoff		5,65	5,84	3,42	2,26	1,05	0,55
Stickstoff		0,04	0,27	0,37	0,40	0,41	0,31
Schwefel		0,00	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,14
Naphthalin	mg/kg TS	-	4,6	11,6	13,7	15,7	693,4
Acenaphthylen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	291,9
Acenaphthen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	10,4
Fluoren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	10,7
Phenanthren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	234,6
Anthracen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	57,3
Fluoranthren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	78,7
Pyren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	66,7
Benzo[a]anthracen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	11,0
Chrysen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	13,6
Benzo[b]fluoranthren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	10,2
Benzo[k]fluoranthren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	5,9
Benzo[a]pyren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	6,3
Indeno[1,2,3-cd]pyren		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Dibenzo[a,h]anthracen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Benzo[ghi]perylen		-	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	2,9
Summe 16 EPA-PAK		-	4,6	11,6	13,7	15,7	1494
Summe BTEX		-	-	30	47	54	3400

In Anlehnung an die Darstellung des Temperaturverlaufes im Reaktor nach Abb. 2-22 ist in Abb. 2-24 sowohl die Zusammensetzung des Festbettes in Abhängigkeit von der Festbetthöhe über dem Rost als auch das Temperaturprofil im Reaktor dargestellt und zusätzlich zur Orientierung die Reaktorgeometrie abgebildet. Deutlich zu erkennen ist der mit geringerer Festbetthöhe fallende Anteil flüchtiger Bestandteile sowie der stetig steigende Aschegehalt. Der steigende Anteil an fixem Kohlenstoff lässt sich mit dem

stärker sinkenden Anteil an flüchtigen Bestandteilen erklären. Der im Anschluss sinkende Anteil fixen Kohlenstoffs verdeutlicht den Umsatz des Brennstoffes in ein Produktgas. Eine räumliche Trennung der Vergasung in die im vorhergehenden Kapitel definierten Zonen lässt sich nur schwer vornehmen. Konstruktiv betrachtet sollte sich die Oxidationszone bei einer Festbetthöhe zwischen 8 und 18 cm befinden. Ersichtlich ist außerdem, dass zwischen der Probenahmestelle „Reduktion E“ direkt oberhalb des Rostes und der Probenahmestelle des Filterstaubes am Gasfilter noch maßgebliche Gas-Feststoffreaktionen stattfinden müssen. So sinkt der Anteil an fixem Kohlenstoff von 84 auf 49 Ma.-% TS und der Aschegehalt steigt von knapp 9 auf 38 Ma.-% TS. Auch bei Berücksichtigung der schwierigen Probenahme im Reaktor mit entsprechender Unsicherheit der Analysedaten ist davon auszugehen, dass über den Drehscheibenrost und den Rohrleitungen bis zum Gasfilter weitere Umsetzungsreaktionen stattfinden. Weiterhin sind signifikante Beladungen mit aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen (PAK, BTEX) erst im Filterstaub nachweisbar. Die Ursache hierfür ist, dass die Temperaturen im Reaktor noch zu hoch für PAK- bzw. BTEX-Adsorptionen am Feststoff sind. Die Kohlenwasserstoff-Verbindungen kondensieren erst bei deutlich niedrigeren Gastemperaturen in Rohrleitungen und Gasfilter (Betriebstemperatur ca. 120 °C) aus und adsorbieren dann am Filterstaub.

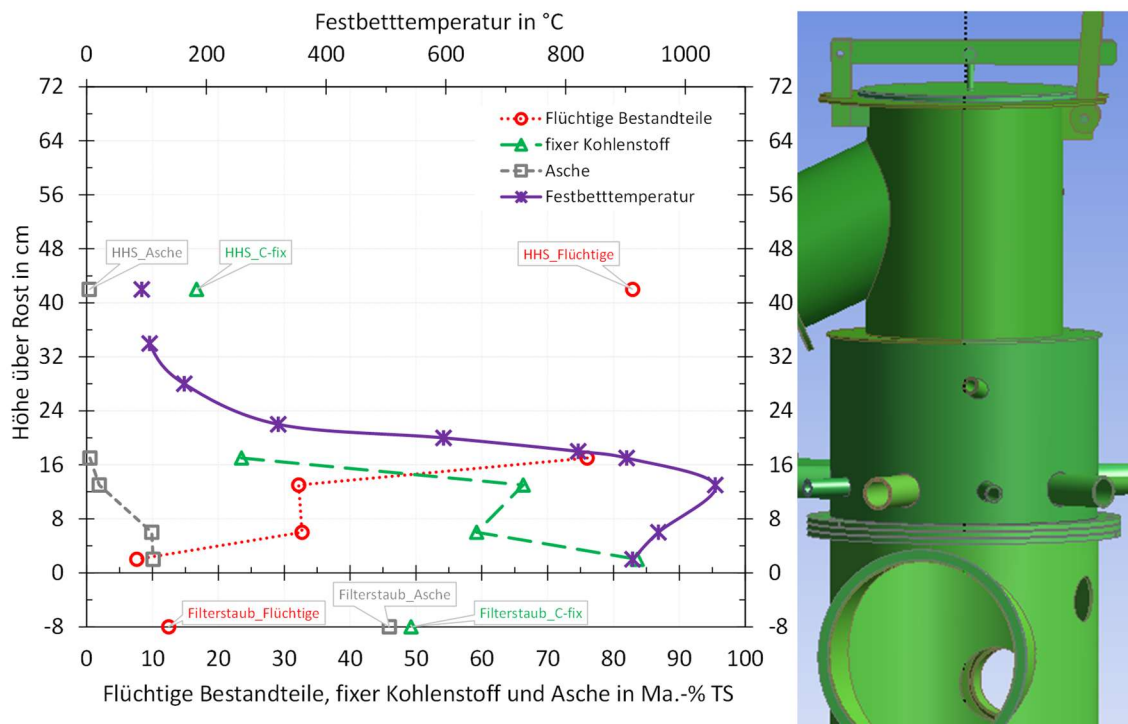


Abb. 2-24 Verlauf der Temperatur im Reaktor und Festbettmaterialzusammensetzung in Abhängigkeit von der Betthöhe

6. Brennstoffvariationen

Allgemeiner Ablauf zur Untersuchung der Einsatzzeignung

Nach der Kontaktaufnahme mit Bereitstellenden von Rest- und Abfallstoffen als potenzieller Einsatzstoff für die Vergasung, erfolgte in der Regel die Zusendung einer repräsentativen Materialprobe zur Laboranalyse. Anhand der Ergebnisse der verschiedenen Analysen wurde die prinzipielle Eignung des Materials als Brennstoff für die im TCV vorhandene marktübliche Anlage zur Festbett-Gleichstrom-Vergasung abgeschätzt. Dabei wurde primär auf die Ergebnisse der Immediatanalyse (Asche, flüchtige Bestandteile) und des Ascheschmelzverhaltens geachtet. Darüber hinaus wurde die Transportfähigkeit, die Festigkeit und das Schüttverhalten der Probe optisch abgeschätzt und mit dem Standardbrennstoff HHS verglichen. Konnte anhand dieser Bewertungen eine prinzipielle Eignung des Materials als Brennstoff für die Festbett-Gleichstrom-Vergasung in der bestehenden Versuchsanlage abgeschätzt werden, wurde üblicherweise die Bereitstellung einer Brennstoffmenge für einen Kurzzeittest in der Biomassevergasungsanlage angefordert. Hierbei wurde im stationären Anlagenzustand, nach Einsatz des Standardbrennstoffes, der zu testende Brennstoff eingesetzt, das resultierende Betriebsverhalten beobachtet sowie die für den Betrieb ggf. notwendigen Anpassungen in der Anlagensteuerung vorgenommen. Dieser Kurzzeittest beinhaltete etwa eine Versuchszeit von drei Betriebsstunden, was wiederum einem Materialbedarf von etwa 100 kg entsprach. Wurde dieser Kurzzeittest als erfolgreich bewertet, erfolgte die Planung eines Langzeittestes mit mind. 15 Betriebsstunden und einem entsprechenden Materialbedarf von etwa 500 kg. In einigen Fällen wurde vorher ein Kaltstartversuch mit dem alternativen Brennstoff durchgeführt, um das Zündverhalten des Materials zu bewerten. Als Ergebnis des Langzeittestes wurde eine Grobbilanzierung des Prozesses und ein Vergleich der Mess- und Anlagendaten mit denen bei Einsatz des Standardbrennstoffes durchgeführt. Außerdem erfolgte eine Abschätzung der Einsatzzeignung des Material im Festbett-Gleichstrom-Vergaser sowie Empfehlungen für evtl. notwendige Anlagenanpassungen und für die weitere Vorgehensweise.

Diese allgemeine Vorgehensweise ist zusammengefasst noch einmal grafisch in Abb. 2-25 dargestellt.

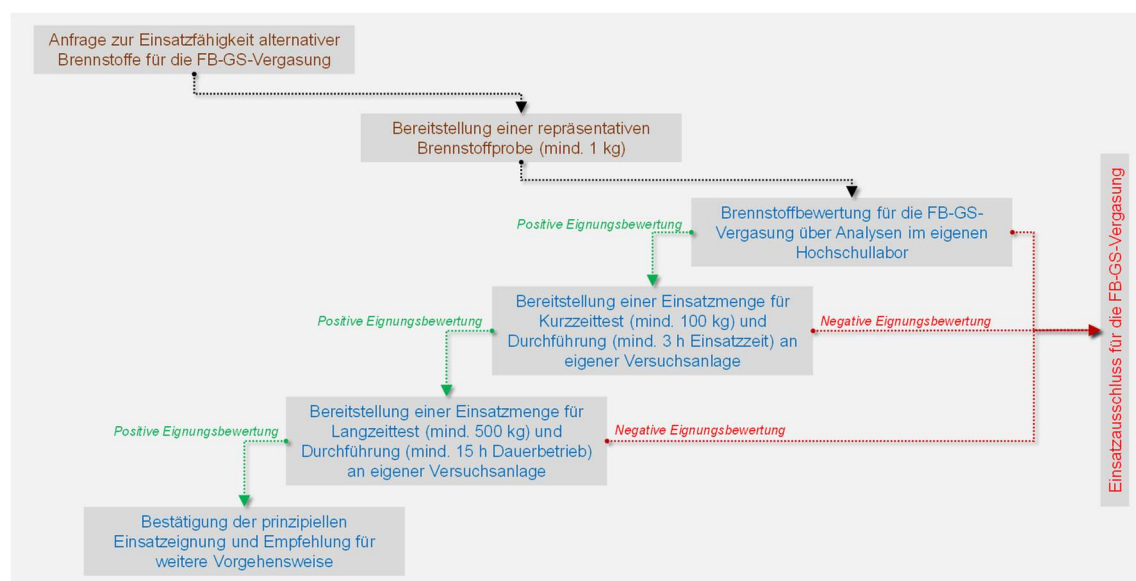


Abb. 2-25 Übersicht der Ablaufschritte zur Einsatzbewertung der Rest- und Abfallstoffe

Übersicht und Bewertung der Brennstoffproben

In Tab. 2-9 sind die im Rahmen von HORA zur Verfügung gestellten Rest- und Abfallstoffe mit ihrer Bereitstellungsform und dem jeweiligen Bereitsteller angegeben. Die in [6] dargestellten Untersuchungen von Sägewerksabfällen (MDF-Produktion) und Gärrestpellets sind in dieser Übersicht nicht mit aufgeführt.

Tab. 2-9 Übersicht der untersuchten Rest- und Abfallstoffe

Materialbezeichnung	Bereitstellungsform	Bereitsteller
Tabakstengel, Tabakstämme	Häcksel	United Tobacco Processing Ltd., Sri Lanka
Landschaftspflegematerial	Hackgut, Feinhackgut, Pressling	Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH, Merseburg
holziger Anteil Siebüberlauf, mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage	Hackgut	Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH, Großpösna
Macadamianusschalen	Schalen	Naturamus GmbH, Aichelberg / Limbua Group Ltd., Kenia
Hanfschäben	Häcksel	MEHA Dämmstoff und Handels GmbH, Schifferstadt
Klärschlamm 1	Granulat	Burkhardt GmbH, Mühlhausen
Klärschlamm 2	Granulat	Stadtwerke Soltau GmbH & Co. KG
Sheabaumnuss	Presskuchen	Naturamus GmbH, Aichelberg / AGRIFASO S.A.R.L., Burkina Faso
Hanf	Pellets	Lighter Leaf Ltd., London
Papierfasern	Pellets	Papier- u. Kartonfabrik Varel GmbH
Weizenstroh	Pellets	Wurde bei Brennstoffhändlern eingekauft und wird üblicherweise als Stalleinstreu eingesetzt.
Haselnusschalen	Schalen	Arsham Clean energy, Eskisehir / Türkei
Erdnussschalen	Schalen	
Pistazienschalen	Schalen	
Olivkerne	Zerkleinerte Kerne	
Miscanthus	Häcksel	
		University Usti nad Labem, CZ

- Bilder der Proben

In den folgenden Abbildungen sind die untersuchten und in Tab. 2-9 aufgeführten Rest- und Abfallstoffe in ihrer jeweiligen Bereitstellungsform dargestellt.



Tabak (Stengel, Stamm)



Landschaftspflegematerial (LPM)



Presslinge aus LPM



Holziger Siebüberlauf aus MBA



Macadamianusschalen



Hanfschäben



Klärschlammgranulat 1



Klärschlammgranulat 2



Sheabamnußpresskuchen



Hanfpellets



Papierpellets



Weizenstrophpellets



Haselnussschalen



Erdnussschalen



Pistazienschalen



Olivenkerne



Miscanthus

- Laboranalysen

Es wurden folgende Analysemethoden im Lehlabor für Brennstoffanalytik der HSZG angewendet. Die Durchführung der Immediatanalysen erfolgte nach DIN 51718/51719/51720 mit einem thermogravimetrischen Multianalysensystem (TGA701, LECO). Darüber hinaus wurde die Elementarzusammensetzung (CHNS(O)) der Proben mit einem Multianalysensystem (vario MICRO cube, Elementar

Analysensysteme) nach DIN 51732/51733 und DIN 51724-3 bestimmt. Die Ermittlung der Brennwerte wurde nach DIN 51900-1/3 mit einem Kalorimeter (C5000, IKA) bestimmt und ggf. der Heizwert berechnet. Schlussendlich wurden alle Analysedaten der jeweiligen Probe bezüglich ihrer Abweichung zueinander nach den geltenden Normen (DIN 51734 und DIN ISO 5725-5) bewertet.

Die Erfassung der Ascheerweichungstemperaturen erfolgte mithilfe eines Erhitzungsmikroskops (EM201, LEITZ, mit Bildanalyse von Hesse Instruments) nach vorheriger Veraschung der Brennstoffproben gemäß DIN 51730, wobei bei biogenen Festbrennstoffen die Analyse nach DIN EN ISO 21404 ausgeführt wurde.

Die Ergebnisse aller durchgeführten Laboranalysen bei den zur Verfügung gestellten Brennstoffproben sind nachfolgend, bezogen auf den wasserfreien Zustand, in Tab. 2-10 zusammengestellt. Als Bewertungsparameter des Ascheerweichungs- und Schmelzverhaltens werden in der Zusammenstellung die Erweichungstemperatur (engl. Deformation Temperature DT) und die Fließtemperatur (engl. Flow Temperature FT) der Aschepartikel herangezogen.

Tab. 2-10 Zusammenstellung der Laboranalysergebnisse für die Proben der Rest- und Abfallstoffe

Analysen	Immediatanalyse in Ma.-% TS			Elementaranalyse in Ma.-% TS					Asche-Schmelz-V. in °C		Brennwert in MJ/kg TS	
	Flü	Cfix	A*	C	H	N	S	O*	DT	FT	HHV	LHV
Weizenstrohpellets	80,5	14,9	4,63	47,33	6,72	0,26	0,07	40,5	ab 990	ab 1302	19,1	17,5
Macadamianussschalen	76,8	21,2	0,48	52,50	6,00	0,20	0,01	41,0	ab 1430	ab 1500	21,1	19,7
Holziger Siebüberlauf	73,4	18,3	8,20	n.b.	n.b.	n.b.	3,67	n.b.	ab 1210	ab 1250	19,2	n.b.
Klärschlammgranulat 1	48,0	5,5	46,54	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 1040	ab 1200	11,7	n.b.
Klärschlammgranulat 2	59,6	6,6	33,81	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 1050	ab 1230	15,6	n.b.
Hanf pellets	77,5	17,7	4,82	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 1190	ab 1190	19,4	n.b.
Papierpellets	85,2	5,3	9,56	n.b.	n.b.	n.b.	0,07	n.b.	ab 1290	ab 1440	26,1	n.b.
Landschaftspflegematerial	78,0	17,0	5,06	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 1200	ab 1220	19,0	n.b.
Sheanusspresskuchen	76,3	19,5	4,23	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 850	ab 1380	23,4	n.b.
Hanf schäben	81,9	13,6	4,53	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 1300	ab 1520	18,3	n.b.
Tabakstamm grob	76,6	8,7	14,63	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 750	ab 1560	n.b.	n.b.
Tabakstamm fein	76,3	5,8	17,91	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 750	ab 1560	n.b.	n.b.
Miscanthus	78,0	16,8	5,20	48,40	6,00	0,36	0,10	45,2	ab 780	ab 1320	18,3	17,6
Haselnussschalen	73,9	25,2	0,88	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 710	ab 1510	21,1	n.b.
Erdnussschalen	73,7	24,1	2,31	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 650	ab 1570	19,5	n.b.
Pistazienschalen	81,0	18,7	0,24	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 730	ab 1550	19,0	n.b.
Olivenkerne	76,8	20,8	2,35	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	ab 680	ab 1530	20,8	n.b.

Flü...Flüchtige Bestandteile; Cfix...fixer Kohlenstoff; DT...Erweichungstemperatur Asche; FT...Fließtemperatur Asche; HHV...Brennwert; LHV...Heizwert

*nach DIN 51719 (815°C)

**rechnerisch, Rest zu 100%

- Bewertung

Anhand der Ergebnisse aus den Laboranalysen wurden für die zur Verfügung gestellten Rest- und Abfallstoffe in Tab. 2-11 folgende Abschätzungen zur Einsetzeignung als Brennstoff in dem marktüblichen Festbett-Gleichstrom-Vergaser vorgenommen.

Tab. 2-11 Bewertung der Einsatzeignung der untersuchten Rest- und Abfallstoffe

Materialbezeichnung	Einsatz- eignung	Kurzbegründung bei Nichteignung	Testeinsatz durchgeführt?
Tabakstengel, Tabakstämme	eingeschränkt möglich	Sehr hoher Aschegehalt, sehr geringer Cfix-Anteil, in loser Form nicht geeignet-Kompaktierung notwendig, DT zu niedrig	Nein
Landschaftspflegematerial-Presslinge	eingeschränkt möglich	Hoher Anteil an S und Cl, hoher Ascheanteil, u.U. DT zu niedrig	Ja
holziger Anteil Siebüberlauf	eingeschränkt möglich	Sehr hoher Anteil an S und Cl, hoher Ascheanteil, u.U. DT zu niedrig	Ja
Macadamianussschalen	möglich		Ja
Hanfschäben	eingeschränkt möglich	in loser Form nicht geeignet-Kompaktierung notwendig	Nein
Klärschlammgranulat 1	keine	Granulat als Einsatzform nicht geeignet (fehlende Formstabilität), sehr hoher Aschegehalt, DT zu niedrig	Nein
Klärschlammgranulat 2	keine	Granulat als Einsatzform nicht geeignet (fehlende Formstabilität), sehr hoher Aschegehalt, DT zu niedrig	Nein
Sheabaumnusspresskuchen	keine	Presskuchen als Einsatzform nicht geeignet (fehlende Formstabilität), DT zu niedrig	Nein
Hanfpellets	eingeschränkt möglich	u.U. DT zu niedrig	Nein
Papierfaserpellets	eingeschränkt möglich	Hoher Ascheanteil, Hoher Anteil v.a. an Cl,	Nein
Weizenstrophpellets	keine	DT zu niedrig	im Vergaser-Prototyp eingesetzt
Miscanthus	keine	DT zu niedrig, in Häckselform nicht geeignet-Kompaktierung notwendig	Nein
Haselnussschalen	keine	DT zu niedrig	Nein
Erdnussschalen	keine		
Pistazienschalen	keine		
Olivenkerne	keine		

Anhand dieser Ersteinschätzung wurden anschließend mit den Rest- und Abfallstoffen

- Macadamianussschalen,
- Landschaftspflegematerial,
- Holziger Siebüberlauf und
- Weizenstrophpellets (hier erfolgte der Einsatz in einem Vergaser-Prototyp)

Testeinsätze in der Festbett-Gleichstrom-Vergasung durchgeführt. Diese Einsatztests werden ausführlich in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Einsatztest Macadamianussschalen

- Zusammenfassung

Im Rahmen einer Masterarbeit [39] in Kooperation mit der naturamus GmbH erfolgte eine Untersuchung zur Einsetztauglichkeit von Macadamianussschalen zur Energiebereitstellung mit einer kleintechnischen Biomassevergasungsanlage. Hintergrund des Projektes war die Etablierung dieser Technik zur dezentralen Energiebereitstellung in Kenia. Die damit zur Verfügung gestellte Energie soll für Trocknungsprozesse z.B. in der Macadamianuss-Verarbeitung eingesetzt werden. Das Projekt wurde in Kooperation mit der HSZG durchgeführt und umfasste sowohl die Durchführung umfangreicher Brennstoffanalysen der Macadamianussschalen als auch mehrere Messfahrten mit der marktüblichen Biomassevergasungsanlage. Für die Auswertung wurden die Ergebnisse des Macadamianussschaleneinsatzes denen des Einsatzes vom Standardbrennstoff HHS gegenübergestellt. In der Brennstoffanalyse zeigte sich, dass die chemisch-stofflichen, die brennstofftechnischen und die physikalisch-mechanischen Parameter der Macadamianussschalen mit denen von HHS vergleichbar sind.

Im Folgenden kurz zusammengefasst sind dies die wichtigsten Erkenntnisse der Einsatztests:

- **Erfolgreiche Vergasung:** Die Vergasung der Macadamianussschalen konnte ohne maßgebliche technische Änderungen des Vergasers in mehreren Messfahrten erfolgreich durchgeführt werden.
- **Punktueller Herausforderungen:** Herausforderungen traten in der Füllstandsregelung im Reaktor, dem Zündverhalten im Zusammenhang mit dem Anlagenkaltstart und der Gasreinigung im Gewebefilter auf.
- **Vergleichbare Effizienz:** Die Effizienz des Vergasungsprozesses war im Rahmen der Messfahrten mit den Macadamianussschalen vergleichbar mit der bei Einsatz von HHS.
- **Ähnliches Produktgas:** Das Produktgas ist im Vergleich zum HHS-Einsatz qualitativ vergleichbar, weist jedoch einen etwas geringeren Heizwert auf.
- **Höhere Emissionen:** Der Vergleich der Motorabgasemissionen zeigt, dass die NO_x und SO_2 -Werte bei Betrieb der Anlage mit Macadamianussschalen höher sind als bei Einsatz von HHS.

- Projektidee und -partner

Die naturamus GmbH als hundertprozentiges Tochterunternehmen der WALA Heilmittel GmbH kauft seit vielen Jahren Bio-Macadamianüsse für die Kosmetikindustrie von der Limbua Group Limited (Limbua) ein. Limbua ist ein deutsch-kenianisches Unternehmen, das mit rund 5.000 kenianischen Kleinbauern und -bäuerinnen zusammenarbeitet. Seit der Gründung setzt sich das Unternehmen für die Verbesserung sozialer Bedingungen für kenianische Macadamia-Kleinbauern und -bäuerinnen ein und hat in Kenia drei dezentrale Produktionsstandorte. Dort werden die Nüsse getrocknet, geknackt, sortiert und für den Export verpackt.

Bei Limbua fallen Macadamianussschalen im Produktionsprozess in großen Mengen als Reststoff an, die vor Ort bislang nur teilweise zur Wärmeerzeugung genutzt werden können. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der Erweiterung der Produktionskapazitäten soll daher das Potenzial von Macadamianussschalen zur effizienten Energiebereitstellung untersucht werden. Parallel zu diesen Überlegungen hatte ein Biolandbauer bei der WALA im Rahmen einer Vortragsreihe das ganzheitliche Konzept seines Hofes vorgestellt. Dazu gehört unter anderem der Betrieb einer Biomassevergasungsanlage mit HHS zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung.

Aus der Verknüpfung dieser beiden Aspekte entstand die Idee, eine Biomassevergasungsanlage für die Verwertung der Macadamianussschalen bei Limbua einzusetzen. Bislang lagen jedoch keine Kenntnisse darüber vor, ob sich Macadamianussschalen als alternativer Brennstoff zum Betrieb von Vergasungsanlagen eignen, da marktverfügbare Anlagen für den Betrieb mit unbehandeltem Holz ausgelegt sind [21], [22].

- Methodik

Die Brennstoffanalytik der Macadamianussschalen umfasste eine Immediatanalyse, die Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens, eine Elementaranalyse und die Bestimmung des Heizwertes, um anhand derer die prinzipielle Einsatzeignung der Schalen abschätzen zu können. Der Testdurchlauf beinhaltete drei Messfahrten. In Messfahrt 1 wurde die Anlage zunächst mit dem Standardbrennstoff HHS angefahren. Nach Erreichen des stationären Zustandes wurde auf den Betrieb mit Macadamianussschalen umgestellt (Einsatzdauer der Schalen ca. 3 bis 4 h). Dabei konnten erste Aussagen über die prinzipielle Eignung der Nussschalen gemacht werden. In Messfahrt 2 (Einsatzdauer der Schalen wiederum ca. 3 bis 4 h) erfolgte ein Kaltstart der Anlage mit den Macadamianussschalen, um eine Aussage über die Zündfähigkeit der Macadamianussschalen treffen zu können. Messfahrt 3 erfolgte über einen Zeitraum von ca. 14 h. Dabei wurde die Anlage ebenfalls mit den Macadamianussschalen angefahren und anschließend die Prozessstabilität über einen längeren Zeitraum beobachtet.

- Ergebnisse Brennstoffanalytik und Messfahrten

Die Ergebnisse der Elementaranalyse sind in Tab. 2-12 dargestellt. Die Elementaranalyse der Macadamianussschalen erfolgte durch ein externes akkreditiertes Labor. Die Werte der HHS wurden im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes ermittelt [23]. Für die Auswertung wurden die Ergebnisse der Macadamianussschalen denen der HHS gegenübergestellt. Die HHS stammen aus Stamm- und Waldrestholz. Deren Qualität entspricht P31S nach DIN EN ISO 17225-4.

Tab. 2-12 Ergebnisse Elementaranalyse Macadamianussschalen im Vergleich zu HHS

Parameter	Einheit	Macadamianussschalen	Holz hackschnitzel
Aschegehalt (815 °C)	Ma.-% _{wf}	0,3	0,5
Kohlenstoff	Ma.-% _{wf}	52,5	51,6
Wasserstoff	Ma.-% _{wf}	6,0	5,7
Stickstoff	Ma.-% _{wf}	0,20	0,04
Schwefel, gesamt	Ma.-% _{wf}	0,013	0,00
Sauerstoff (berechnet)	Ma.-% _{wf}	41,0	42,2

wf: wasserfrei

Die Gegenüberstellung der Elementarzusammensetzung von Holz hackschnitzeln und Macadamianussschalen zeigt, dass der Kohlenstoff-, der Wasserstoff- und der Sauerstoffgehalt vergleichbar sind. Vor allem beim Aschegehalt und bei den Elementen Stickstoff und Schwefel sind Unterschiede festzustellen. Der Aschegehalt der Macadamianussschalen liegt mit 0,3 Ma.-% unter dem der HHS (0,5 Ma.-%). Die Gehalte der Nebenelemente Stickstoff und Schwefel liegen hingegen über den ermittelten Werten für HHS. Auch der im Rahmen der weiteren Immediatanalyse ermittelte Aschegehalt der Macadamianussschalen (0,48 Ma.-%_{anl}) liegt geringfügig unter dem der HHS (vgl. Tab. 2-13). Die Immediatanalyse und die Analyse des Ascheschmelzverhaltens der Macadamianussschalen wurden im Labor der HSZG durchgeführt. Die Heizwertbestimmung für die Macadamianussschalen erfolgte durch

ein externes, akkreditiertes Labor. Die Werte der Immediatanalyse und des Heizwertes für HHS sind wiederum im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes ermittelt worden [23]. Die Werte des Ascheschmelzverhaltens für HHS (Kiefer, Waldrestholz) sind hingegen Literaturwerte [24].

Tab. 2-13 Ergebnisse Immediatanalyse, Asche-Schmelz-Verhalten und Heizwert der Macadamianussschalen im Vergleich zu HHS

Analyse	Parameter	Einheit	Macadamianussschalen	Holzackschnitzel
Immediat-analyse	Aschegehalt (815 °C)	Ma.-% _{wf}	0,48*	0,50
	Flüchtige Substanzen	Ma.-% _{wf}	76,8*	82,7
	Fixer Kohlenstoff	Ma.-% _{wf}	21,2*	16,8
	Gesamtwassergehalt	Ma.-% _{anl}	7,4	10,7
Asche-Schmelz-Verhalten	Erweichungsbereich	°C	1.430 – 1.500	1.077 – 1.290
	Schmelzbereich	°C	1.500 – 1.580	1.290 – 1.313
Brennwert-bestimmung	Heizwert	MJ/kg _{anl}	18,1	16,6
	Heizwert	MJ/kg _{wf}	19,7	18,9

wf: wasserfrei, anl: Anlieferungszustand/Einsatzzustand, *Mittelwert aus Mehrfachbestimmung

Außerdem fällt auf, dass Macadamianussschalen einen im Vergleich zu HHS um absolut 6 Ma.-% niedrigeren Anteil flüchtiger Bestandteile aufweisen. Hinsichtlich des Ascheschmelzverhaltens ist festzustellen, dass der Erweichungsbereich der Asche von Macadamianussschalen im Temperaturbereich zwischen 1.430 - 1.500 °C und der Schmelzbereich zwischen 1.500 - 1.580 °C liegt. Verglichen mit Kiefernholz aus Waldrestholz (Erweichungsbereich: 1.077 - 1.290 °C, Schmelzbereich: 1.290 - 1.313 °C) [24] liegen die Ascheschmelztemperaturen der Macadamianussschalen damit um rund 200-300 K höher als die der HHS. Aus der Brennwertbestimmung ergibt sich unter Berücksichtigung des Wassergehaltes im Einsatzzustand für Macadamianussschalen ein Heizwert von 18,1 MJ/kg. Der Heizwert der HHS im Einsatzzustand liegt bei 16,6 MJ/kg. Der Vergleich der rechnerisch wasserfreien Heizwerte zeigt, dass der Heizwert von Macadamianussschalen absolut um 0,8 MJ/kg über dem der HHS liegt.

Die Bewertung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Macadamianussschalen erfolgte optisch. In Abb. 2-26 sind die Macadamianussschalen und die HHS im direkten Vergleich zu sehen. Die Form der Nusschalenhälften lässt sich als Halbkugel beschreiben. Die Grundfläche der Halbkugel hat einen Durchmesser von ca. 2 cm. Die Dicke der Schale variiert zwischen 2 - 6 mm. Der optische Vergleich der beiden Brennstoffe ergibt, dass die Macadamianussschalen in Größe und Beschaffenheit homogener sind. Außerdem wird der sichtbare Feinanteil der Macadamianussschalen gegenüber den HHS als geringer eingeschätzt. Aufgrund der Homogenität und des geringen Feinanteils der Macadamianussschalen, ist davon auszugehen, dass die Schalen für den anlageninternen Transport über Förderschnecken und Schleusen sowie für die Ausbildung einer Feststoffschüttung im Reaktor prinzipiell geeignet sind.



Abb. 2-26 links: Macadamianussschalen, rechts: Standardbrennstoff Nadelholz-Hackschnitzel

Die Auswertung der Testdurchläufe erfolgt einerseits hinsichtlich der anlagentechnischen Aspekte und andererseits mit dem Fokus auf verfahrenstechnische Parameter. Aus anlagentechnischer Sicht haben sich im Verlauf der Messfahrten drei Schwierigkeiten gezeigt:

- Ein Problem stellt die Füllstandsüberwachung im Reaktor und damit verbunden die Dosierung der Schalen in den Reaktor dar. Bereits im Verlauf der ersten Messfahrt traten hier mehrmals Betriebsstörungen auf. Der Grund dafür ist der mechanische Sensor im Reaktor, der den Füllstand überwacht. Je nachdem, in welcher Höhe der Sensor aufliegt, wird neuer Brennstoff angefordert oder das Erreichen der Brennstoffbettsollhöhe im Reaktor rückgemeldet. Wenn der Sensor zu lange im oberen Bereich des Reaktors pendelt und damit dauerhaft ‚voll‘ meldet, führt dies nach einer definierten Zeit zu der Störmeldung ‚Reaktor überfüllt‘ und die Anlage schaltet ab. Als Lösungsversuch zur Vermeidung des mehrfachen Herunterfahrens der Anlage wurden für die zweite Messfahrt daher verschiedene Einstellungen von Anlagenparametern angepasst. Dadurch konnte die Anzahl der Störungen zwar maßgeblich reduziert, aber nicht vollständig behoben werden.
- Die zweite Schwierigkeit zeigte sich beim Kaltstart der Anlage. Sowohl bei der zweiten als auch bei der dritten Messfahrt musste der erste Startversuch manuell abgebrochen werden, da in einem Zeitraum von ca. 20 Minuten keine Temperaturerhöhung gemessen wurde. Der zweite Startversuch führte bei beiden Messfahrten zur Entzündung des Brennstoffes, infolgedessen war eine Temperaturerhöhung im Reaktor zu messen und der Vergasungsprozess startete.
- Eine weitere Diskrepanz zwischen dem Anlagenbetrieb mit Macadamianussschalen und dem Betrieb mit HHS zeigte sich in der Häufigkeit der Abreinigung des Gewebefilters. In Abb. 2-27 ist der Differenzdruck an verschiedenen Stellen in der Produktgasleitung während der Brennstoffumstellung dargestellt. Bis 14:19 Uhr wurde die Anlage mit dem Standardbrennstoff HHS betrieben. Zu dieser Uhrzeit wurde eine erste Menge Macadamianussschalen in den Tagesbehälter gegeben, die dann ungefähr gegen 15:00 Uhr über das Zuführsystem den Reaktor erreichten. Der lila eingefärbte Graph stellt den Differenzdruck am Gewebefilter dar. Der wiederkehrende senkrechte Abfall des Differenzdrucks resultiert aus der zyklischen Abreinigung des Filters. Zu erkennen ist, dass sich das Reinigungsintervall ab ca. 15:00 Uhr deutlich verkürzt, was den Betrieb der Anlage im weiteren Verlauf der Messfahrt jedoch nicht beeinträchtigt.

Der Differenzdruck über die Brennstoffschüttung im Reaktor war hingegen bei Einsatz der Schalen deutlich geringer als beim Standardbrennstoff HHS.

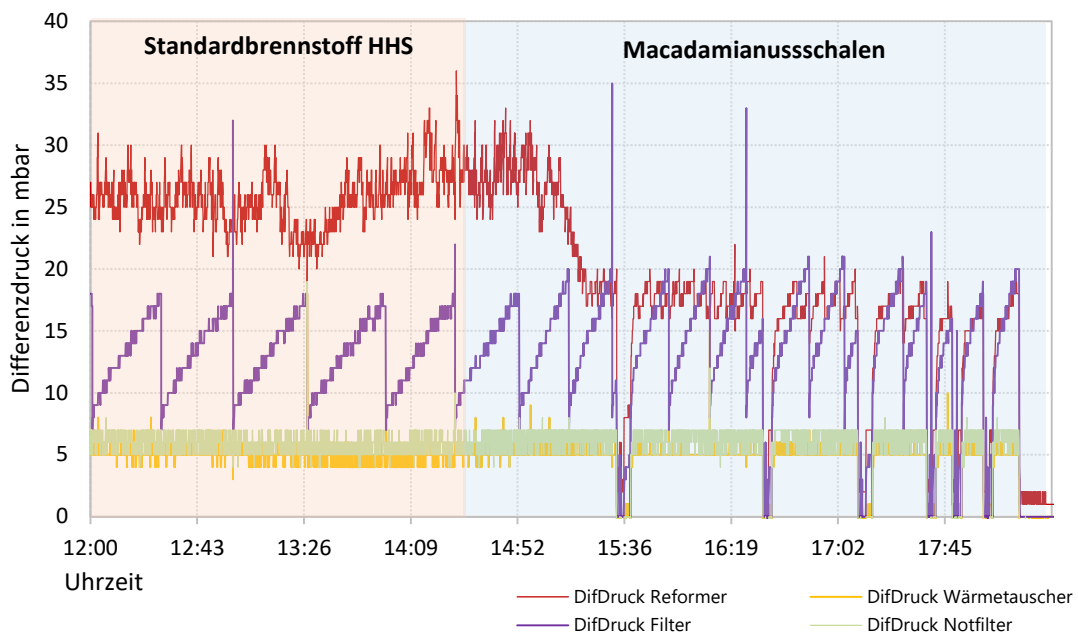


Abb. 2-27 Differenzdrücke in der Produktgasstrecke bei Umstellung von HHS auf Macadamianussschalen

Während der Messfahrten wurde zudem die Zusammensetzung des Produktgases und der Motorabgasemissionen gemessen. Die Zusammensetzung des Produktgases von Macadamianussschalen ist mit der Zusammensetzung des Gases aus HHS vergleichbar (vgl. Tab. 2-14). Die Werte für HHS wurden im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes an der HSZG ermittelt [23]. Geringe Unterschiede bei den Brenngasen Kohlenstoffmonoxid, Methan und Wasserstoff und bei den Inertgasen Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf zeigten sich dennoch. Der übrige Anteil des Produktgases besteht aus Stickstoff, der von der Gasanalytik nicht erfasst wird. Dieser liegt rechnerisch im Produktgas der Macadamianussschalen bei 47,2 Vol.-% und im Produktgas der HHS bei 41,5 Vol.-%. Aus der Zusammensetzung des Produktgases und den Heizwerten der einzelnen Gaskomponenten ergibt sich für das Produktgas aus Macadamianussschalen ein Heizwert von 4,6 MJ/kg. Der Heizwert des Produktgases aus HHS liegt mit 5,38 MJ/kg darüber.

Tab. 2-14 Gegenüberstellung Zusammensetzung und Heizwert Produktgas bei Einsatz von Macadamianussschalen oder HHS, Mittelwerte über dem jeweiligen Auswertungszeitraum

Gaskomponente	Einheit	Macadamianussschalen	Holzackschnitzel
Kohlenmonoxid	Vol.-%, feucht	21,8	21,0
Methan	Vol.-%, feucht	1,7	2,5
Wasserstoff	Vol.-%, feucht	15,2	15,6
Sauerstoff	Vol.-%, feucht	0,0	0,5
Kohlenstoffdioxid	Vol.-%, feucht	7,0	8,2
Wasser	Vol.-%, feucht	7,1	10,7
Heizwert	MJ/kg	4,60	5,38

Beim Vergleich der Motorabgasemissionen (dargestellt in Tab. 2-15) fällt auf, dass die NO_x -Werte bei Betrieb der Anlage mit Macadamianussschalen um den Faktor drei und

die SO₂-Werte um den Faktor fünf höher sind als bei Betrieb mit HHS, was sicherlich auf den im Vergleich höheren Stickstoff- bzw. Schwefelgehalt der Macadamianussschalen zurückzuführen ist. Die Kohlenmonoxid- und Methan-Emissionen betrugen im Vergleich zum Anlagenbetrieb mit HHS rund die Hälfte. Die Werte sind bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 5 Vol.-%. Die Werte für HHS wurden im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes an der HSZG ermittelt [23]. Bei den verglichenen Messfahrten wurden identische Motoreinstellungen und Emissionsminderungsmaßnahmen eingesetzt.

Tab. 2-15 Gegenüberstellung Motorabgasemissionen bei Einsatz von Macadamianussschalen oder HHS

Emissionen	Einheit	Macadamianussschalen	Holz hackschnitzel
Kohlenmonoxid (CO)	mg/m ³	17	43
Stickoxide (NO _x), angeg. als Stickstoffdioxid	mg/m ³	1571	479
Formaldehyd (CH ₂ O)	mg/m ³	0	n. a.
Benzol (C ₆ H ₆)	mg/m ³	0,03	n. a.
Schwefeldioxid (SO ₂)	mg/m ³	16	3
Ammoniak (NH ₃)	mg/m ³	0,14	n. a.
Methan (CH ₄)	mg/m ³	23	48

Zur Beurteilung der Prozessgüte wurden anhand der gemessenen Werte aus den Messfahrten zudem relevante Kennzahlen und Wirkungsgrade berechnet. Eine Auswahl davon ist in Tab. 2-16 dargestellt, wobei die Werte für HHS wieder im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes an der HSZG ermittelt wurden [23].

Tab. 2-16 Gegenüberstellung Brennstoffparameter und Wirkungsgrade bei Einsatz von Macadamianussschalen oder HHS

Parameter	Datenherkunft	Einheit	Macadamianussschalen (Wassergehalt 7,4 Ma.-%)	HHS (Wassergehalt 10,7 Ma.-%)
Brennstoffmassenstrom	Messung +	kg/h	26,22	27,80
	Berechnung	kg _{wf} /h	24,28	24,83
Elektrische Anlagenleistung	Messung	kW	29,8	29,5
Kaltgaswirkungsgrad	Berechnung	%	66	69

Zu sehen ist, dass bei Einsatz von Macadamianussschalen der Massenstrom des rechnerisch wasserfreien Brennstoffes um ca. 0,5 kg/h geringer ausfällt als bei Einsatz von HHS. Die elektrische Anlagenleistung ist bei Einsatz beider Brennstoffe vergleichbar (Macadamianussschalen: 29,8 kW, HHS: 29,5 kW). Der Kaltgaswirkungsgrad ist bei Einsatz von Macadamianussschalen um 3 % geringer im Vergleich zum Einsatz von HHS. Dieser beschreibt die Effizienz eines Vergasungsprozesses [25]. Er gibt an wie viel chemische Energie aus dem Festbrennstoff nach der Vergasung im Produktgas enthalten bleibt [25] und wird definiert als Verhältnis aus Produktgasleistung und Feuerungswärmeleistung [2], [26].

- Auswertung und weiteres Vorgehen

Hinsichtlich der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass diese über einen knapp vierstündigen Zeitraum (stationärer Anlagenzustand und keine Störungen) während der Langzeitmessfahrt (Messfahrt 3) erfolgt. Inwiefern die Ergebnisse auf den Dauerbetrieb

der Anlage mit Macadamianussschalen übertragbar sind, kann mit dem erfolgten Testdurchlauf daher nicht endgültig geklärt werden.

Aufgrund der Ähnlichkeit der chemisch-stofflichen und brennstofftechnischen Eigenschaften der Macadamianussschalen mit dem Standardbrennstoff HHS, der vergleichbaren Produktgaszusammensetzung und dem insgesamt positiven Verlauf der drei Messfahrten, ist davon auszugehen, dass die Biomassevergasungsanlage auch in Monofahrweise mit den Macadamianussschalen betrieben werden kann und dabei eine vergleichbare Umsetzungseffizienz wie beim Anlagenbetrieb mit HHS erzielt werden kann.

Aktuell wird geprüft, inwieweit die Vergasungsanlage in das Energiekonzept Limbuas passt. Die Etablierung der Technologie in Kenia stünde zudem im Einklang mit den Bestrebungen der kenianischen Regierung die Waldflächen im Land zu erhöhen. Macadamianüsse werden bei Limbua in ökologischer Anbauweise in Mischkulturen mit Avocado- und Mangobäumen kultiviert. Die Macadamianussschalen stellen somit einen im Anbau ökologisch nachhaltigeren Brennstoff dar, da Brennholz in Kenia meist nicht nachhaltig geerntet wird [27]. Macadamianussschalen stehen zudem nicht in Landnutzungskonkurrenz mit Nahrungsmitteln. Sie werden im Gegensatz zu Energiepflanzen nicht der angebauten, sondern der anfallenden Biomasse zugeordnet [28].

Einsatztest Landschaftspflegematerial

In Kooperation mit der Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH (siehe LOI in Anlage 6) wurde im Rahmen des Projektes ebenfalls die Einsatzzeignung von Landschaftspflegematerial (LPM) in der Biomassevergasungsanlage untersucht. Dieser Reststoff stellte in diesem Zusammenhang einen aufbereiteten Rohstoff aus der kommunalen Grünschnittsammlung dar und war durch eine Mischung aus verholztem Material mit Strohfasern und geringem Anteil von Straßenmüll gekennzeichnet. Dabei wurden in einer ersten Laboranalyse (vgl. Tab. 2-17) hohe Gehalte an Asche und für den Betrieb problematische Spurenelemente (wie z.B. Blei, Chrom, Chlor) festgestellt, sodass in einem weiteren Schritt das Mischungsverhältnis der Materialien geändert und in mehreren Schritten zu Hackgut aufbereitet (Zerkleinerung, Windsichtung) wurde (vgl. Abb. 2-31). Die Laboranalyse für dieses Gemisch (vgl. Tab. 2-17) bescheinigte eine prinzipielle Einsatzfähigkeit des Materials, sodass ca. 150 kg des Hackgutes für den Einsatztest zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 2-17 Laboranalysenergebnisse des LPM bei unterschiedlichen Aufbereitungsstufen

Parameter	Einheit	Erstes LPM-Gemisch nach Aufbereitung zu Briketts	Zweites LPM-Gemisch nach Aufbereitung zu Hackgut
Aschegehalt	Ma.-% TS	17,0	3,0
Schwefel	Ma.-% TS	0,08	0,05
Chlor	Ma.-% TS	0,15	0,09
Arsen	mg/kg TS	1,8	<2
Blei	mg/kg TS	15	2,4
Cadmium	mg/kg TS	0,2	<0,4
Chrom	mg/kg TS	18	10
Kupfer	mg/kg TS	16	5,3
Quecksilber	mg/kg TS	<0,05	<0,1
Brennwert	MJ/kg TS	17,4	19,0
Ascheerweichungs-temperatur	°C	n.b.	1200

Die Vorgehensweise der Einsatztests zur Vergasung des LPM ist in Tab. 2-18 kurz zusammengefasst und kann wie folgt beschrieben werden: Nach Bereitstellung wurde das LPM im Rahmen eines ersten Einsatztests dem Vorlagebehälter der Biomassevergasungsanlage zugegeben. Dabei traten im Betrieb vermehrt Probleme in der Ausförderung aus dem Behälter über den Förderschneckenrichter, aber vor allem Verblockungen im Schneckensystem (im Bereich eines 90°-Bogens) aufgrund der Inhomogenität des Materials auf (vgl. Abb. 2-28). Somit konnte keine kontinuierliche Anlagenbeschickung mit dem LPM erfolgen, sodass beim darauffolgenden Einsatztest eine manuelle Zugabe des LPM direkt oberhalb des Schleusensystems erfolgte. Jedoch traten auch hier Probleme beim Materialtransport aus der Schleuse bis in den Reaktor auf, sodass nicht genügend Brennstoff zur Verfügung gestellt werden konnte.



Abb. 2-28 Links: Verblockung des LPM zwischen Zuführschnecke und Schleuse im Bereich eines 90°-Bogens, rechts: Blick von oben in Schleusenfallschacht

Aufgrund dessen wurde eine weitere Zerkleinerung des LPM zu Feinhackgut vorgenommen (vgl. Abb. 2-31), um dessen Homogenität zu erhöhen. Mit dem nun weiter zerkleinerten Material wurden weitere Einsatztests vorgenommen. So erfolgte zuerst ein Leerversuch mit dem Material zur Begutachtung der Transportfähigkeit innerhalb der Anlage. Bei dieser manuellen Betriebsweise von Schleusenräumer und Zuführschnecke zum Reaktor konnte das zerkleinerte LPM bis in den Reaktor transportiert werden. Im Anschluss daran erfolgte ein neuerlicher Einsatzversuch in der Biomassevergasungsanlage. Dieser musste jedoch ca. eine Stunde nach LPM-Zugabe aufgrund

verschiedenster Störungen abgebrochen werden. Dabei traten v.a. zwei verfahrenstechnische Problemstellen auf. Nach der manuellen Zugabe gelangt das LPM in den Schleusenraum, wo es mit einem Drehkreuz mechanisch bewegt wird und somit in eine Austragsöffnung geschoben werden soll. Der Hauptteil des Häckselmaterials befand sich jedoch noch in dem Schleusenraum (vgl. Abb. 2-29), sodass davon ausgegangen werden musste, dass – aufgrund von Brückenbildung in der Schleuse – nicht ausreichend Material ausgetragen werden konnte. Der darauffolgende Transport über die Schnecke in den Reaktor hingegen funktionierte. Rechts in Abb. 2-29 ist jedoch zu erkennen, dass das Material vom oberen Teil des Reaktors nicht in den unteren Teil – also den Reaktionsraum als solches – gelangt ist, sondern Brückenschichten aufbaute, was wiederum zum wiederholten Leerfahren des Reaktors führte. Scheinbar bildete das feiner gehäckselte LPM aufgrund seiner Struktur eine zu dichte und in sich "verwobene" Schicht, sodass es mit dem Schütt- und Fließverhalten von HHS nicht vergleichbar war und entsprechend zu den mechanischen Problemen in der Anlage führte.

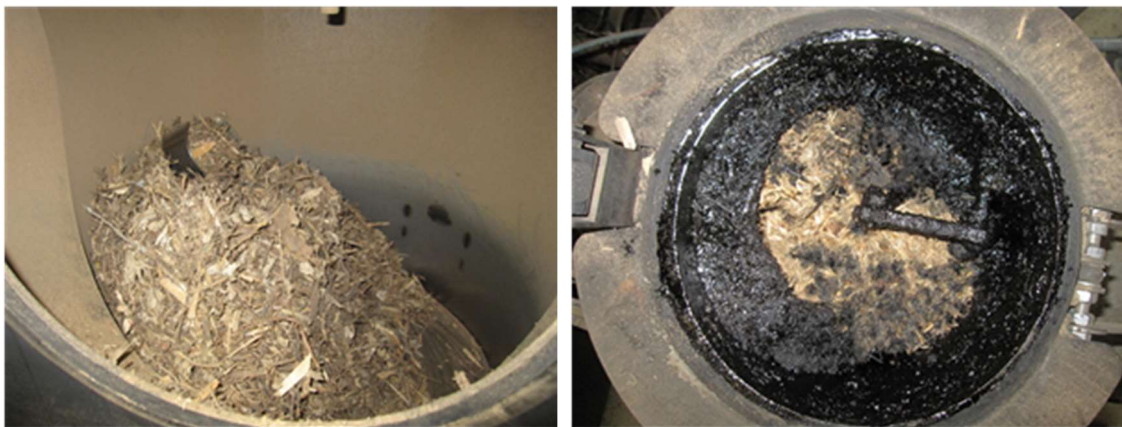


Abb. 2-29 Links: Verblockung im Schleusenraum; rechts: Brückenbildung im oberen Teil des Reaktors (hier Blick von oben in den Reaktor)

Um diesen beschriebenen Problemen entgegenzuwirken, wurde eine Kompaktierung des Materials in Form kleiner, zylindrischer Presslinge durchgeführt (vgl. Abb. 2-31). Mit diesen LPM-Presslingen erfolgten nun weitere Einsatztests. Dazu wurde die Anlage mit HHS in Betrieb genommen und ca. sechs Stunden bis zum stationären Zustand betrieben. Anschließend wurden die Presslinge händisch in den Vorratsbehälter gegeben. Der automatische Austrag und Transport über Brennstoffschnecke, Schleusensystem etc. funktionierte ohne Störungen, sodass die Presslinge bis in den Reaktor transportiert und dort umgesetzt wurden. Der Anlagenbetrieb mit dem Material konnte jedoch nur ca. eine Stunde aufrechterhalten werden, da der Differenzdruck im Reaktor stark anstieg, was schlussendlich zur Anlagenstörung und Abbruch der Messfahrt führte. Es musste davon ausgegangen werden, dass im Reaktor Schlackeschichten auftraten, die einen kontinuierlichen Betrieb verhinderten. Dass die Gefahr der Verschlackung besteht, ist anhand der Laboranalysedaten erkennbar (vgl. Tab. 2-17). Hier wurde eine Ascheerweichungstemperatur von ca. 1200 °C bestimmt. Im Reaktor wurden jedoch bereits Temperaturen von 1200 bis 1300 °C punktuell gemessen (vgl. Kapitel Temperaturprofil im Reaktor), sodass in diesen heißen Bereichen Aschepartikel erweichen, aneinander anhaften und schließlich Schlackeschichten bilden können. Somit wurde nach diesem abgebrochenen Versuch der Reaktorinnenraum nach dem Abkühlen untersucht. Dabei konnten jedoch keine markanten Verschlackungen festgestellt werden, sodass zur Überprüfung ein weiterer Einsatzversuch der LPM-Presslinge vorgenommen wurde. Dabei wurden ca. 80 kg der LPM-Presslinge über einen Zeitraum von 2,5 h vergast, jedoch konnte der Prozess nur mit kontinuierlicher, manueller Hilfe aufrechterhalten werden. Der Differenzdruck im Reaktor stieg mit Einsatz

der Presslinge analog zum letzten Versuch wieder stark an. Um den Betrieb zu gewährleisten, musste das Drehscheibenrost im Reaktor in seiner Bewegung manuell unterstützt werden. Im Automatikmodus war kein kontinuierlicher Betrieb mit den Presslingen möglich. Im Anschluss wurde noch einmal eine Sichtprobe des Reaktorinnenraumes vorgenommen. Es konnten dabei einzelne Schlackebrocken aus dem Reaktor entfernt werden, die vermutlich bei einem längeren Betrieb zu einer sich ausbreitenden Verschlackungsschicht und somit zwangsläufig zur Prozessstörung geführt hätten (vgl. Abb. 2-30).



Abb. 2-30 Nach Einsatz der LPM-Presslinge; links: Blick von oben in den Reaktor; rechts: aus dem Reaktor entfernte Schlackebrocken

Somit konnte über die Einsatztests mit LPM in unterschiedlicher Bereitstellungsform (Hackgut, Feinhackgut, Brikett) keine Eignung des Materials als Brennstoff für die Biomassevergasungsanlage aufgrund der Verschlackungsgefahr festgestellt werden.

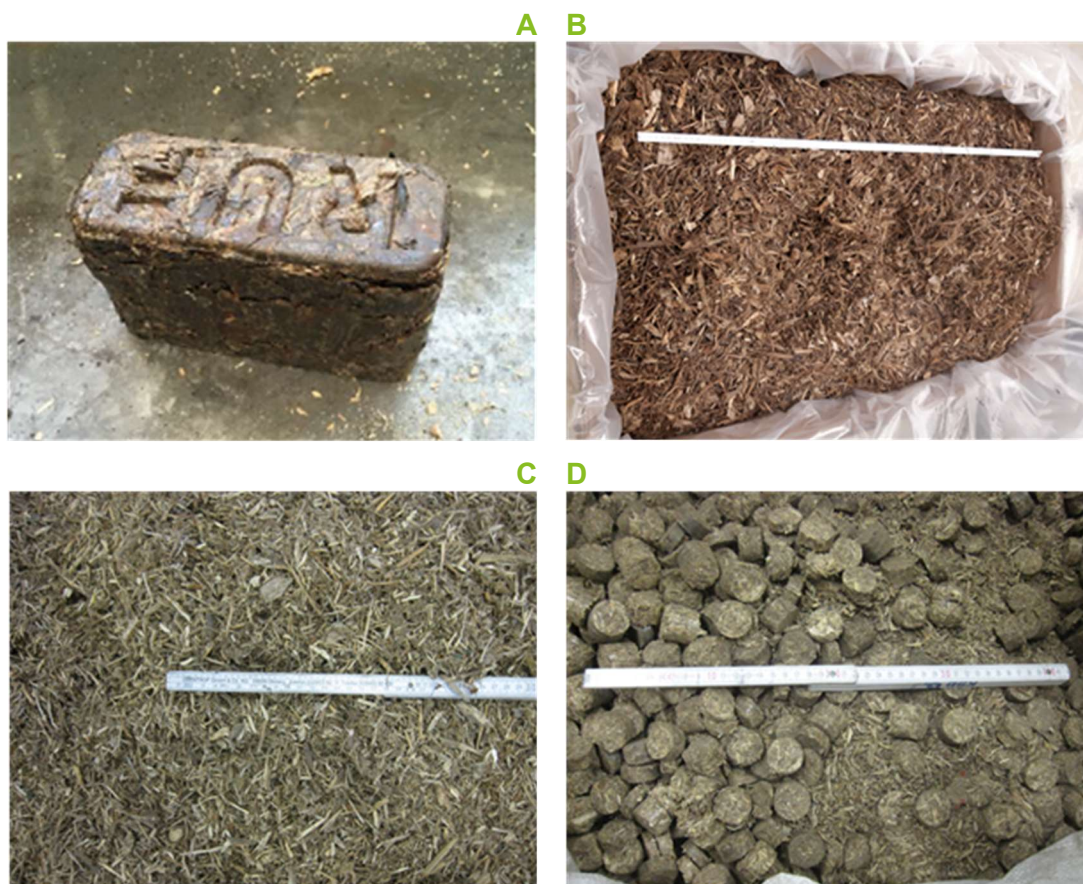


Abb. 2-31 Bereitstellungsformen des LPM, A: Brikett, B: Hackgut, C: Feinhackgut, D: zylindrische Presslinge

Tab. 2-18 Zusammenfassung der LPM-Einsatztests

Datum	Vorgehen	Anpassungen	Ergebnis
06.02.2020	Materialanlieferung	Nach erster Laboranalyse neue Materialmischung und Bereitstellung als Hackgut	Erste Laboranalyse wies auf mögliche Betriebsprobleme hin, zweite Analyse zeigt prinzip. Einsatzmöglichkeit
19.02.2020	Einsatztest	Vorerst keine Veränderung der Anlagenausführung und Zugabe des Materials über Tagesbehälter und Schneckensystem	Abbruch aufgrund Probleme in der Brennstoffzuführung (Schneckensystem) durch Verblockung infolge der Inhomogenität des Materials
06.03.2020	Einsatztest, manuelle Zugabe	Manuelles Befüllen der Anlage mit LPM oberhalb Schleuse und Test der Vergasung im Reaktor	wiederholt Probleme in der Brennstoffzuführung über Schleusensystem durch Verblockung aufgrund der Inhomogenität des Materials
08.06.2020	Überarbeitung des Materials und Neuanlieferung	Angepasste Aufarbeitung des Materials zu Feinhackgut	
02.07.2020	Manueller Transporttest mit überarbeitetem Material	Manuelle Befüllung der Schleuse und Transport des LPM in den Reaktor um die Transportfähigkeit des Materials ab Schleuse bis zum Reaktor zu testen	Funktionstest bestanden, ggf. Gefahr der Verblockung im Einfüllbereich des Reaktors
07.07.2020	Einsatztest mit überarbeitetem Material	Weiterhin manuelle Befüllung der Anlage oberhalb Schleuse	kein kontinuierlicher Betrieb, da sowohl im Schleusensystem als auch im Reaktorbereich Brückenbildungen
23.11.2020	Erneute Überarbeitung des Materials und Neuanlieferung	Kompaktierung zu zylindrischen Presslingen um die Transportfähigkeit zu erhöhen	
13.01.2021	Einsatztest Presslinge		Störungen aufgrund hohen Differenzdruckes im Reaktor, Drehscheibenrost im Reaktor blockiert, ggf. Verschlackung
10.03.2021	2. Einsatztest Presslinge, ca. 80 kg	Keine Verschlackung im Reaktor vom vorherigen Versuch feststellbar, daher 2. Versuch	Störungen ähnlich wie beim vorherigen Einsatztest, Verschlackung im Reaktor

Einsatztest von holzigem Material aus dem Siebüberlauf einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage

Im Rahmen einer weiteren Masterarbeit [40] und in Kooperation mit der Westsächsischen Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (LOI in Anlage 7) erfolgte, ähnlich wie beim Vorgehen zur Bewertung der LPM-Einsatzfähigkeit, eine Untersuchung zum Einsatztest von holzigem Material aus dem Siebüberlauf einer Biomüll- und Grünschnitt-Kompostieranlage (Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage (MBA) Gröbern) in der Biomassevergasungsanlage.

Hintergrund war die Überlegung, das im Siebüberlauf anfallende Holz über eine Vergasung in ein Holzgas thermochemisch umzuwandeln. Das dabei entstehende

Produktgas soll dabei nicht, wie sonst üblich, in einem BHKW zum Einsatz kommen, sondern als Brenngas für eine regenerative thermische Oxidation (RTO) zur Abluftreinigung der Kompostieranlage genutzt werden.



Abb. 2-32 Holziges Material aus dem Siebüberlauf; links: Laborprobe; rechts: Material für Vergasungstest

Das Material befand sich zuvor ca. acht bis zehn Wochen im Trockenfermenterverfahren. In der Gesamtmasse macht der separat angenommene und zugegebene Grün- und Astschnitt etwa 8 Ma.-% aus. Das Material wird nach den Fermentern mit Pressschnecken abgepresst, wobei die Struktur des Astschnittes hierbei unterstützend wirkt. Nach dem Austrag aus den Trockenfermentern passiert das Material verschiedene Siebstrecken, wobei grobe Anteile nun als Siebüberlauf abgesondert werden. Diese Anteile bestehen hauptsächlich aus holzigem Material mit minimalen Anhaftungen. Hier wurde die Materialprobe entnommen, anschließend manuell sortiert und auf eine Größe gemäß P31S nach DIN EN ISO 17225-4 zerkleinert (vgl. Abb. 2-32). Daraufhin wurde das aufbereitete Material als Laborprobe zur Verfügung gestellt und eine Immediat- sowie Brennwertanalyse durchgeführt (vgl. Tab. 2-19). Ersichtlich war der im Vergleich (bei HHS üblich ca. 18 MJ/kg TS) niedrigere Brennwert, der deutlich höhere Anteil an Asche (bei HHS üblich <1 Ma.-% TS) und der niedrigere Wert an Flüchtigen Bestandteilen (bei HHS üblich ca. 80 Ma.-% TS). Nach einer weiteren 2 mm-Feinkornabsiebung wurden die Siebüberlauf-HHS nochmals in einer Laboranalyse untersucht (vgl. Tab. 2-19). Demnach war nur noch ein Ascheanteil von ca. 8 Ma.-% in der Trockenmasse, statt der 25 Ma.-% aus der Analyse vor der Feinkornabsiebung, festzustellen. Bei der Analyse der Neben- und Spurenelemente fallen vor allem die hohen Anteile an Schwefel, Chlor und Kupfer auf, die zu Betriebsproblemen (u.a. Hochtemperaturkorrosion) führen können. Unabhängig davon sollte die prinzipielle Einsatzfähigkeit der Siebüberlauf-HHS in der Biomassevergasungsanlage praktisch getestet werden, sodass ca. 100 kg des Hackgutes zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 2-19 Laboranalysergebnisse für Siebüberlauf-HHS bei unterschiedlichen Aufbereitungsstufen

Parameter	Einheit	Siebüberlauf-Rohmaterial	Siebüberlauf-Material nach Feinkornabsiebung
Aschegehalt	Ma.-% TS	25,8	8,2
Flüchtige Substanzen	Ma.-% TS	59,3	73,4
Fixer Kohlenstoff	Ma.-% TS	14,8	18,3
Schwefel	Ma.-% TS	n.b.	3,7
Chlor	Ma.-% TS		1,6
Blei	mg/kg TS		4,2
Cadmium	mg/kg TS		<0,1
Chrom	mg/kg TS		11
Kupfer	mg/kg TS		31
Quecksilber	mg/kg TS		<0,1
Brennwert	MJ/kg TS	15,5	19,2
Ascheerweichungs-temperatur	°C	n.b.	1210

Die Vorgehensweise des Einsatztests ist wieder in einer Tab. 2-20 kurz zusammengefasst und kann wie folgt beschrieben werden: Mit den Siebüberlauf-HHS wurde ein Einsatztest durchgeführt. Dazu wurde die Anlage mit HHS in Betrieb genommen und ca. sechs Stunden bis zum stationären Zustand betrieben. Anschließend wurden die Siebüberlauf-HHS (ca. 80 kg) händisch in den Vorratsbehälter gegeben. Der automatische Austrag und Transport über Brennstoffschnecke, Schleusensystem etc. funktionierte ohne Störungen, sodass die Siebüberlauf-HHS bis in den Reaktor transportiert und dort umgesetzt wurden. Der Anlagenbetrieb mit dem Material konnte jedoch nur ca. 2,5 Stunden aufrechterhalten werden, da folgende Störungen auftraten:

- Probleme in der Füllstandsüberwachung im Reaktor
- Große Abweichungen zwischen den Reaktorwandtemperaturen
- Starker Anstieg des Differenzdruckes im Reaktor
- Beeinflussung der Funktionsfähigkeit des Drehscheibenrosters im Reaktor

Beispielhaft hierfür sind die Verlaufsdiagramme der Reaktorwandtemperaturen (vgl. Abb. 2-33) und der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter (vgl. Abb. 2-34) dargestellt.

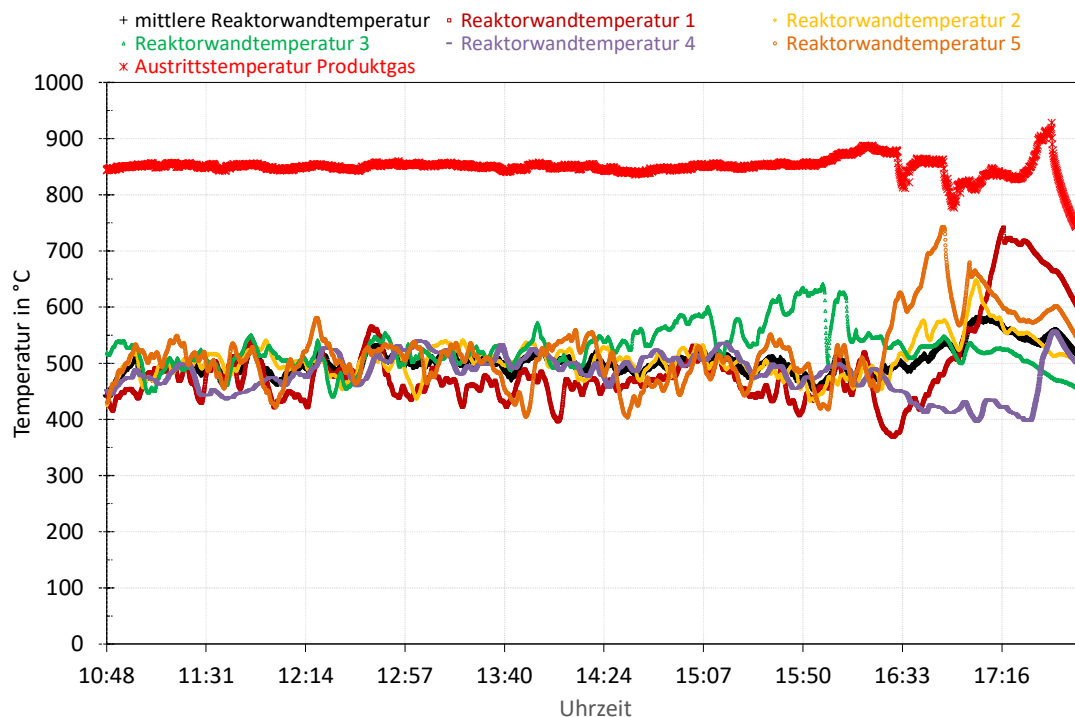


Abb. 2-33 Verlauf der Reaktorwandtemperaturen und der Produktgastemperatur, ab ca. 15 Uhr Einsatz der Siebüberlauf-HHS

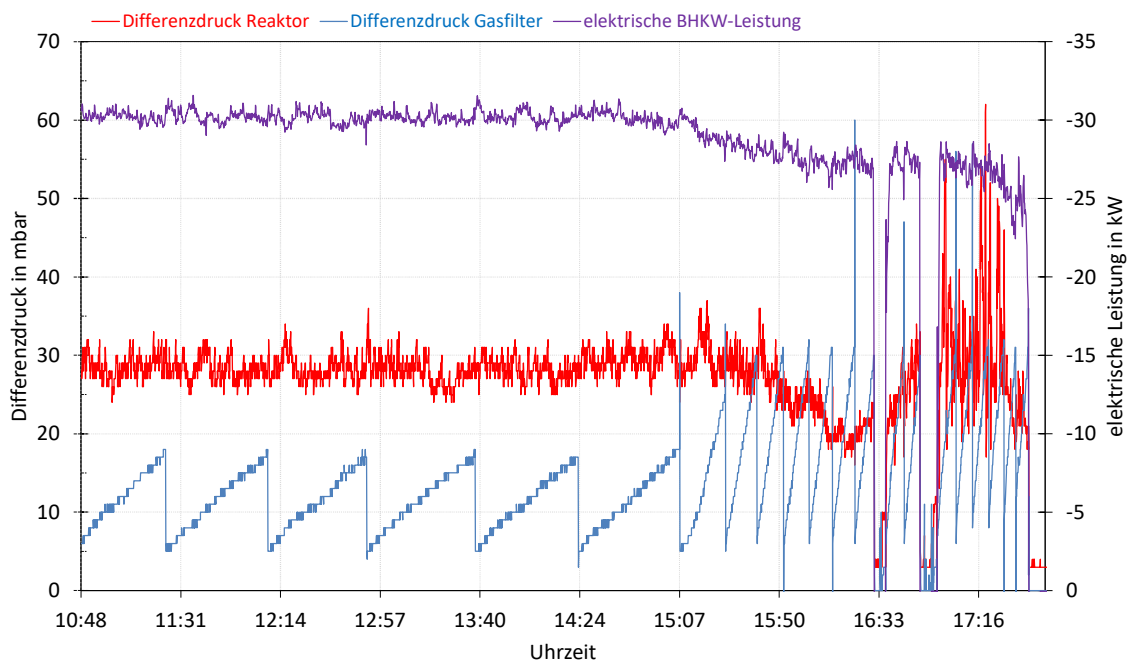


Abb. 2-34 Verlauf der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter sowie elektrische BHKW-Leistung, ab ca. 15 Uhr Einsatz der Siebüberlauf-HHS

Diese Betriebsprobleme führten schlussendlich zu mehreren Anlagenstörungen und schließlich zum Abbruch der Messfahrt. Es musste davon ausgegangen werden, dass im Reaktor Schlackeschichten aufgetreten sind, die einen kontinuierlichen Betrieb verhindern. Dass die Gefahr der Verschlackung besteht, ist anhand der Laboranalysedaten erkennbar (vgl. Tab. 2-19). Hier wurde eine Ascheerweichungstemperatur von ca. 1210 °C bestimmt. Im Reaktor wurden jedoch

schon Temperaturen bis zu 1300 °C punktuell gemessen (vgl. Kapitel 3.4), sodass in diesen heißen Bereichen Aschepartikel erweichen, aneinander anhaften und schließlich Schlackeschichten bilden können. Somit wurde auch hier nach dem Versuch der Reaktorinnenraum untersucht und dabei im Bereich der Luftdüsen (heißeste Reaktorzone) eine markante Schlackeschicht entdeckt (vgl. Abb. 2-35), die händisch entfernt werden musste.



Abb. 2-35 Nach Einsatz der Siebüberlauf-HHS; links: Blick von oben in den Reaktor; rechts: aus dem Reaktor entfernte Schlackebrocken

Somit konnte anhand des Einsatztests mit Siebüberlauf-HHS keine Eignung des Materials als Brennstoff für die Biomassevergasungsanlage aufgrund der Verschlackungsgefahr festgestellt werden. Andere Vergasungsprinzipien (z.B. Wirbelschichtvergasung) würden sich hierfür ggf. besser eignen, da verfahrensbedingt die Vergasungstemperaturen deutlich niedriger sind als bei der Festbett-Gleichstrom-Vergasung [29].

Tab. 2-20 Zusammenfassung des Siebüberlauf-HHS-Einsatztests

Datum	Vorgehen	Anpassungen	Ergebnis
16.06.2020	Anlieferung Laborprobe		Prinzipielle Einsetzbarkeit in der Vergasung gegeben
24.06.2020	Überarbeitung des Materials durch Feinkornabsiebung		Maßgebliche Verringerung des Aschegehaltes
08.07.2020	Materialanlieferung	Bereitstellung als Hackgut	
27.07.2020	Einsatztest	keine Veränderung der Anlagenausführung und Zugabe des Materials über Vorratsbehälter und Schneckensystem	Abbruch aufgrund Verdacht auf Verschlackung, Anzeichen hierfür durch: Anstieg des Differenzdruckes im Reaktor, stark schwankende Reaktorwandtemperaturen, Beeinträchtigung der Drehscheibenrostfunktion, Probleme bei Füllstandsüberwachung im Reaktor

Vergasung von Stroh in einem Festbett-Gleichstrom-Vergaser-Prototyp

Wie in [1] ausführlich dargestellt, erfolgten unter Nutzung eines Prototyps zur kleintechnischen Festbett-Gleichstrom-Vergasung weitere Untersuchungen zur Erweiterung des Brennstoffbandes. Dabei wurden Strohpellets als Brennstoff eingesetzt und folgende grundlegende Ergebnisse erarbeitet:

- **Funktionsfähigkeit:** Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit kleintechnischer Festbett-Gleichstrom-Vergasung die Vergasung von Stroh zum Zwecke der Schwachgasbereitstellung durchgehend über 25 Stunden und ohne Anzeichen von Prozessproblemen stabil möglich ist.
- **Gasqualität:** Die Qualität des Produktgases war dabei aus energetischer Sicht ähnlich der von Produktgasen bei der Festbett-Gleichstrom-Vergasung von Holz.
- **Effizienz:** Anhand der ermittelten Kenngrößen (Kaltgaswirkungsgrad und Brennstoffausnutzungsgrad) konnte eine gute Umsetzungseffizienz des Brennstoffes in diesem Vergaserprototyp ermittelt werden.

Für weitere Informationen zu dieser Versuchsreihe mit Strohpellets wird auf folgende Veröffentlichungen verwiesen:

- SCHNEIDER, R., TITZE, E., SALOMO, B., GRUSLA, S., POHL, R., MEINERT, J., ZSCHUNKE, T.: Zwischenbericht Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA), SAB-Projekt, Zittau, 28.02.2021
- SCHNEIDER, R., POHL, R., ZSCHUNKE, T., HOFMEISTER, M.: Vergasung von Stroh in einem kleintechnischen Festbett-Gleichstrom-Vergaser, Forschungsbeitrag auf Webseite und dem Branchenticker Holzgas (Ausgabe 9.12.21) der FEE e.V., URL: <https://www.fee-ev.de/themen/holzgas/meldungen-holzgas/strohvergasung>, November 2021
- ZSCHUNKE, T., SCHNEIDER, R., POHL, R., HOFMEISTER, M.: Gasification of straw in a small-scale test stand, Frontiers Energy Research - Bioenergy and Biofuels, Frontiers in Biomass Pyrolysis, eingereicht am 20. Juni 2021-derzeit im Review

7. Variation Vergasungsmitteltemperatur

Motivation und Ziel

Ausgehend von detaillierten Betrachtungen in [8], [30] hinsichtlich des Einflussparameters Temperatur auf den Vergasungsprozess sollte die Prozesseffizienz mit steigender Eintrittstemperatur des Vergasungsmittels steigen (vgl. Abb. 2-36). In Anlehnung an die Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen wird damit – wie auch mit der Trocknung der Biomasse – eine effektive Ausnutzung der in der Biomasse gespeicherten Energie bei höherem Brennstoffumsatz, eine erhöhte chemische Energie des Brenngases und letztlich bezogen auf den Gesamtprozess die Erhöhung der Stromausbeute bezweckt. Auch kann aus kinetischer Sicht die Baugröße des Reaktors bei gleichbleibender Leistung reduziert werden [8].

Mit Hilfe der Vorwärmung des Vergasungsmittels, die nach dem Stand der Technik bei den Anlagen in der Regel eingesetzt wird, können folglich höhere Prozesswirkungsgrade erreicht werden. Eine definierte bzw. regulierbare Vorwärmung des Vergasungsmittels ist jedoch nicht Stand der Technik.

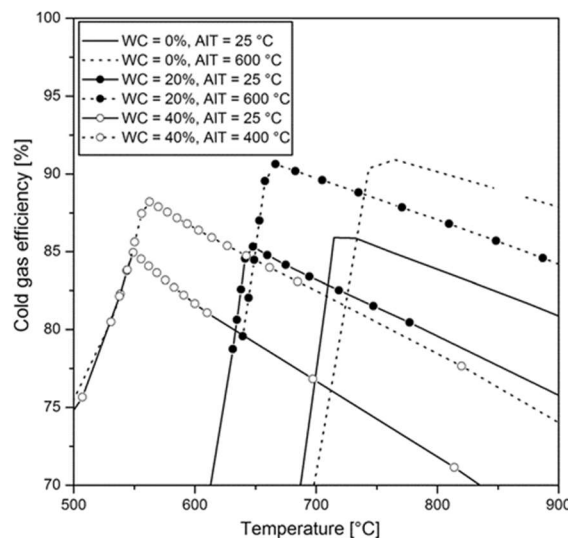


Abb. 2-36 Kaltgaswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Vergasungslufttemperaturen [8]

WC: Wassergehalt Brennstoff, AIT: Temperatur Vergasungsmittel

Bei weiteren Untersuchungen wurde der Massenstrom des Vergasungsmittels variiert und damit eine Änderung des Luftverhältnisses erreicht, mit entsprechender Auswirkung auf Prozessgüte und Produktgaszusammensetzung [31], [32]. Jedoch beziehen sich diese Variationen meist auf Laborversuchsstände ohne nachgeschaltete Gasnutzung wie z.B. einer motorischen Gasverbrennung (hier i.d.R. freie Verbrennung in Gasfackel). Demzufolge bestehen bei diesen Untersuchungen des Vergasungsprozesses keine Einflüsse durch die nachfolgende Gasnutzung. Im Unterschied dazu wird im Rahmen der hier beschriebenen Vergasungsversuche eine marktübliche Biomassevergasungsanlage mit BHKW eingesetzt und die Variationsauswirkungen erfasst. Motivation dieser Parametervariationen ist sowohl die weitere Optimierung der thermochemischen Umsetzungsreaktionen mit dem Ziel die Effizienz zu steigern als auch nachfolgend die schrittweise Anpassung der Vergasungsparameter auf die Eigenschaften alternativer Brennstoffe.

Materialien und Methoden

Für die Durchführung der Vergasungsversuche wurde im Rahmen des TCV folgende Anlage eingesetzt:

- Biomassevergasungsanlage (Festbett-Gleichstrom) mit BHKW der Fa. Spanner Re² GmbH (30 kW elektr. Nennleistung; 70 kW therm. Nennleistung)

Bezüglich der Anlagenbeschreibung wird auf die vorhandene umfangreiche Dokumentation verwiesen [5].

Für die definierte Erwärmung des Vergasungsmittels wurde die Reaktorzuführung des Vergasungsmittels Luft umgebaut und ein elektrischer Lufterhitzer (Typ 10000 DF-R HT, LEISTER) integriert (vgl. Abb. 2-37), der mit einer maximalen Leistung in Höhe von $P_{el} = 15 \text{ kW}$ unter standardisierten Bedingungen Lufttemperaturen bis zu $T = 900 \text{ °C}$ generieren kann. Außerdem erfolgte die Installation einer pneumatisch angetriebenen Gasdrosselklappe, die bei Anlagenstörung automatisch schließt und damit die Gasrückströmung aus dem Reaktor bis zum Lufterhitzer verhindert. Folglich wird somit der Kontakt zwischen der evtl. noch glühenden Innenkeramik des Lufterhitzers (LuVo) mit dem Produktgas unterbunden.

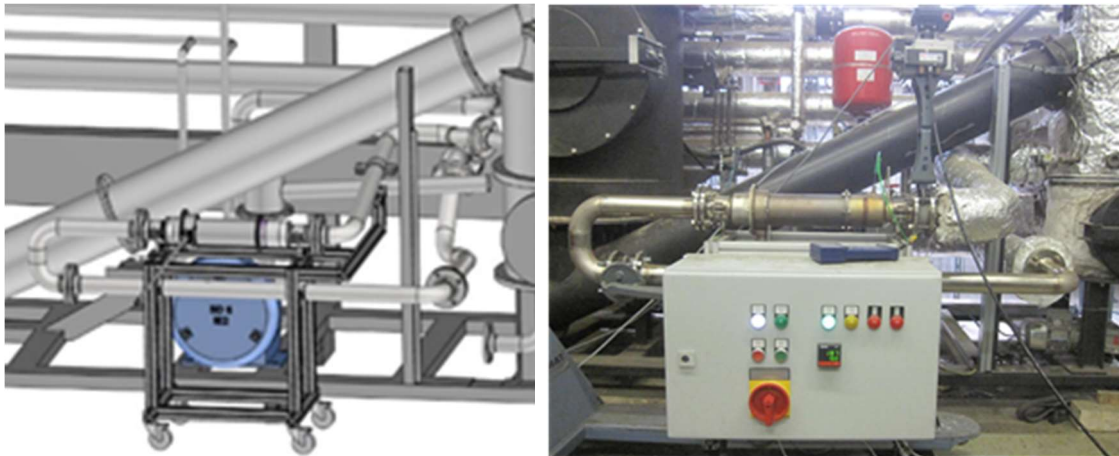


Abb. 2-37 Integration des Lufterhitzers in die Vergasungsmittelzuführung zum Reaktor

- Brennstoff

Als Brennstoff wurden Nadelholz-Holzhackschnitzel (HHS) aus Stamm- und Waldrestholz einer Charge eingesetzt (Qualität P31S nach DIN EN ISO 17225-4). Diese wurden versuchsbegleitend auf einen konstanten Wassergehalt technisch getrocknet.

- Messtechnische Ausstattung

Hinsichtlich der im TCV eingesetzten Messtechnik (Brennstoffbedarf, Temperaturen, Produktgasmenge und -zusammensetzung, Anlagenleistung, Datenerfassung etc.) wird ebenfalls auf die vorhandene Dokumentation verwiesen [5]. Darüber hinaus wurde für die Messfahrten (MF) zur redundanten Erfassung der Produktgaszusammensetzung ein Mikro-Gaschromatograph (I-Graph XSII, I-GRAPHX GmbH) und zur Erfassung der Motorabgaszusammensetzung ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) (DX4000, Ansyco GmbH) eingesetzt.

Einen Überblick der identifizierten Stoffströme und deren für eine Bewertung erfassten Eigenschaften zeigt Tab. 2-21. Die hierfür zur Verfügung stehenden Mess- und Probenahmestellen sind in Abb. 2-38 ersichtlich.

Tab. 2-21 Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme

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

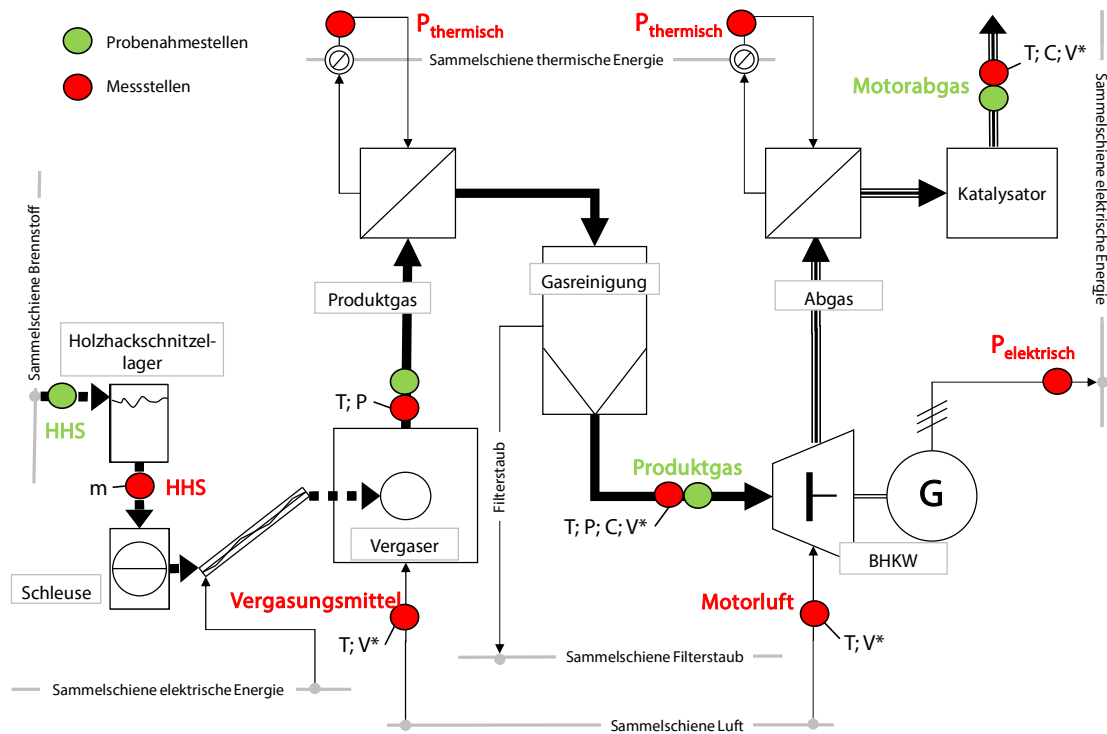


Abb. 2-38 Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der Messfahrten

- Vorgehensweise

Die in dem Bericht beschriebenen Versuche wurden wie folgt in Versuchsabschnitte unterteilt:

- **Versuchsabschnitt 0** (Messfahrtbezeichnung LuVo 0-x):
Testeinsatz Luftherhitzer (Sicherheitsüberprüfung, Ansteuerung, Parameterveränderung)
- **Versuchsabschnitt 1** (Messfahrtbezeichnung LuVo 1-x):
Testeinsatz Luftherhitzer und Abfahren verschiedener Temperaturrampen in kurzen Zeiträumen
- **Versuchsabschnitt 2** (Messfahrtbezeichnung LuVo 2-x):
Einsatz Luftherhitzer und Abfahren von 3 definierten Temperaturbereichen des Vergasungsmittels Luft über einen längeren Zeitraum

In der nachfolgenden Tab. 2-22 sind die durchgeführten Versuchsfahrten mit Zuordnung zu den Versuchsabschnitten dargestellt.

Tab. 2-22 Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

Versuchsabschnitt	Versuchsbezeichnung	Versuchsziel	Startzeit	Endzeit	Versuchsdauer Gesamt
<i>Einheit</i>			<i>h:min</i>	<i>h:min</i>	<i>h</i>
(0)	LuVo 0-1	Testeinsatz Lufterhitzer, Sicherheitsprüfung (Gasrückschlagklappe, Temp.-überwachung)	09:38	15:04	5,4
	LuVo 0-2		10:00	17:38	7,6
(1)	LuVo 1-1	Auswahl geeigneter Temp.-bereiche für Vergasungsmittel, Vorbewertung der Prozessauswirkungen mit Hilfe von Kennzahlen	09:34	16:40	7,1
	LuVo 1-2		09:34	17:05	8,5
	LuVo 1-3		09:30	17:00	8,5
(2)	LuVo 2-1	Durchführung der Variation in 3 Temp.-bereichen, abschließende Bewertung	08:45	23:32	15,3
	LuVo 2-2		08:40	0:10	15,7

Die Funktionskontrolle sowohl des LuVo inkl. seiner Kontrollmesstechnik als auch der Gasdrosselklappe wurde während der zwei Versuche in Abschnitt 0 vorgenommen. Dies beinhaltete die Ansteuerungsautomatik, die Luftstromüberwachung, die Temperaturüberwachung und -regelung sowie eine allgemeine Kontrolle der einzusetzenden Messtechnik.

Im Rahmen des Versuchsabschnittes 1 und der Messfahrten LuVo 1-1 bis 1-3 wurde mithilfe des Lufterhitzers das Vergasungsmittel Luft in 30 min-Intervallen auf verschiedene Temperaturen erhitzt und anschließend die Prozessauswirkungen erfasst und bewertet. Dieser Versuchsabschnitt diente folglich der Auswahl geeigneter Temperaturbereiche des Vergasungsmittels für die Variation und möglicher Bewertungsparameter und Stoffstromverhältnisse.

Anschließend wurden im Versuchsabschnitt 2 im stationären Anlagenzustand die aus Abschnitt 1 abgeleiteten Reaktoreintrittstemperaturen des Vergasungsmittel Luft mit Hilfe des elektrischen Lufterhitzers eingestellt und für einen definierten Zeitraum beibehalten. Die drei Eintrittstemperaturen ergaben sich zum einen aus dem Betrieb ohne Lufterhitzer (Phase 1) sowie aus den manuell vorgegebenen Lufterhitzer-Solltemperaturen 450 °C (Phase 2) und 650 °C (Phase 3). Diese Temperaturen basieren auf den Erfahrungen der Vorversuche im Versuchsabschnitt 1.

Tab. 2-23 Reaktoreintrittstemperaturen des Vergasungsmittel Luft in den Versuchsphasen

Bezeichnung	Lufterhitzer-Solltemperatur in °C	Eintrittstemperatur Vergasungsmittel in °C
Phase 1	kein Lufterhitzerbetrieb	181
Phase 2	450	400
Phase 3	650	579

Die Messfahrten LuVo 2-1 und LuVo 2-2 dienten somit zur Ermittlung von Kennzahlen für die jeweilige Versuchsphase und entsprechend der Prozessbewertung bei Einsatz unterschiedlicher Vergasungsmitteltemperaturen. Zu beachten ist, dass während der Messfahrt LuVo 2-1 kein konstanter Wassergehalt des Brennstoffes gewährleistet werden konnte. Somit erfolgt die in diesem Bericht aufgeführte abschließende Bewertung ausschließlich auf Basis der Daten aus Messfahrt LuVo 2-2.

Die Datenerfassung erfolgte über die eingesetzte Messtechnik jeweils mit unterschiedlichem Intervall zur Datenspeicherung. Die voneinander abweichenden Datenraten wurden im Nachgang miteinander abgeglichen. Hierbei wurde eine einheitliche Datenrate von 1 Wert aller 10 Sekunden umgesetzt. Die Datenauswertung wurde nur für den stationären Zustand vorgenommen, welcher durch den Temperaturverlauf des Vergasungsmittels Luft nach der internen Vorwärmung (vgl. Abb. 2-39) definiert wird. Für den dann gewählten Auswertungszeitraum wurde eine Mittelwertbildung der Messdaten vorgenommen. Darüber hinaus wurde zwischen den Phasen eine Einlaufzeit von ca. 40 min berücksichtigt, für die keine Datenauswertung erfolgte. Im Anschluss an die jeweilige Messfahrt bzw. Versuchsphase wurde die Anfallmenge des Filterstaubes abgewogen und daraus Proben für Laboranalysen entnommen.

Zur Protokollierung der Versuche wurden alle aktuellen Messdaten (Brennstoffbedarf, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Produktgasanalyse etc.) erfasst und in einer Versuchsdatenbank gespeichert. Für die Versuchsauswertung werden, wie zuvor beschrieben, nur die Daten während des stationären Anlagenzustandes verwendet. Außerdem wurden evtl. aufgetretene Anlagenstörungen, durchgeführte Probenahmen u.ä. im Logbuch protokolliert. Während der Versuchsfahrten wurden mehrere Brennstoffproben direkt aus der Gesamtbrennstoffmasse entnommen, um diese anschließend im Brennstofflabor zu analysieren.

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

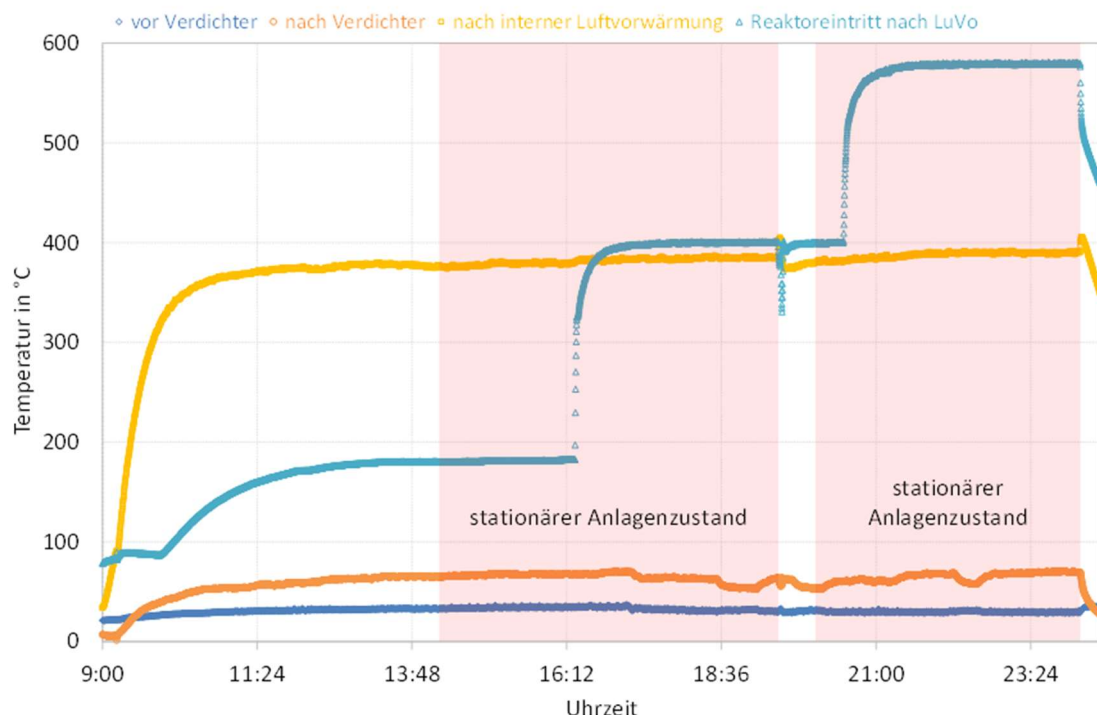


Abb. 2-39 Grafische Darstellung des Verlaufes der Vergasungsmitteltemperaturen an unterschiedlichen Betriebsstellen und des stationären Zustandes in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur nach der internen Luftvorwärmung

Laboranalysen

- Analysenmethoden zur Bestimmung

Für das Probenmaterial wurden folgende Analysen unter Beachtung der im Kapitel Brennstoffvariationen aufgeführten Normen angewendet. Zum einen wurde der Gesamtwassergehalt des Brennstoffes nach DIN EN 14774-2 ermittelt und zum anderen für alle Proben sowohl die Immediatzusammensetzung, der Brennwert sowie die Elementarzusammensetzung (CHNS(O)) bestimmt. Alle Analysedaten der jeweiligen Probe wurden bezüglich ihrer Abweichung zueinander bewertet.

- Probenmaterial

Als Standardbrennstoff wurden HHS aus Stamm- und Waldrestholz (Kiefer, P31S nach DIN EN ISO 17225-4) einer Charge verwendet. Die jeweilige Probenahme erfolgte manuell aus dem Brennstoffstrom zwischen Trockner und Vorlagebehälter der Vergasungsanlage in einem zeitlichen Abstand von ca. 1 h. Die Proben des Filterstaubes wurden nach jeder Versuchsphase in jeweils identischer Art und Weise aus dem Sammelbehälter nach dessen Wägung entnommen. Zu beachten ist hierbei, dass der Zeitverzug zwischen Filterstaubanfall im Reaktor und Filterstaubaustrag in den Sammelbehälter nicht definiert werden kann und somit bei der Probenahme unberücksichtigt blieb.

- Ergebnisse der Laboranalysen

Die Ergebnisse der Immediat-, Brennwert- und Elementaranalysen des bei den Versuchsphasen der Messfahrt LuVo 2-2 eingesetzten Brennstoffes und der Filterstaubproben sind nachfolgend, bezogen auf den wasserfreien Zustand, in Tab. 2-24 zusammengestellt.

Tab. 2-24 Ergebnisse der Immediat-, Brennwert- und Elementaranalyse der Brennstoff- und Filterstaubproben, Messfahrt LuVo 2-2

Parameter	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3
		Brennstoff		
Gesamtwassergehalt	Ma.-%	2,6	3,2	3,2
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% TS	82,8		
Fixer Kohlenstoff	Ma.-% TS	16,8		
Aschegehalt	Ma.-% TS	0,44		
Kohlenstoff	Ma.-% TS	50,26		
Wasserstoff	Ma.-% TS	6,32		
Stickstoff	Ma.-% TS	0,01		
Schwefel	Ma.-% TS	0,01		
Sauerstoff*	Ma.-% TS	43,0		
Brennwert	MJ/kg TS	20,24		
		Filterstaub		
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% TS	12,1	12,2	12,9
Fixer Kohlenstoff	Ma.-% TS	67,9	68,4	68,6
Aschegehalt	Ma.-% TS	20,02	19,37	18,53
Kohlenstoff	Ma.-% TS	77,29	77,53	78,47
Wasserstoff	Ma.-% TS	0,46	0,43	0,46
Stickstoff	Ma.-% TS	0,04	0,04	0,04
Schwefel	Ma.-% TS	0,12	0,10	0,06
Sauerstoff*	Ma.-% TS	2,10	2,50	2,40
Brennwert	MJ/kg TS	27,25	26,43	27,09

* rechnerisch, Rest zu 100%

Datenauswertung der Versuchsphasen

Die in den folgenden Kapiteln aufgeführte Darstellung und Auswertung der Stoffstromdaten bezieht sich ausschließlich auf die abschließende **Messfahrt LuVo 2-2**. Dies beinhaltet die für den Auswertungszeitraum der jeweiligen Versuchsphase gemittelten Messwerte der erfassten Stoffströme (Brennstoff, Vergasungsmittel Luft, Produktgas, Filterstaub).

- Brennstoff

Wie in Tab. 2-25 ersichtlich, wurde für die Versuchsphasen ein nahezu konstanter Brennstoffbedarf von 27,9 kg/h für Phase 1 und Phase 2 sowie 28,4 kg/h für die Phase 3 erfasst. Der Wassergehalt lag dabei ebenfalls konstant bei ca. 3 Ma.-%. Die ermittelten Massenströme beziehen sich ausschließlich auf den jeweiligen Auswertungszeitraum von drei Stunden. Unter Berücksichtigung des ermittelten Heizwertes kann außerdem die chemische Brennstoffleistung (auch Feuerungswärmeleistung) berechnet werden, die aufgrund des leicht gestiegenen Brennstoffmassenstromes in Phase 3 etwas größer als bei den Versuchsphase 1 und 2 ist.

Tab. 2-25 Brennstoffcharakteristika für die Versuchsphasen

Bezeichnung	Auswertungs- zeitraum	Brennstoff- bedarf	Wasser- gehalt	Heizwert	chem. Brennstoff- leistung
<i>Einheit</i>	<i>h</i>	<i>kg/h</i>	<i>Ma.-%</i>	<i>MJ/kg</i>	<i>kW</i>
Phase 1	3,0	27,9	2,6	18,29	141,74
Phase 2	3,0	27,9	3,2	18,17	140,82
Phase 3	3,0	28,4	3,2	18,17	143,36

- Vergasungsmittel Luft / Produktgas

Die Volumenströme des Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Die resultierenden Volumen- und Massenströme der Luft sind zur Übersicht in Tab. 2-26 aufgeführt. Außerdem sind die Eintrittstemperaturen der Luft am Reaktoreintritt enthalten.

Tab. 2-26 Vergasungsmittelcharakteristika der Versuchsphasen

Bezeichnung	Reaktoreintritts- temperatur	Volumenstrom	Massenstrom
<i>Einheit</i>	<i>°C</i>	<i>m³/h (i.N.)</i>	<i>kg/h</i>
Phase 1	181	34,1	43,9
Phase 2	400	34,4	44,3
Phase 3	579	34,1	43,9

In Tab. 2-27 werden die ermittelten Produktgasanteile (in Vol.-%, feucht) als Mittelwerte für den jeweiligen Auswertungszeitraum dargestellt.

Tab. 2-27 Mittlere Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen

Bezeichnung	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂ *	H ₂ O
Einheit	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-% f.	Vol.-%
Phase 1	20,8	14,4	2,3	7,2	0,0	46,6	8,8
Phase 2	22,5	15,5	2,2	6,5	0,0	44,8	8,5
Phase 3	23,2	16,3	2,2	6,4	0,0	43,5	8,5

* rechnerisch, Rest zu 100%

Aufgrund der zuvor dargestellten Produktgaszusammensetzungen ergaben sich beim Vergleich der Produktgasqualität Unterschiede des Heizwertes (vgl. Tab. 2-28). Der Heizwert des Produktgases lag im Auswertungszeitraum der Versuchsphase 1 bei 4,6 MJ/kg, bezüglich Phase 2 bei 5,0 MJ/kg und bei Phase 3 bei 5,5 MJ/kg.

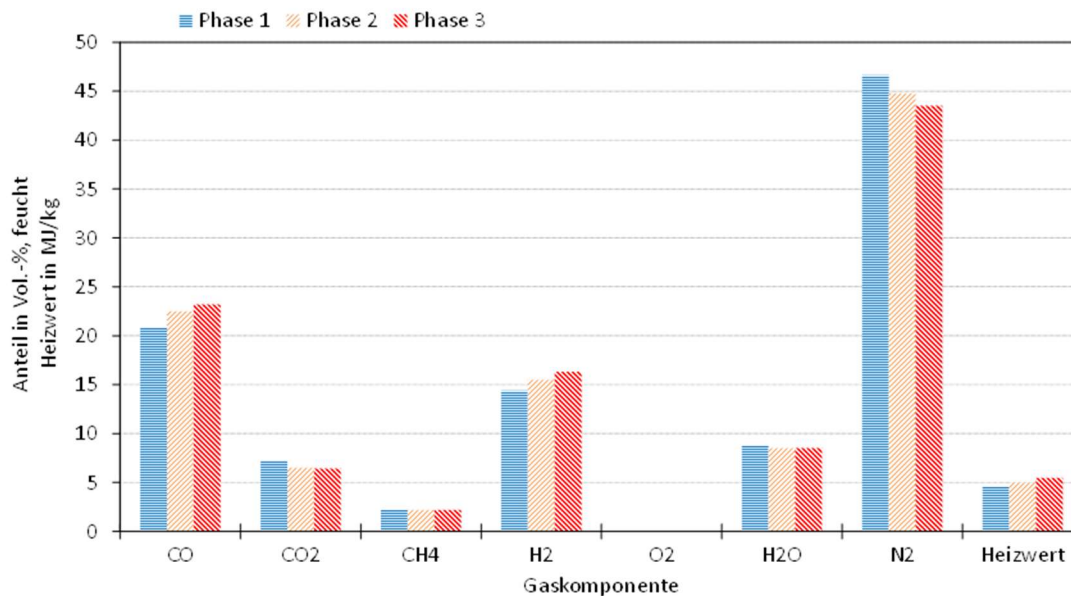


Abb. 2-40 Mittlere Zusammensetzung und entsprechender Heizwert des Produktgases während der Versuchsphasen

Durch die Erfassung der Zusammensetzung und des Massenstromes des Produktgases wurde die Produktgasleistung (entspricht dem chemischen Produktgasenergiestrom) berechnet und diese für die Versuchsphasen miteinander verglichen und in Tab. 2-28 dargestellt. Dabei ist ein tendenziell sinkender Produktgasmassenstrom bei gleichzeitig steigendem Produktgasheizwert zu bemerken, was wiederum zu einer leicht steigenden chemischen Produktgasleistung führt.

Tab. 2-28 Produktgascharakteristika der Versuchsphasen

Bezeichnung	Reaktoraustritts-temperatur	Heizwert		Massenstrom	Chemische Leistung
Einheit	°C	MJ/m ³ (i.N.)	MJ/kg	kg/h	kW
Phase 1	848	5,00	4,62	68,52	87,88
Phase 2	859	5,30	4,97	66,16	91,33
Phase 3	868	5,47	5,17	65,48	94,04

- Filterstaub

Wie in Tab. 2-29 ersichtlich, wurde für Phase 1 ein Filterstaubmassenstrom von 0,53 kg/h berechnet. Bei den Vergasungsmitteltemperaturen der Phase 2 und 3 wurden

dann Filterstaubmassenströme von 0,55 kg/h bzw. 0,53 kg/h ermittelt. Diese ermittelten Massenströme beziehen sich ausschließlich auf den jeweiligen Auswertungszeitraum. Die manuelle Abwägung der entsprechenden Auffangbehälter erfolgte immer im Anschluss an die jeweilige Versuchsphase.

Tab. 2-29 Anfallmenge Filterstaub

Bezeichnung	Auswertungs- zeitraum	Gesamtmenge	Massenstrom
Einheit	h	kg/h	kg/h
Phase 1	3,00	1,59	0,53
Phase 2	4,07	2,25	0,55
Phase 3	3,67	1,96	0,53

- Verlaufsdiagramme

Um die Anlagenfahrweise beispielhaft zu dokumentieren, sind im folgenden Diagramme zur Beschreibung der maßgeblichen Stoffströme über die Laufzeit der drei Versuchsphasen aufgeführt.

Die erfassten Bestandteile des Produktgases und der Verlauf dieser Zusammensetzung sind in Abb. 2-41 aufgeführt. Durch die farblich gekennzeichneten Felder sind die unterschiedlichen Versuchsphasen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass zwischen den Phasen immer erst eine Einlaufzeit von ca. 40 min berücksichtigt wurde, in der keine Datenauswertung erfolgte. Außerdem ist die kurze Anlagenstörung um 19:29-19:33 Uhr erkennbar. Für diesen Zeitraum und die darauffolgenden 30 min erfolgte keine Datenauswertung. Diese startete als zweiter Teil für die Phase 2, erst nachdem die Wiederanfahrphase abgeschlossen war.

Zu erkennen sind über die Versuchsphasen steigende Anteile an CO und H₂ sowie leicht sinkende Anteile an CO₂ und H₂O. Der CH₄-Anteil blieb hingegen relativ konstant.

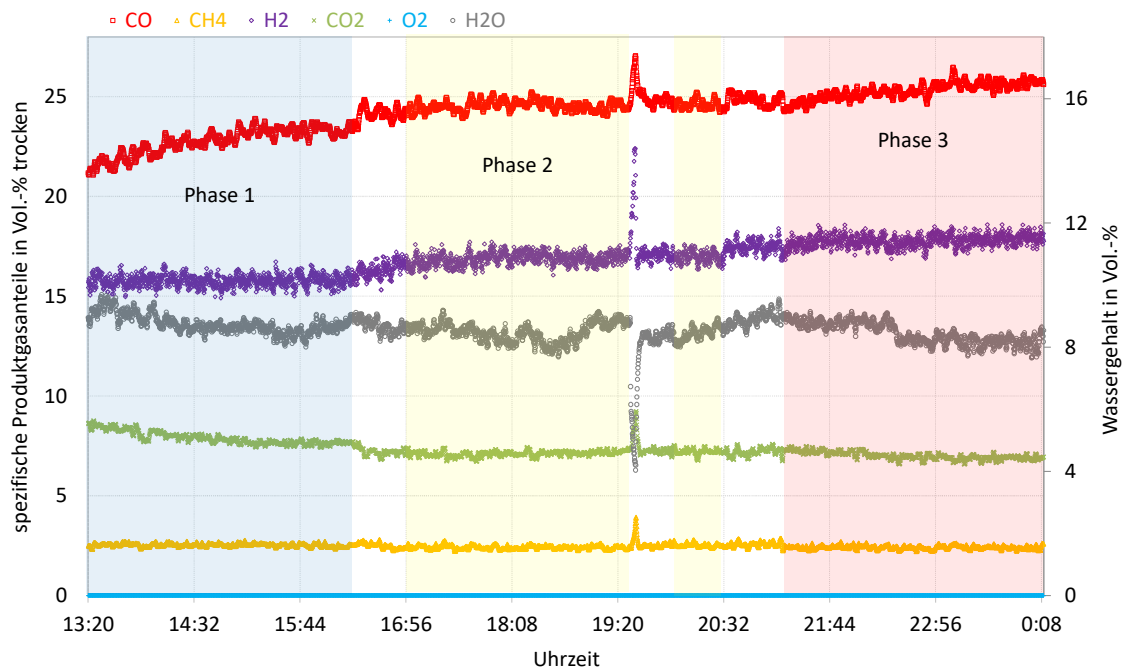


Abb. 2-41 Verlauf der Produktgaszusammensetzung während der Versuchsphasen

Ähnlich wie beim Verlauf der Produktgaszusammensetzung (vgl. Abb. 2-41) sind auch beim Verlauf der Temperaturen des Vergasungsmittels Luft vor und nach dem Seitenkanalverdichter sowie nach der internen Vorwärmung in Abb. 2-42 keine maßgeblichen Änderungen erkennbar. Deutlich erkennbar sind die drei Temperaturbereiche (Phase 1: 181 °C; Phase 2: 400 °C und Phase 3: 579 °C) des Vergasungsmittels am Reaktoreintritt.

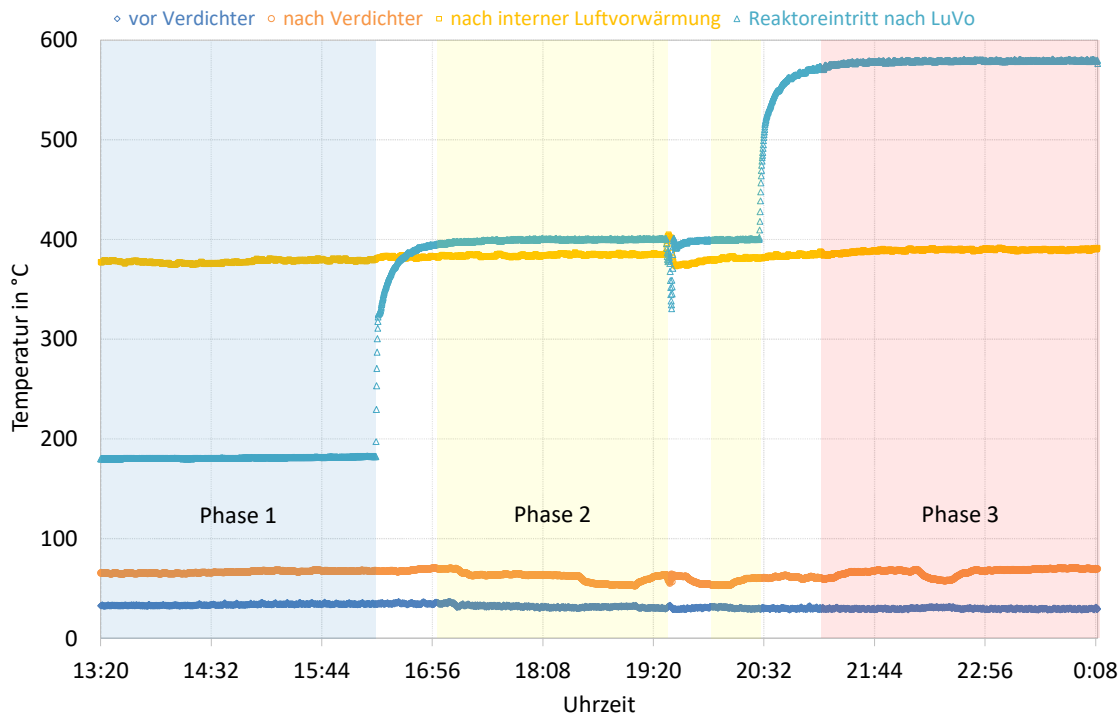


Abb. 2-42 Verlauf der Vergasungsmitteltemperaturen während der Versuchsphasen

In Abb. 2-43 sind die Temperaturverläufe an den Reaktormessstellen dargestellt. Auch hier sind die drei Versuchsphasen anhand der Vergasungsmitteltemperatur deutlich erkennbar. Die Auswirkung der gestiegenen Eintrittstemperatur auf die Wandtemperatur des Reaktors sind ebenfalls sichtbar. So stieg die mittlere Wandtemperatur von 472 °C bis auf 597 °C, wobei außerdem eine deutlich größere Spreizung der maximalen und minimalen Wandtemperaturen im Vergleich von Versuchsphase 1 zu Phase 2 und vor allem zu Phase 3 auffällt. Die Austrittstemperatur des Produktgases wurde von der Temperaturvariation ebenfalls beeinflusst und steigt von 848 °C bis auf 868 °C.

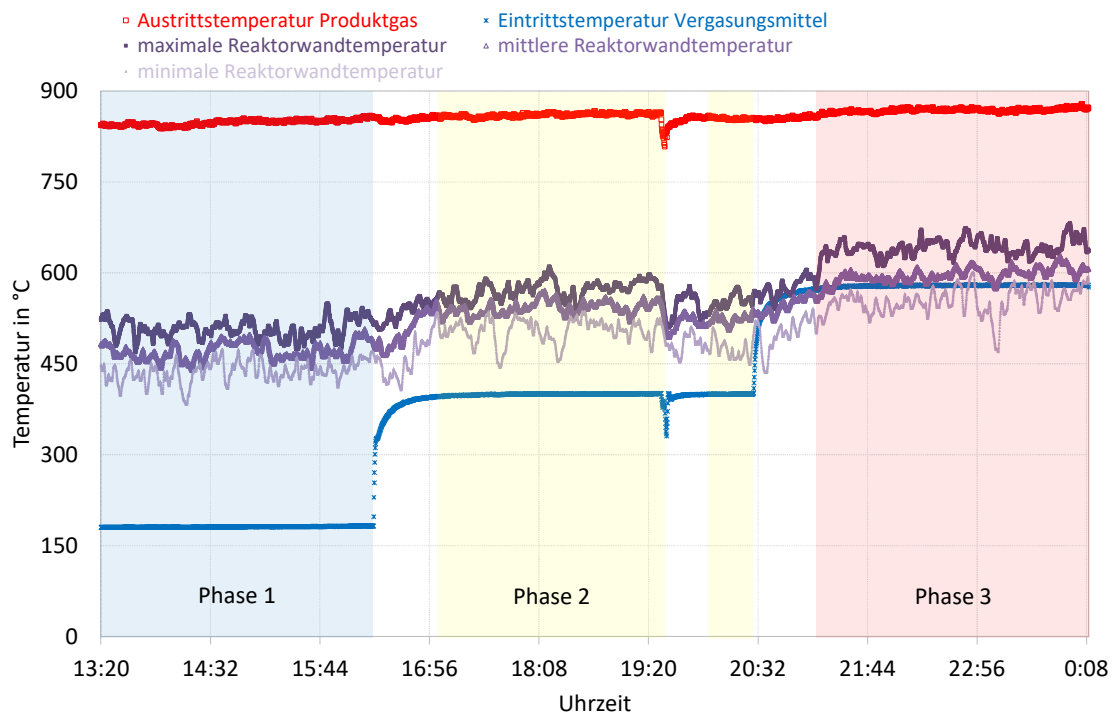


Abb. 2-43 Verlauf der Temperaturen (Vergasungsmittel Reaktoreintritt, Reaktorwandtemperatur, Produktgas Reaktorausritt)

In Abb. 2-44 sind die Verläufe der Betriebsvolumenströme des Vergasungsmittel und des Produktgases aufgeführt. Zu erkennen ist der über die Versuchsphasen tendenziell leicht sinkende Produktgas-Volumenstrom und der mit einer relativ großen Schwankungsbreite verbundene Volumenstrom des Vergasungsmittels. Außerdem gut zu erkennen ist der kurze Anlagenausfall gegen 19:29 Uhr.

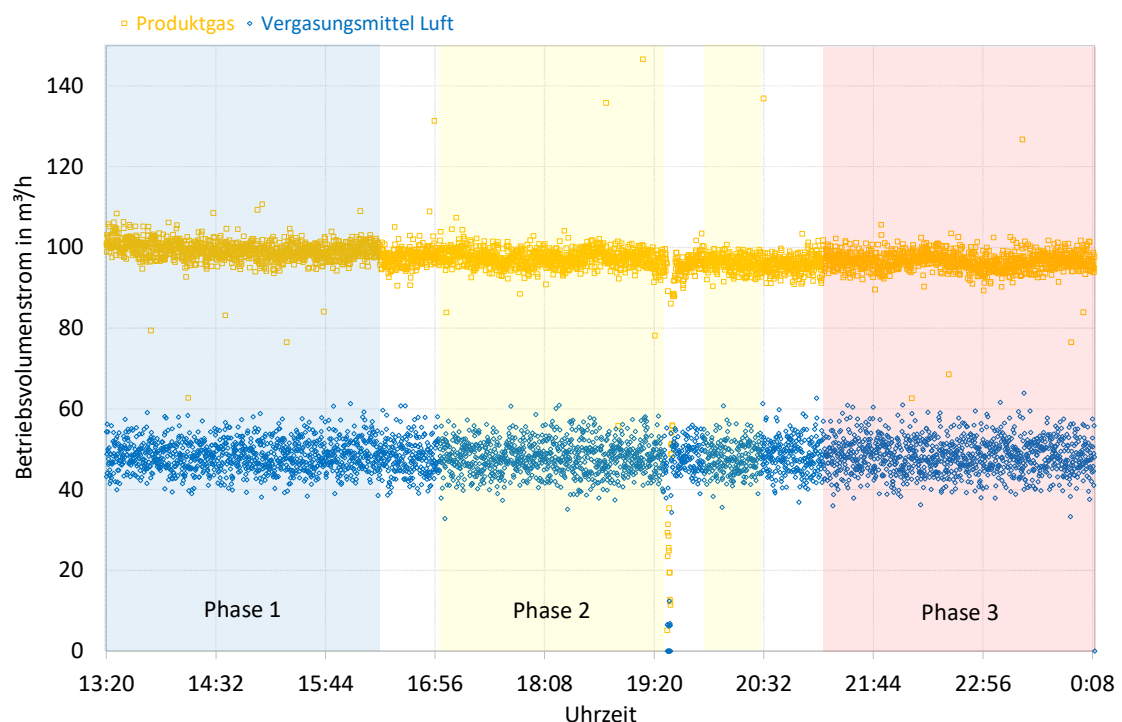


Abb. 2-44 Verlauf der Volumenströme von Vergasungsmittel und Produktgas während der Versuchsphasen

Die erfassten Absolutdrücke und daraus berechneten Differenzdrücke in der Produktgasleitung über Reaktor und Gasfilter sind in Abb. 2-45 enthalten. Außerdem wird hier die elektrische Leistung des BHKW dargestellt, deren negatives Vorzeichen nur die aus Bilanzsicht abgegebene Leistung darstellt.

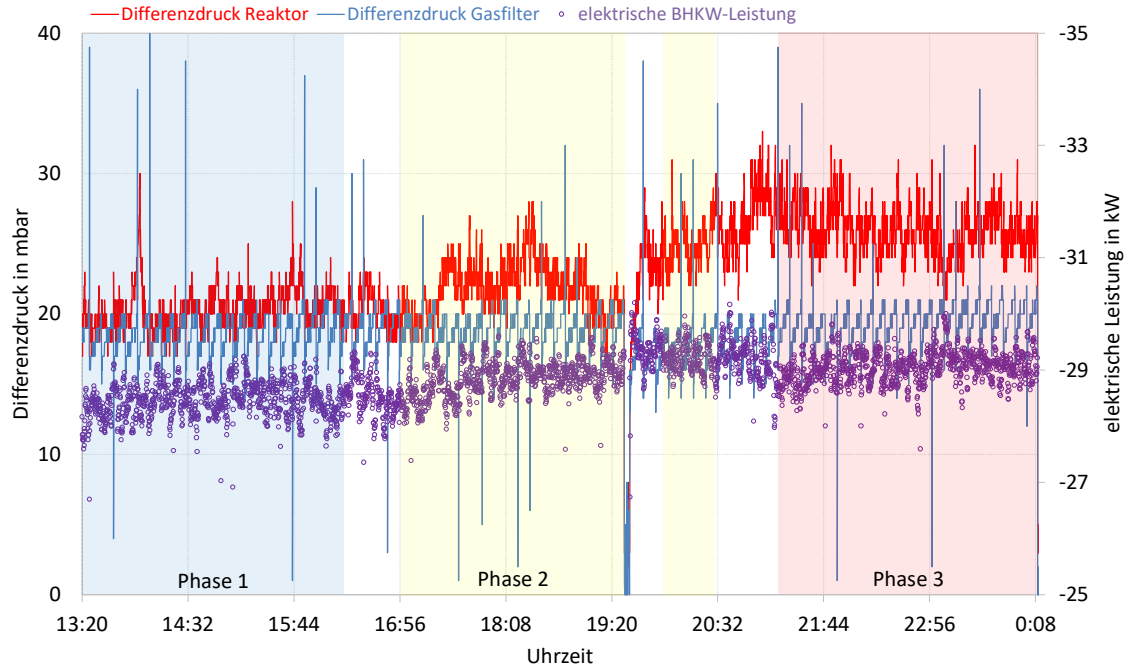


Abb. 2-45 Verlauf der Differenzdrücke über Reaktor und Gasfilter sowie elektrische Leistung des BHKW während der Versuchsphasen

- Profil der vertikalen Festbetttemperatur im Reaktor

Analog zur Darstellung wie in [18], wurde das Temperaturprofil im Reaktor aufgenommen. Für die Messung der Festbetttemperatur im Reaktor wurde dabei ein 1000 mm Thermoelement Typ N (Mantelthermoelement, Durchmesser 4,5 mm) verwendet und händisch von oben in den Reaktor eingeführt. Das Thermoelement wurde dabei vertikal in Schritten von je einer Minute jeweils einen Zentimeter nach unten bewegt. Die Messungen erfolgten während der drei Versuchsphasen jeweils im stationären Anlagenzustand. Dabei konnte für die Versuchsphase 3 keine Messung der Festbetttemperatur durchgeführt werden, da während dieser das Thermoelement ausfiel und ein Wechsel während des Anlagenbetriebes nicht möglich ist.

Die Darstellung des Temperaturverlaufes innerhalb des Festbettes im Reaktor ist in Abb. 2-46 aufgeführt und dabei zusätzlich die Reaktorgeometrie so dargestellt, dass sie zu der im Diagramm angegebenen Skalierung passt und der Temperaturverlauf der jeweiligen Position im Reaktor zugeordnet werden kann. Im Reaktorfreiraum oberhalb der Brennstoffschüttung lagen die Temperaturen konstant bei ca. 100 °C. Ab Schichthöhe 25 cm steigen die Temperaturen auf über 1000 °C bei Schichthöhe 15 cm an. Die Temperaturpeaks liegen bei beiden Messungen identisch bei 14 cm Schichthöhe über dem Reaktorrost, damit knapp unterhalb der Luftdüsen und betrugen 1088 °C für Phase 1 und 1354 °C für Phase 2. Beim Vergleich der Phasen sind vor allem die Temperaturunterschiede in der heißen Zone des Festbettes ersichtlich (Oxidationszone), wohingegen die Temperaturen oberhalb (Trocknungs- und Pyrolysezone) und unterhalb (Reduktionszone) ähnlich sind. Die mittlere Festbetttemperatur in der Schichthöhe von 8 bis 18 cm, und damit in der heißen Zone des Festbettes, lag bei 927 °C für Phase 1 und 1074 °C für Phase 2.

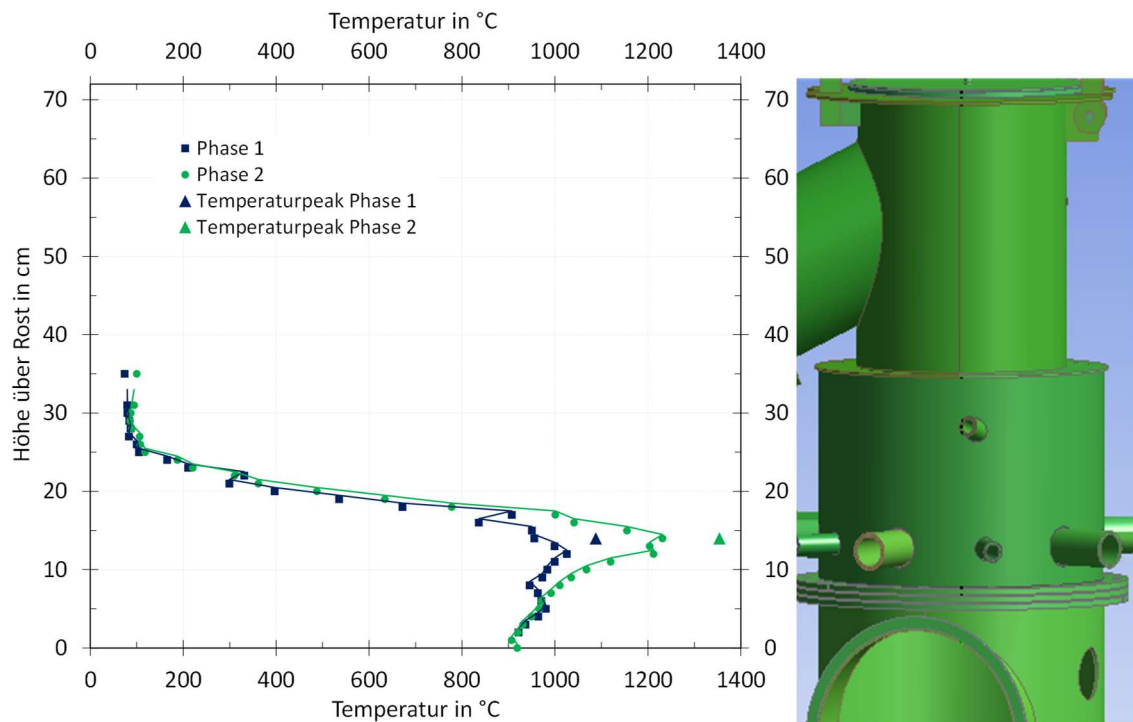


Abb. 2-46 Profil der vertikalen Festbetttemperatur während der Versuchsphasen 1 und 2 mit Darstellung der Reaktorgeometrie

- Vergleichende Darstellung der Messdaten

In Tab. 2-30 sind die für eine Bilanzierung notwendigen Messdaten, die daraus berechneten weiteren Versuchsparameter sowie die den Versuchsphasen zuzuordnenden Ergebnisse der Laboranalysen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 2-30 Versuchsdatenauszug für die jeweilige Versuchsphase

Parameter	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Einheit	Datenherkunft
Brennstoff					
Massenstrom	27,9	27,9	28,4	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	18,3	18,2	18,2	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Wassergehalt	2,6	3,2	3,2	Ma.-%	Laboranalyse
Aschegehalt	0,4	0,4	0,4	Ma.-% TS	Laboranalyse
Vergasungsmittel Luft					
Massenstrom	43,9	44,3	43,9	kg/h	Messung/Berechnung
Temperatur (Reaktoreintritt)	181	400	579	°C	Messung
Thermische Energie (Reaktoreintritt)	1,9	4,7	6,8	kW	Berechnung
Produktgas					
Massenstrom	68,5	66,2	65,5	kg/h	Berechnung
Temperatur (Reaktoraustritt)	848	859	868	°C	Messung
Thermische Energie (Reaktoraustritt)	21,0	20,7	20,9	kW	Berechnung
Zusammensetzung					
O ₂	0,0	0,0	0,0	tr.	Messung
CO	22,8	24,6	25,3	Vol.-%	Messung
CO ₂	7,9	7,1	7,0		Messung
CH ₄	2,5	2,4	2,4		Messung
H ₂	15,8	16,9	17,8		Messung
N ₂	51,0	49,0	47,5	alle	Berechnung
H ₂ O	8,8	8,5	8,5	Vol.-%	Messung
Heizwert	4,6	5,0	5,2	MJ/kg	Berechnung
Filterstaub					
Massenstrom	0,53	0,55	0,53	kg/h	Messung/Berechnung
Heizwert	26,3	25,7	26,1	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Aschegehalt	20,1	19,3	18,5	Ma.-% TS	Laboranalyse

- Stoff- und Energiestrombilanzierung

Für die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme um den Reaktor wurden die Daten für die jeweilige Versuchsphase erfasst und diese über den Zeitraum gemittelt (vgl. Tab. 2-30). Es wurden, wie in Abb. 2-47 dargestellt, die jeweiligen Stoffmassenströme am Ein- und Austritt des Reaktors ermittelt. Für Produktgas und Filterstaub war der Gasfilteraustritt die maßgebliche Bilanzgrenze. Die bilanziellen Abweichungen zwischen den insgesamt zugeführten und abgeführten Stoffströmen wurden als absolute und als relative Werte, die sich auf den summarischen Massenstrom am Eintritt beziehen, berechnet. Die Abweichung der Bilanz wird absolut und relativ angegeben, wobei die eintretenden Stoffströme ein positives und die austretenden Stoffströme ein negatives Vorzeichen besitzen. Entsprechend weist eine positive Bilanzabweichung auf eine im Vergleich größere Inputsumme und eine negative Bilanzabweichung auf eine im Vergleich größere Outputsumme hin. Unter Berücksichtigung dieser Abweichungen kann schließlich eine Bewertung der Messdatenerfassung und -auswertung erfolgen und eventuelle Unsicherheiten detektiert werden.

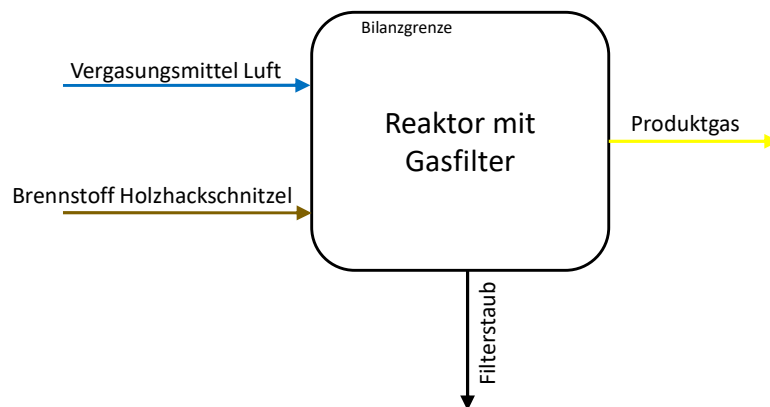


Abb. 2-47 Bilanzraum zur Bewertung der Versuche

In Tab. 2-31 sind die Stoffstrombilanzen der Versuchsphasen um den Bilanzraum aufgestellt. Bezüglich der Abweichungen der Stoffstrombilanzen ist erkennbar, dass Abweichungen der einzelnen Elementbilanzen von -9 bis 89 % auftreten. So wies die Schwefelbilanz einen großen Fehler von 77, 80 bzw. 89 % auf, was mit der Nichterfassung schwefelhaltiger Verbindungen im Produktgas erklärt werden kann. Zu beachten ist dabei außerdem, dass die absoluten Schwefelmengen im Vergleich zu den anderen Stoffströmen sehr gering sind. Die Abweichung der Aschebilanz von 14, 12 bzw. 20 % weist auf eine Ungenauigkeit am Sammelbehälter des Filterstaubes oder auf eine Ansammlung des Filterstaubes innerhalb der Anlage (z.B. Gewebefilter, Transport- und Übergabesystem) für den Zeitraum der Versuchsphasen hin. Diese Abweichung hat ebenfalls Auswirkung auf die Kohlenstoffbilanz, da der Kohlenstoff den massebezogenen Hauptanteil am Filterstaub darstellt und ebenfalls eine positive Bilanzabweichung von 21 bis 22 % aufweist. Maßgebliche Unterschiede in den anderen Stoffbilanzen der jeweiligen Versuchsphase sind bis auf die Aschebilanz nicht auszumachen. So liegen deren Abweichungen zwischen -9 und 14 %. Somit können unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aufgrund von Probenahme, Laboranalyse etc. die ermittelten Stoffwerte als belastbar eingeschätzt werden. Auch die Gesamtmassebilanz weist bei allen Versuchsphasen eine Abweichung von <10 % auf und wird daher ebenfalls als belastbar eingeschätzt.

In Tab. 2-32 sind die Energiestrombilanzen um den Bilanzraum aufgestellt. Es ist erkennbar, dass eine Abweichung der Energiebilanz von absolut 31, 30 und 31 kW bzw. relativ 22, 20 und 21% ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum eintretenden Energiestrom ein um 20 bis 22% niedrigerer Energiestrom den Reaktor verlässt. Da die im Bilanzraum auftretenden Oberflächenwärmeverluste an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion bilanztechnisch nur eingeschränkt erfasst werden können, bilden diese vermutlich den hauptsächlichen Anteil am Bilanzfehler der jeweiligen Messfahrt.

Bei der Energiestrombilanz sind keine maßgeblichen Unterschiede beim Vergleich der Versuchsphasen untereinander festzustellen. Somit können die Auswertungen der Betriebsvariation in den Versuchsphasen vorgenommen werden.

Tab. 2-31 Daten der Stoffstrombilanzen für die Versuchsphasen in kg/h

Stoffströme	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Filterstaub	Produktgas	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Phase 1						
Kohlenstoff	13,65	0,00	-0,40	-10,27	2,99	22%
Wasserstoff	1,80	0,00	0,00	-1,58	0,21	12%
Sauerstoff	12,31	10,23	-0,02	-19,84	2,68	12%
Stickstoff	0,00	33,68	0,00	-36,83	-3,14	-9%
Schwefel	0,003	0,00	-0,001	0,00	0,002	77%
Asche	0,12	0,00	-0,10	0,00	0,02	14%
Gesamtmasse	27,89	43,91	-0,53	-68,52	2,75	4%
Phase 2						
Kohlenstoff	13,58	0,00	-0,42	-10,38	2,78	21%
Wasserstoff	1,81	0,00	0,00	-1,58	0,22	12%
Sauerstoff	12,40	10,31	-0,03	-19,46	3,22	14%
Stickstoff	0,00	33,95	0,00	-34,74	-0,78	-2%
Schwefel	0,003	0,00	-0,001	0,00	0,002	80%
Asche	0,12	0,00	-0,10	0,00	0,01	12%
Gesamtmasse	27,91	44,26	-0,55	-66,17	5,45	8%
Phase 3						
Kohlenstoff	13,82	0,00	-0,41	-10,55	2,87	21%
Wasserstoff	1,84	0,00	0,00	-1,62	0,21	12%
Sauerstoff	12,62	10,22	-0,02	-19,64	3,17	14%
Stickstoff	0,00	33,65	0,00	-33,67	-0,02	0%
Schwefel	0,003	0,00	-0,000	0,00	0,002	89%
Asche	0,12	0,00	-0,10	-0,00	0,02	20%
Gesamtmasse	28,41	43,86	-0,53	-65,48	6,26	9%

Tab. 2-32 Daten der Energiestrombilanzen für die Versuchsphasen in kW

Energieströme	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Filterstaub	Produktgas	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Phase 1						
Chemisch	141,74	0,00	-3,87	-87,88		
Thermisch	0,00	1,93	0,00	-20,95		
Energiebilanz	141,74	1,93	-3,87	-108,84	30,96	22%
Phase 2						
Chemisch	140,82	0,00	-3,94	-91,33		
Thermisch	0,00	4,66	0,00	-20,72		
Energiebilanz	140,82	4,66	-3,94	-112,05	29,49	20%
Phase 3						
Chemisch	143,36	0,00	-3,88	-94,04		
Thermisch	0,00	6,83	0,00	-20,89		
Energiebilanz	143,36	6,83	-3,88	-114,92	31,39	21%

Bewertung der Temperaturvariationen

- Vergleich der Auswirkungen

In Abb. 2-48 sind zum Vergleich u.a. die in Tab. 2-30 dargestellten Mess- und Versuchsdaten der jeweiligen Versuchsphase dargestellt. Um eine gemeinsame Darstellung der Werte in den Diagrammen zu ermöglichen, wurden für die Darstellung der Produktgasheizwert sowie der Massenstrom des Filterstaubes mit dem Faktor 10 multipliziert.

Ersichtlich sind mit steigender Vergasungsmitteltemperatur folgende Tendenzen:

- Sinkender Produktgasmassenstrom
- Steigender Anteil von CO und H₂ im Produktgas und damit steigender Heizwert
- Steigende mittlere Reaktorwandtemperatur
- Steigende Temperatur in der Oxidationszone des Reaktorbettes (Auswertung hier nur für Phase 1 und 2)
- Steigende Produktgastemperatur am Reaktoraustritt

Bei den anderen im Diagramm aufgeführten Parametern sind keine Tendenzen ersichtlich. Die Massenströme von Brennstoff, Vergasungsmittel und Filterstaub, der chemische Energiestrom des Filterstaubes und die elektrische Leistung des BHKW sind bei dem Vergleich der 3 Eintrittstemperaturen des Vergasungsmittels nahezu identisch.

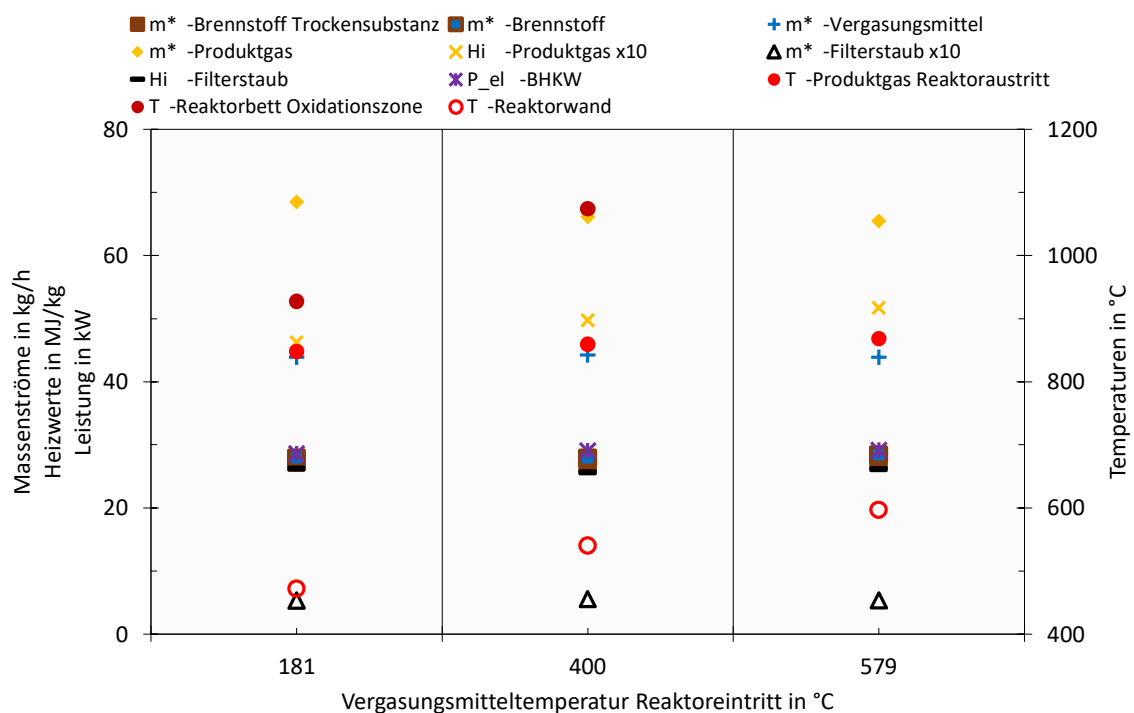


Abb. 2-48 Vergleichende Darstellung von Mess- und Versuchsdaten in Abhängigkeit der Vergasungsmitteltemperatur

Um darzustellen wie stark die Anteile von CO und H₂ im Produktgas steigen, werden im folgenden Diagramm (Abb. 2-49) die wichtigsten Gasanteile und deren Mittelwert mit der Schwankungsbreite zwischen minimalen und maximalen Wert für die jeweilige Versuchsphase aufgeführt. Ersichtlich ist dabei der Anstieg von CO um absolut 2,6 Vol.-% tr. und von H₂ um absolut 1,9 Vol.-% tr., was einen relativen Anstieg von 11% für beide Gase bedeutet.

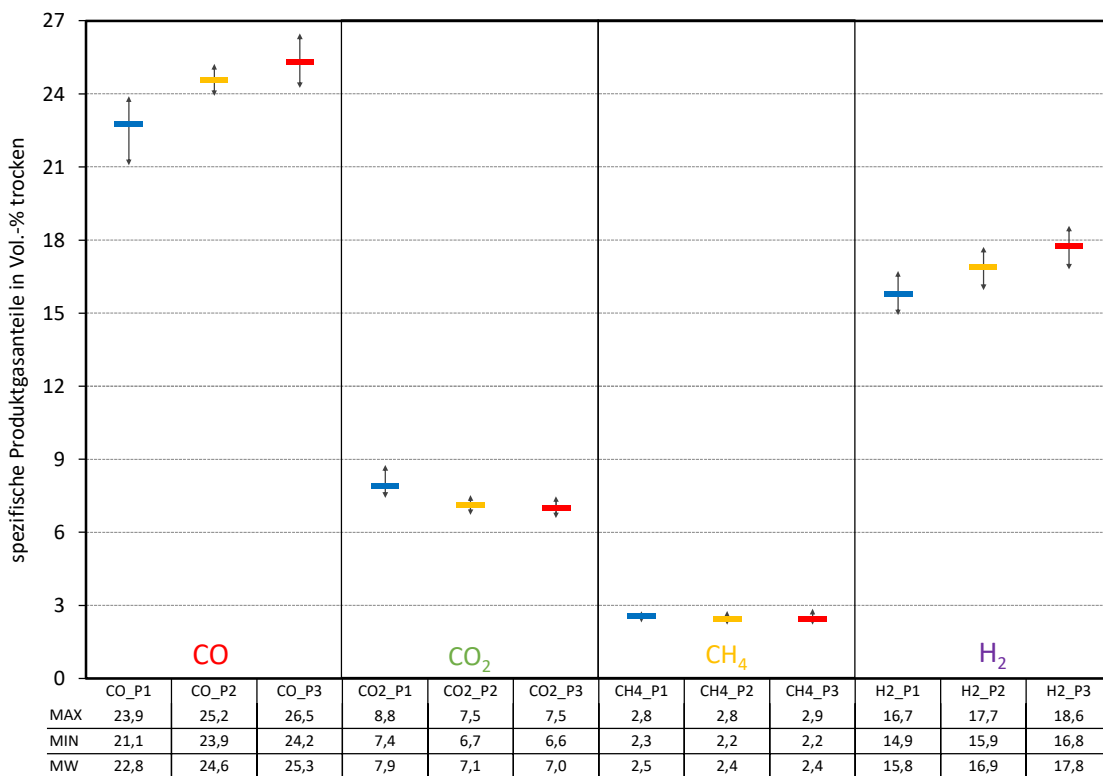


Abb. 2-49 Min-, Max-, u. Mittelwerte von Produktgasanteilen im Vergleich der Versuchsphasen 1 bis 3, Phase 1: blau; Phase 2: gelb; Phase 3: rot

- Kennzahlen zum Vergasungsprozess

■ Kohlenstoffumsatzgrad

Als Effizienzkennzahl kann der Kohlenstoffumsatzgrad für die betrachteten Messfahrten herangezogen werden. Dafür wird der Kohlenstoffmassenstrom im Filterstaub zu der Kohlenstofffracht im Brennstoff in Beziehung gesetzt. Er beschreibt somit, wieviel des mit dem Brennstoff zugeführten festen Kohlenstoffs in die Gasphase des zu nutzenden Produktgas umgesetzt wird und kann folglich auch als Kennzahl des Vergasungsprozesses dienen. In [33] werden für Festbett-Gleichstrom-Vergaser bei Einsatz von Biomasse als typische Kohlenstoffumsatzgrade 97 bis 99 % angegeben.

■ Kaltgaswirkungsgrad

Der Kaltgaswirkungsgrad wird nach [34] aus dem Quotient der chemischen Gasleistung und der Brennstoffleistung berechnet und beschreibt folglich, wie groß das Verhältnis zwischen der im Produktgas chemisch gebundenen Energie und der mit dem Brennstoff eingebrachten chemischen Energie ist. Die Brennstoff- und Gasleistung wiederum werden als Produkt des jeweiligen Massenstroms und Heizwertes berechnet. In [35] werden für kleintechnische Festbett-Gleichstrom-Vergaser bei Einsatz von Biomasse typische Kaltgaswirkungsgrade von 65 bis 75 % angegeben.

■ Elektrischer Anlagenwirkungsgrad

Der elektrische Anlagenwirkungsgrad gibt das Verhältnis der zur Verfügung gestellten (eingespeisten) elektrischen Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten chemischen Energie an. Für den hier relevanten Leistungsbereich unterhalb 50 kW_{el} gibt [36] für Holzvergaser-BHKW einen in der Praxis erreichbaren elektrischen Anlagenwirkungsgrad von etwa 25 % an.

- Stoffstromverhältnisse zum Vergasungsprozess

Es kann das Luftverhältnis des Vergasungsprozesses gebildet werden, indem nach [37] das Verhältnis zwischen der mit dem Vergasungsmittel zugeführten Sauerstoffmenge und der für eine vollständige Oxidation stöchiometrisch benötigten Sauerstoffmenge gebildet wird. Bei der Vergasung mit dem Vergasungsmittel Luft werden dabei typischerweise Luftverhältnisse von 0,3 bis 0,5 erreicht [2], [37].

Außerdem können für die Bewertung der Stoffumsätze im Vergasungsprozess aus den zum Reaktor ein- und austretenden Stoffströmen Verhältnisse gebildet und für verschiedene Prozesszustände miteinander verglichen werden. Mögliche Stoffstromverhältnisse sind dabei:

- Produktgas zu Brennstoff
- Produktgas zu Brennstoff Trockensubstanz
- Produktgas zu Vergasungsmittel

Ziel der Berechnung und Darstellung dieser Stoffstromverhältnisse ist die Anzeige einer Tendenz, ob die Vergasungsmitteltemperatur einen Einfluss auf die generierte Menge an Produktgas aus den eintretenden Stoffströmen Brennstoff und Vergasungsmittel hat.

- Auswahl geeigneter Bewertungskennzahlen auf Basis der Daten der Vorversuche aus Versuchsabschnitt 1

In Versuchsabschnitt 1 wurde testweise das Vergasungsmittel mit dem Lufterhitzer in 30 min-Intervallen auf verschiedene Temperaturen erhitzt und anschließend für die kurzen Zeiträume die Prozessauswirkungen erfasst und bewertet. Dieser Versuchsabschnitt diente somit der Auswahl geeigneter Variationsbereiche der Vergasungsmitteltemperatur. Außerdem wurden die Messdaten ausgewertet und erste Bewertungskennzahlen sowie Stoffstromverhältnisse berechnet, um damit eventuelle Tendenzen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur sichtbar zu machen. Zu berücksichtigen ist jedoch dabei die große Unsicherheit aufgrund der kurzen 30 min-Zeitintervalle. So sind z.B. die erfassten Brennstoffmassenströme aufgrund der diskontinuierlichen Zuführung mit einer relativ großen Unsicherheit für diese Zeitintervalle verbunden. Für die quantitative Darstellung eventueller Tendenzen dieser Parameter bzw. Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur sollen diese trotz der beschriebenen Unsicherheit in den folgenden Abb. 2-50 sowie Abb. 2-51 aufgezeigt werden. Ziel dieser Abhängigkeitsuntersuchung ist es, geeignete Bewertungsparameter zu detektieren um diese anschließend für eine intensivere Analyse mit den Daten aus dem Versuchsabschnitt 2 anzuwenden.

Dabei ist aus Abb. 2-50 ersichtlich, dass mit steigender Vergasungsmitteltemperatur keine Abhängigkeit des Kaltgaswirkungsgrades festzustellen ist. Dies erklärt sich möglicherweise aus dem Verlauf von Massenstrom und Heizwert des Produktgases. Der Heizwert steigt hier mit höheren Vergasungsmitteltemperaturen, der Massenstrom sinkt hingegen. Die Ursache hierfür liegt an dem definierten Gasvolumen (Hubraum), welches der Motor durch seine Kolbenbewegungen transportieren kann. Sollte also der Anteil brennbarer Bestandteile im Produktgas steigen (und damit der Heizwert), steigt ebenfalls der Anteil der vom Motor angesaugten Luft (Motorluft), da die brennbaren Gasanteile im Motor nahezu vollständig umgesetzt, also oxidiert werden. Die Steuerung dieser Massenströme obliegt der Lambdaregelung mit einer Klappensteuerung vor der Mischkammer von Produktgas und Motorluft. Da jedoch das Gesamtfördervolumen des Motors fest gegeben ist, muss der Produktgasanteil am Gesamtgemisch sinken, was zu einem sinkenden Produktgasmassenstrom führt.

Für den nachfolgenden Vergleich und Bewertung der Variationen werden trotz dieser Abhängigkeit alle drei hier dargestellten Parameter bzw. Kennzahlen verwendet.



Abb. 2-50 Für Versuchsabschnitt 1 (N = 19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Bewertungsparameter und -kennzahlen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

In Abb. 2-51 sind aus die aus den erfassten Massenströmen von Brennstoff, Vergasungsmittel und Produktgas ermittelten Stoffstromverhältnisse aufgezeigt. Dabei wird eine generelle Tendenz sichtbar. Alle Stoffstromverhältnisse sinken mit steigender Vergasungsmitteltemperatur. Vermutlich werden sie maßgeblich durch den mit höheren Vergasungsmittel-Eintrittstemperaturen sinkenden Produktgasmassenstrom (siehe Ausführungen zuvor) beeinflusst. Folglich können die Stoffstromverhältnisse nicht zur Bewertung des Vergasungsprozesses angewendet werden.

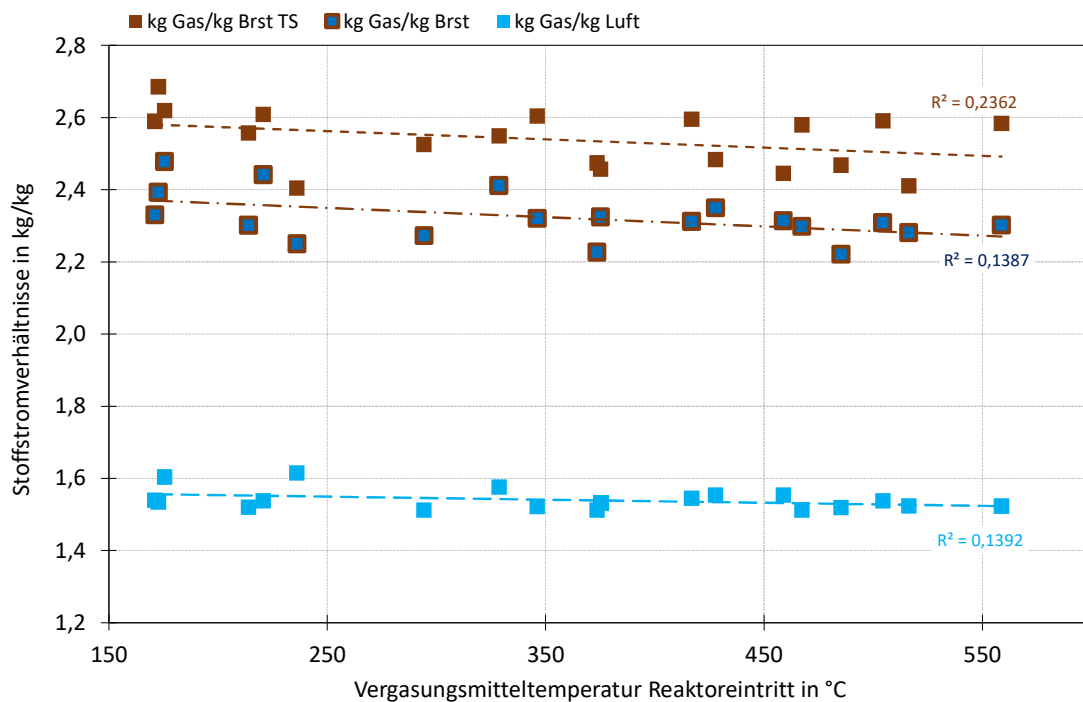


Abb. 2-51 Für Versuchsabschnitt 1 (N = 19 Datenreihen mit Zeitintervall 30 min) ermittelte Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

- Vergleich der Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse für die Versuchsphasen

Werden die für die Bewertung ausgewählten Kennzahlen und Stoffstromverhältnisse aus den Mess- und Analysedaten des Versuchsabschnittes 2 (Messfahrt LuVo 2-2) berechnet, ergeben sich für die jeweilige Vergasungsmitteltemperatur bzw. Versuchsphase die in Tab. 2-33 dargestellten Werte. Zusätzlich sind diese Werte noch einmal grafisch in Abb. 2-52 abgebildet. Im Vergleich zum vorherigen Versuchsabschnitt 1 wurden in dem abschließenden Versuchsabschnitt 2 Zeitintervalle von mind. drei Stunden für die jeweilige Phase mit Berücksichtigung einer Einlaufzeit eingehalten und damit vergleichsweise belastbarere Messdaten ermittelt.

Tab. 2-33 Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse für die Vergasungsmitteltemperaturen

Parameter	Einheit	Phase 1 $T_{VM}: 181^{\circ}C$	Phase 2 $T_{VM}: 400^{\circ}C$	Phase 3 $T_{VM}: 579^{\circ}C$
Heizwert Produktgas	MJ/kg	4,62	4,97	5,17
Luftverhältnis		0,27	0,27	0,26
Produktgas zu Brennstoff	kg/kg	2,46	2,37	2,31
Produktgas zu Brennstoff TS	kg/kg	2,52	2,45	2,38
Produktgas zu Vergasungsmittel	kg/kg	1,56	1,50	1,49
Kohlenstoffumsatzgrad	%	97,1	96,9	97,0
Kaltgaswirkungsgrad	%	62,1	64,9	65,7
Elektrischer Anlagenwirkungsgrad	%	20,2	20,6	20,3

Beim Vergleich der Versuchsphasen 1 bis 3 ergeben sich mit steigender Vergasungsmitteltemperatur folgende Tendenzen der Bewertungsparameter und Bewertungskennzahlen:

- Signifikant steigender Heizwert des Produktgases
- Leicht steigender Kaltgaswirkungsgrad
- Keine Veränderung des Kohlenstoffumsatzgrades
- Keine Veränderung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades

Das Luftverhältnis lag nahezu konstant bei 0,27 und damit in einem typischen Bereich für Vergasungsreaktionen dieses Anlagentyps, wies jedoch keinen signifikanten Unterschied bei steigender Vergasungsmitteltemperatur auf.

Hinsichtlich der gewählten Stoffstromverhältnisse ist bei allen eine leicht sinkende Tendenz festzustellen. Dies ist, wie zuvor beschrieben, vermutlich das Resultat des sinkenden Produktgasmassenstromes bei annähernd konstanten Massenströmen von Brennstoff und Vergasungsmittel.

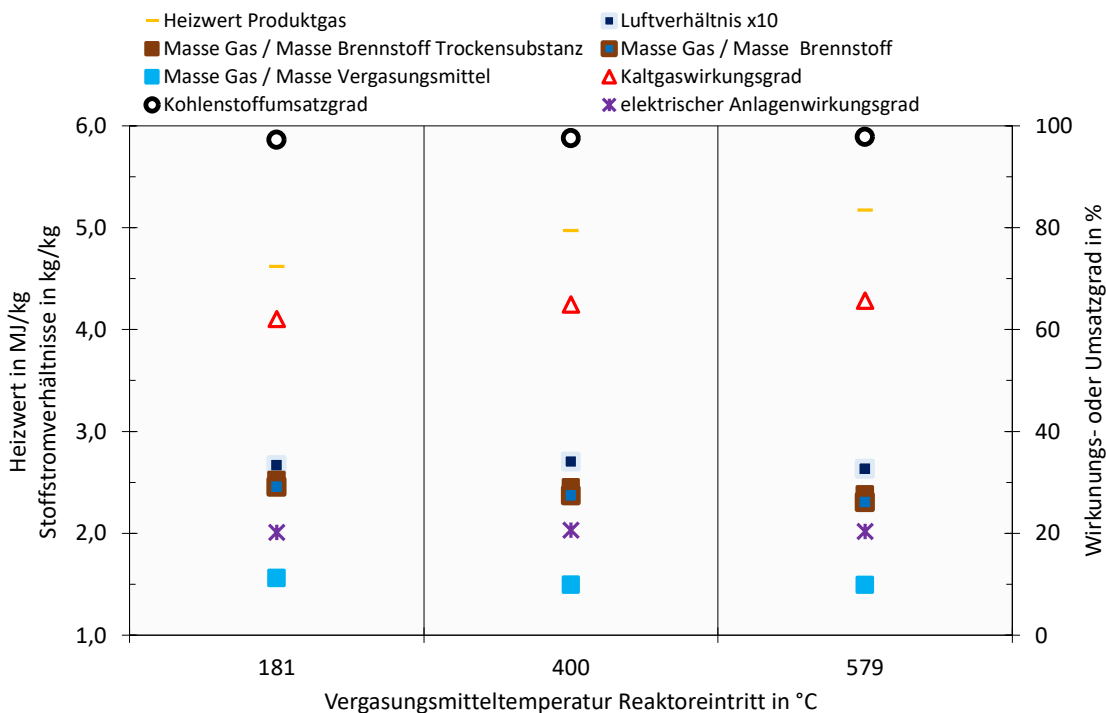


Abb. 2-52 Bewertungskennzahlen und Stoffstromverhältnisse in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

- Zusammenfassung und abschließende Bewertung

Die Betriebsvariation der Vergasungsmitteltemperatur mit einer marktüblichen Biomassevergasungsanlage und BHKW konnte durch Integration einer Lufterhitzerstrecke und deren Einbindung in die Anlagensteuerung erfolgreich durchgeführt werden. Die bei vergleichbaren Rahmenbedingungen (Brennstoffqualität, Anlagenzustand) erfassten Variationsauswirkungen wurden ausgewertet und verglichen.

Das grundlegende Ziel dieser Parametervariation, die Optimierung der thermochemischen Reaktionen, um damit eine signifikante Steigerung der Effizienz (Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsatzgrad) zu erreichen, konnte nur teilweise nachgewiesen werden. Einzig bei der Produktgaszusammensetzung stiegen die Anteile von CO und H₂ dahingehend, dass der entsprechende Heizwert um relativ 12 % zwischen Phase 1 und 3 gesteigert werden konnte. Auch eine leichte Steigerung des Kaltgaswirkungsgrades um 6 % relativ zwischen den Phasen wurde erreicht. Jedoch ist durch die Kombination der Gaserzeugung und Gasnutzung im Motor die Gesamtanlage

in ihrem Betriebspunkt festgelegt. Dies ist auch an dem nahezu konstanten elektrischen Anlagenwirkungsgrad zu erkennen. Somit fehlen für eine Variation bestimmter Betriebsparameter zur Untersuchung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen die Freiheitsgrade in der Anlagenfahrweise. Hierfür wäre ein Versuchsstand mit einem Festbett-Gleichstromvergaser und freier Ausströmung des Produktgases aus dem Reaktor notwendig.

Derzeitig wird vom Hersteller der maximale Brennstoffwassergehalt mit 13 Ma.-% angegeben [38]. Unter Beachtung der Erfahrungen aus dieser Betriebsvariation ist es ggf. möglich, mit einer Erhöhung der Eintrittstemperatur des Vergasungsmittel Luft zumindest zeitweise einen Brennstoff mit einem deutlich höheren Wassergehalt einzusetzen. Die für die Trocknung des Brennstoffes notwendige zusätzliche Energie würde das Vergasungsmittel aufgrund seiner höheren Temperatur mitbringen. Dies könnte die Einsatzflexibilität hinsichtlich Brennstoffen mit schwankendem Wassergehalt erhöhen. Natürlich muss demgegenüber der zusätzliche Aufwand für die Erhöhung der Vergasungsmitteltemperatur beachtet werden. Darüber hinaus sind durch die damit höheren Reaktorwandtemperaturen entsprechend gestiegene Materialbelastungen und höhere Wärmeverluste zu beachten. Dies wäre ein möglicher Untersuchungspunkt in Anschlussprojekten.

8. Technische Integration der Speicher in die Biomassevergasungsanlage

Nachdem die Auswertung von Versuchsfahrten bereits im Zwischenberichtszeitraum begonnen hatte, konnten weitere Versuchsfahrten mit den entwickelten, aufgebauten und validierten Speichern durchgeführt werden [1]. Diese Versuchsfahrten umfassen weitere Versuche mit den Latentwärmespeichern und zusätzlich Versuche zur Luftvorwärmung mit gespeicherter sensibler Wärme (LuVo-Wärmespeicher) an der Biomassevergasungsanlage. Zuerst werden die Installationsarbeiten für die Anlagen-Integration und die Fließschemen der integrierten Speicher dargestellt. Motive für die Anwendung von Speichertechnologien sind ebenfalls ausführlich im Zwischenbericht dargestellt [1]. Grundlegendes Ziel ist ein schnellerer Start und schonender Betrieb der Anlage.



Abb. 2-53 Aufstellort der PCM-Speicher unter dem Vorratsbehälter der Anlage

PCM-Speicherdemonstratoren

Der Aufstellort der PCM-Speicherdemonstratoren befindet sich unterhalb des Brennstoffvorratsbehälters für die Biomassevergasungsanlage. Die Speicher wurden mit Blick auf den zur Verfügung stehenden Aufstellraum und die thermodynamischen Anforderungen zur Systemintegration in die Anlage dimensioniert (Abb. 2-53). Hier zeigt sich bereits zum ersten Mal der Vorteil eines Latentwärmespeichers, der einen deutlich höheren volumenbezogenen Wärmeinhalt (Wärmespeicherdichte in kWh/m³) als ein sensibler Warmwasserspeicher realisieren kann. Das Problem des limitierten Platzangebotes zur Aufstellung von Wärmespeichern stellt sich bei sehr vielen Anwendungen.

Der speichereigene Kreislauf wurde nach Abb. 2-54 an den Produktgas-Kühlkreislauf mittels Plattenwärmeübertrager im Gegenstrom gekoppelt. Damit gelingt es, ausgekoppelte Abwärme aus dem Produktgas-Kreislauf effizient einzuspeichern und mit geringen Verlusten zur Vorwärmung des Systems wieder zur Verfügung zu stellen. Der Aufbau des Kreislaufes benötigte mehrere Tage und vom 25. bis 27.07.2020.

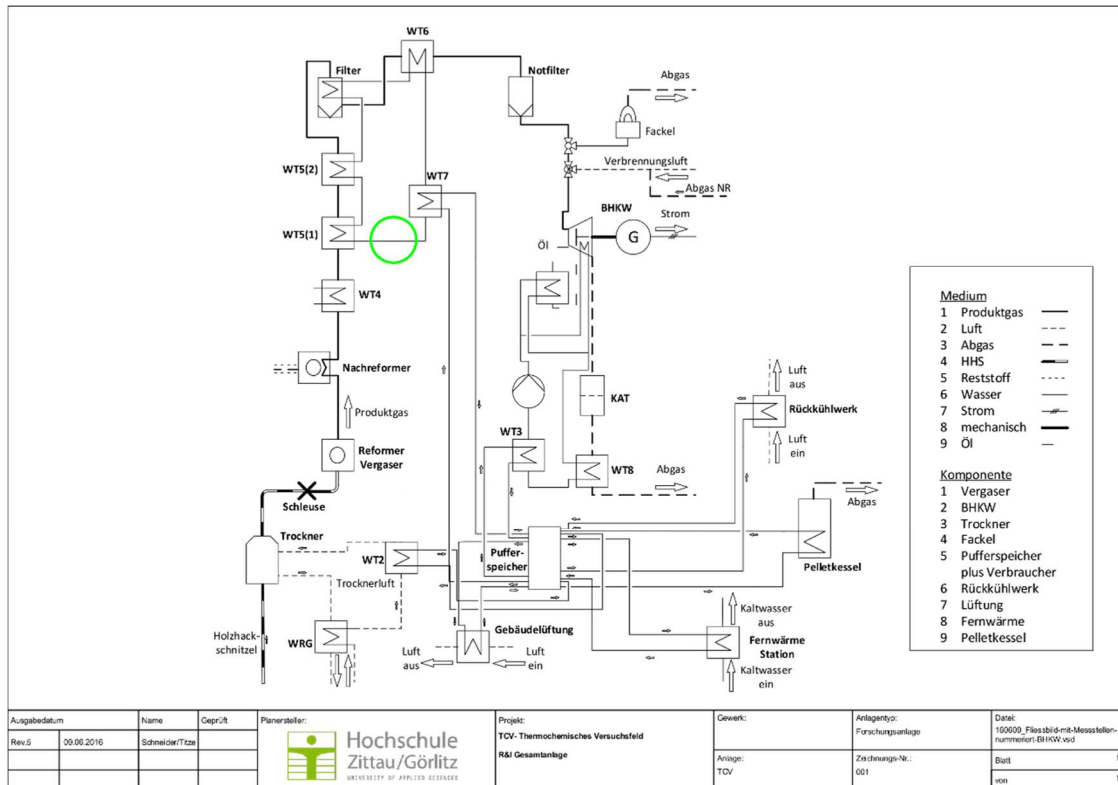


Abb. 2-54 R&I-Fließschema der Biomassevergasungsanlage, Markierung: Anschlussstelle des Speicherkreislaufer

Einzelne Komponenten des Kreislaufes konnten schon im Vorgängerprojekt beschafft werden. So z.B. die Pumpe und die Anschlusskupplungen für die Speicher. In der folgenden Abb. 2-55 wird der installierte Speicherkreislauf gezeigt.



Abb. 2-55 Linkes Bild: Anschlussstelle des Speicherkreislaufes mit Umwälzpumpe, Membranausgleichsgefäß und Wärmeübertrager; rechtes Bild: gesamter Kreislauf mit Rohrstrücke zu den Speichern unter dem Brennstoffbehälter

Die Speicher wurden – wie auch während der Validierungsmessungen im ZKWL (siehe Abb. 2-4 rechts) – in einer Kaskadenschaltung in Reihe angeordnet, bei der der Speicherdemonstrator 1 primär durchströmt wird. Messtechnisch werden der Fluidmassenstrom, die PCM-Temperatur an verschiedenen Positionen im Speicher, die Vorlauf-, Transfer- und Rücklauftemperaturen des Wärmeträgers Wasser erfasst und aufgezeichnet. Dazu diente das Messdaten-Erfassungssystem des Heißluft-Windkanals aus dem Labor Thermodynamik und Wärmetechnik der HSZG.

Aus diesen Messdaten konnten – wie auch in Abb. 2-5 gezeigt – die zu- und abgeführten Wärmemengen bestimmt und somit die Ladezustände der Speicher erfasst werden. Da sich zwischen den Kreisläufen ein zusätzlicher Wärmeübertrager befindet, wurde eine geringere maximale Vorlauftemperatur im Vergleich zu den Validierungsmessungen erreicht. Der Belade- und Entladevorgang wurde mit der Stromversorgung der Umwälzpumpe und dem Öffnen der Absperrhähne an den Speicherzuleitungen gestartet (Massenstrom mit 0,42 bis 0,48 kg/s identisch zu den Validierungsmessungen).

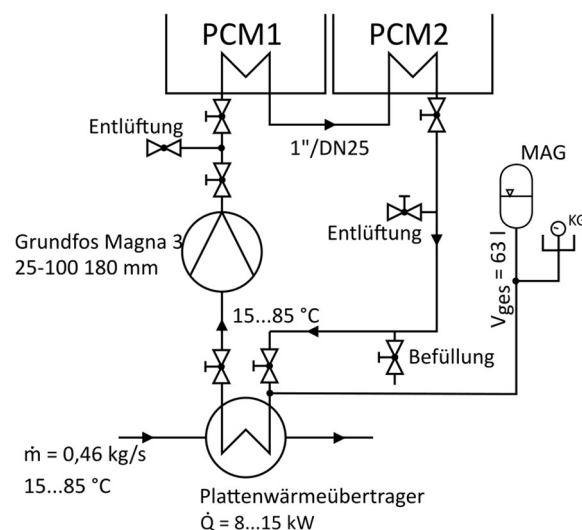


Abb. 2-56 Schema des Speicherkreislauf, Reihenschaltung der PCM-Speicherdemonstratoren PCM1 und PCM2, Revision nach erfolgreichem Aufbau

Nach der abgeschlossenen Integration erfolgte eine Druck- und Strömungsprüfung sowie Entlüftung des Kreislafes samt Speicher. Das Ergebnis der Überprüfung war zufriedenstellend, abgesehen von ein paar Verschraubungen, welche aufgrund von Leckagen nachgezogen werden mussten. Damit war die Integration der Latentwärmespeicher in die Versuchsanlage abgeschlossen. Informationen zu dem Anlagenverhalten mit Vorwärmung des Produktgaskühlkreislafes und welche Änderungen in der Fahrweise vorgenommen werden mussten, finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

LuVo-Speicher

Bei den Untersuchungen zur Vorwärmung der Vergasungsluft mit gespeicherter Wärme aus vorangegangenen Messfahrten wurden beide LuVo-Speicher an der Anlage verwendet. Welche Unterschiede und Besonderheiten die beiden Speicher aufweisen ist in [1] aufgeführt. Auf das Beladen der Speicher mit einem Teilvolumenstrom wurde bei den Untersuchungen verzichtet. Dadurch stand eine höhere Leistung zur Beladung der Speicher zu Verfügung, wobei bei der BHKW-Leistung Abstriche verzeichnet werden mussten. Bei der Beladung wird Wärme aus dem Vergasungsmittelstrom entnommen. Durch den Temperaturabfall des Vergasungsmittels zu Beginn der Beladung sinkt aus energetischer Sicht die Produktgasqualität und somit die Leistung des BHKW. Für den LuVo-Speicher 1 bedeutete dies jedoch eine Einsatzmöglichkeit, weil mit der höheren Beladeleistung eine Beladung innerhalb einer typischen Messfahrtdauer realistisch wurde.

Der Aufstellort der LuVo-Speicher befand sich in beiden Fällen vor der Transportschnecke zwischen Schleuse und Reaktor (siehe Abb. 2-57). Dies war der einzige Aufstellort bei dem die neu zu installierenden Rohrstrecken so kurz wie möglich gehalten werden konnten. Somit konnten Druck- und Wärmeverluste bei der Ein- und Auskopplung der Heißluft, welche bei Hochtemperaturanwendungen nicht unterschätzt werden dürfen, minimiert werden.

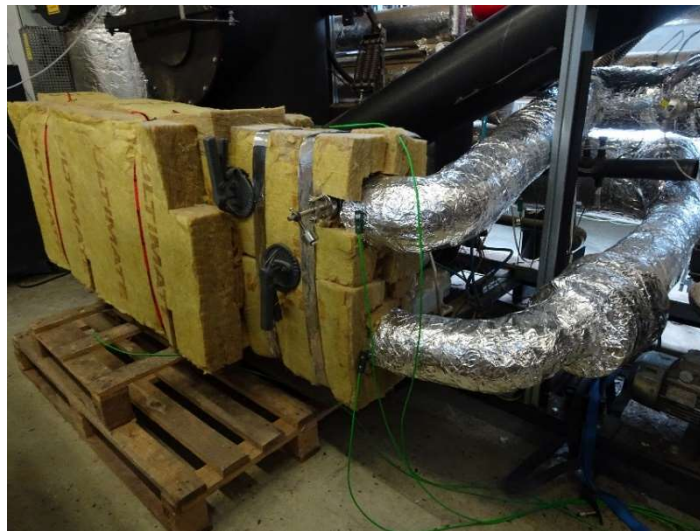


Abb. 2-57 LuVo-Speicher 2 an der Vergasungsluftstrecke

Das in Abb. 2-58 zu sehende Fließschema zeigt den Anschluss der Speicher über eine Bypassschaltung. Die Baumaßnahmen für die zusätzlichen Rohrstrecken wurden bereits in einem vorangegangenen Projekt [6] durchgeführt. Über diese Leitungen wird auch bei einer anderen Untersuchung eine elektrisch beheizte Luftvorwärmung integriert (vgl. Kapitel Variation Vergasungsmitteltemperatur).

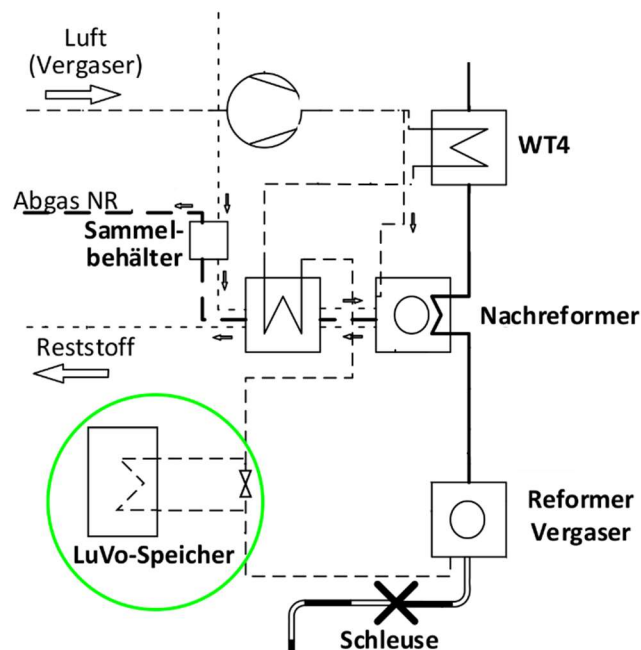


Abb. 2-58 Schema der Vergasungsluftstrecke mit integriertem LuVo-Speicher

9. Abstimmung der Speicher auf den Anlagenbetrieb

PCM-Speicherdemonstratoren

Mit dem Betrieb der Latentwärmespeicher in der Biomassevergasungsanlage müssen Veränderungen in der Anlagenfahrweise vorgenommen werden. So muss z.B. das Mischventil, welches bei Erreichen eines bestimmten Temperaturwertes öffnet und Wärme aus dem Produktgas-Kühlkreislauf an den ursprünglichen, sensiblen Pufferspeicher übergibt, per Handsteuerung geschlossen werden. Dies trifft immer dann zu, wenn die Latentwärmespeicher be- und entladen werden. Der Schwellwert für die automatische Regelung des Mischventiles müsste in Richtung der maximal zulässigen Temperatur des Kühlkreislaufes geändert werden. Jedoch ist diesbezüglich nur begrenzter Zugriff in die Anlagensteuerung des Herstellers vorhanden.

Bei der Entladung muss die Kühlkreislaufpumpe vor dem Anlagenstart in Betrieb genommen werden, um bei der Vorwärmung die vom Speicherkreislauf zur Verfügung gestellte Wärme auf die Komponenten übergeben zu können. Ab ca. 85 °C sollte das Mischventil per Hand auf Automatik-Regelung gestellt sein, um Wärme auch an den Pufferspeicher zu übergeben. Wärme, welche zur Vorwärmung genutzt wird, muss nicht über das Rückkühlwerk an die Umgebung abgegeben und damit „vernichtet“ werden. Sobald der Pufferspeicher eine bestimmte Temperatur erreicht, wird Wärme an das Rückkühlwerk übergeben. Die schützt den Pufferspeicher vor Überhitzung bzw. Druckerhöhung.

Die Bewertung des Speichereinsatzes erfolgt anhand von Messungen der Zeitdauer zwischen Vergaserstart und BHKW-Start und der Zeitdauer bis zum stationären Zustand der Anlage. Ein weiterer Bewertungsmaßstab ergibt sich aus der Menge an entstehendem Kondensat, welches in der Produktgasleitung anfällt. Abgeschätzt wird dies visuell anhand des Kondensatfüllstandes im Schauglas. Das Schauglas wurde für die Geschwindigkeitsmessung mittels Laser-Doppler Anemometer installiert. Der

Beurteilungszeitpunkt ist jeweils 30 Minuten nach BHKW-Start. Das Verhalten der PCM-Speicherdemonstratoren in der Anlage entspricht den Erwartungen. Ein Unterschied zu den Validierungsmessungen besteht nur in der verzögerten Wärmeleistungsbereitstellung durch den Vergaser, da sich die Vergaserbauteile und das Produktgas erst langsam im Verlauf des Prozesses erwärmen und damit einspeicherbare Wärme zur Verfügung steht. Bei den Validierungsmessungen stand hingegen die maximale Vorlauftemperatur von 83 °C durch das Temperiergerät von Beginn an zur Verfügung. Deshalb war die Leistung von Beginn an höher. Die Speicherparameter sind in Abb. 2-59 für eine Messdauer von etwa 10 Stunden dargestellt (ähnlich Abb. 2-5).

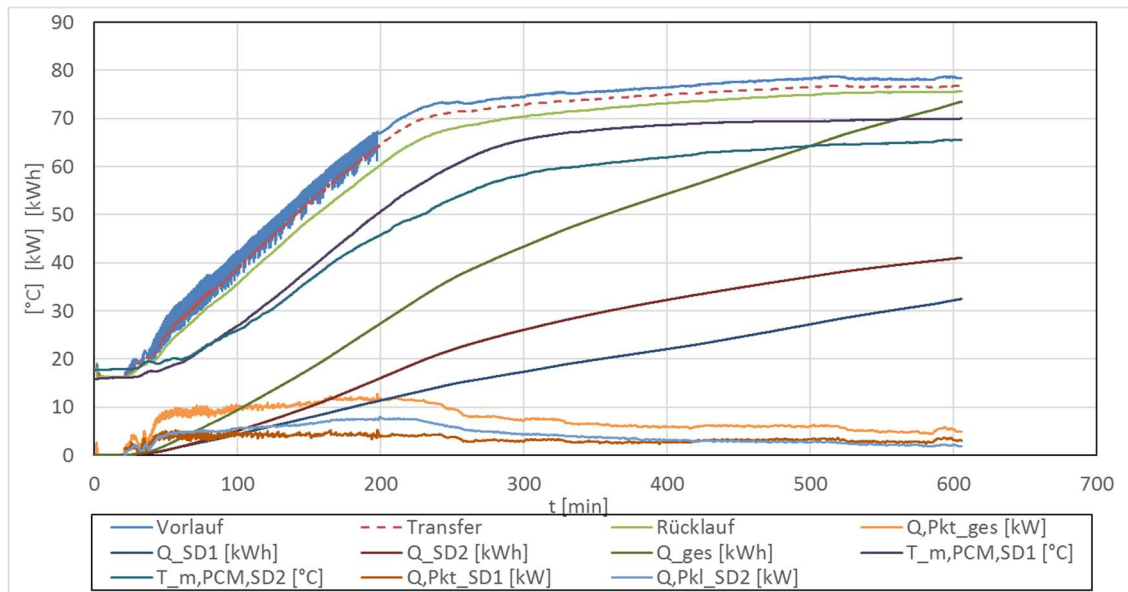


Abb. 2-59 Exemplarischer Messdatenplot einer typischen Beladung der PCM-Speicherdemonstratoren an der Biomassevergasungsanlage

Die mittlere Beladeleistung von 11 kW (Kurve Q_{Pkt_ges} [kW] zeigt den zeitlichen Verlauf der Beladeleistung) konnte – wie aus den Validierungsmessungen erwartet – aus den o.g. Gründen nicht erreicht werden. Ein Öffnen des Mischventiles bzw. das Umstellen auf Automatikregelung ist somit im Verlauf der Messfahrt notwendig. Auch die unterschiedlichen PCM der Speicher (Fettsäure, Salzhydrat) verhalten sich hinsichtlich der Leistung und der auftretenden Wärmeverluste wie in den Validierungsmessungen beschrieben [1].

Nach 10 h Beladedauer konnten rund 75 kWh Wärme eingespeichert werden (Endpunkt der Kurve Q_{ges} [kWh]). Würden diese 75 kWh Wärme zum Vorwärmen des Motors aus einem fossilen Brennstoff erzeugt werden, entstünden dabei mindestens 15 kg CO₂. Jede Beladung dieser PCM-Speicherdemonstratoren mit Abwärme oder regenerativ erzeugter Wärme spart diese Menge an Treibhausgas. Bei Anwendungen mit einem täglichen Speicherzyklus könnten diese beiden Speicher jährlich rund 5,5 Tonnen Treibhausgasemissionen vermeiden.

Der Entladevorgang der Speicher dauert im Schnitt 45 Minuten. Danach ist der Produktgas-Kühlkreislauf (PG-KK) vorgewärmt und der Vergasungsprozess im Reaktor bereits verläuft stationär. Sobald die Temperatur des Produktgas-Kühlkreislaufes (PG-KK) über die Temperatur des Speicherkreislaufes gestiegen ist, beginnt die erneute Beladung der Speicher. Somit konnten zwei Be- und zwei Entladungen (zwei Speicherzyklen) innerhalb von drei Messfahrten durchgeführt werden. Zwischen den Messfahrten lag jeweils eine 64-stündige Speicherdauer.

LuVo-Speicher

Zur Beladung des LuVo-Speichers 1 wurde die Vergasungsluft zu Beginn über den Bypass an den Speichern vorbeigeleitet bis diese durch den Produktgas/Vergasungsluft-Wärmeübertrager auf eine annähernd konstante Temperatur erhitzt wurde. Danach wurde die Bypassleitung (siehe Abb. 2-58) komplett geschlossen und die Vergasungsluft durch den LuVo-Speicher geleitet, so dass dies dort Wärme an das Speichermaterial abgegeben hat und der Speicher beladen wurde (Messdatenplot siehe Abb. 2-60). MS0 ist dabei die Temperaturmessstelle am Bypass-Eintritt, MS7 am Speicheraustritt, MS8 am Bypass-Austritt und MS5 ist die Speicherkerntemperatur (siehe auch [1]). Während des regulären Anlagenbetriebes wird hingegen keine Bypass-Schaltung verwendet. Der Zeitpunkt des Schließens des Bypasses ist im Messplot durch das „Einbrechen“ der Temperaturen MS7 und MS8 sichtbar.

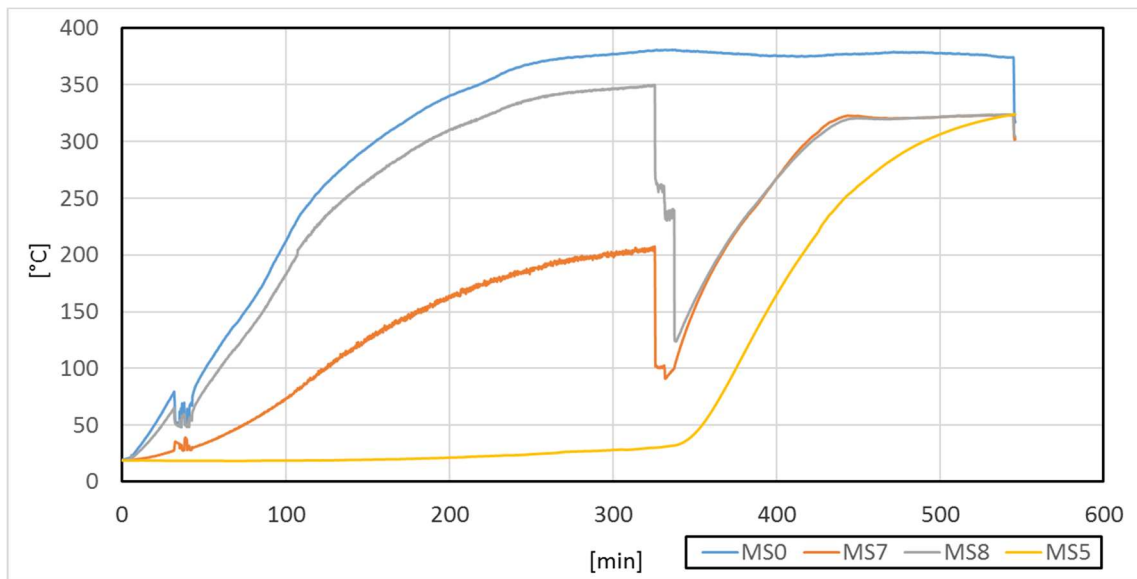


Abb. 2-60 Temperaturverlauf der Messstellen am LuVo-Speicher 2 während einer Beladung

Bei der Entladung der Speicher wurde die Luft während der Startphase 1 des Vergasers komplett durch den Speicher geleitet. Somit konnte die Vergaserluft durch die gespeicherte Wärme vorgewärmt werden. In der Startphase 1 wird Vergasungsluft mit reduzierter Verdichterleistung in den Reaktor eingeblasen und sorgt für den Aufbau des Glutbettes. Bei Startphase 2 wird die Verdichterleistung automatisch erhöht um das Glutbett auszuweiten. Der Vorwärm- bzw. der Entladeprozess ist abgeschlossen, wenn die Bypass-Eintrittstemperatur die Bypass-Austrittstemperatur überschritten hat und der Speicher wieder mit Wärme beladen wird.

Je LuVo-Speicher wurden zwei Bereitschafts- bzw. Speicherzeiten untersucht zu jeweils 15 und 10 Stunden. Mit dem LuVo-Speicher 2 wurde auch eine 5-minütige Bereitschaftszeit untersucht. Dies erwies sich jedoch als nicht zielführend, da das Glutbett im Reaktor noch aktiv war und der Anlagenstart nicht bewertet werden konnte. In Abb. 2-61 ist der Temperaturverlauf der Speichertemperaturen während einer Entladung bei niedrigerem Temperaturniveau zu sehen (Anfangstemperatur MS5 des Speichermediums [= Keramikplatten] nur rund 110 °C). Nach ca. 35 Minuten wurde die Vergasungsluft-Vorwärmung abgeschlossen.

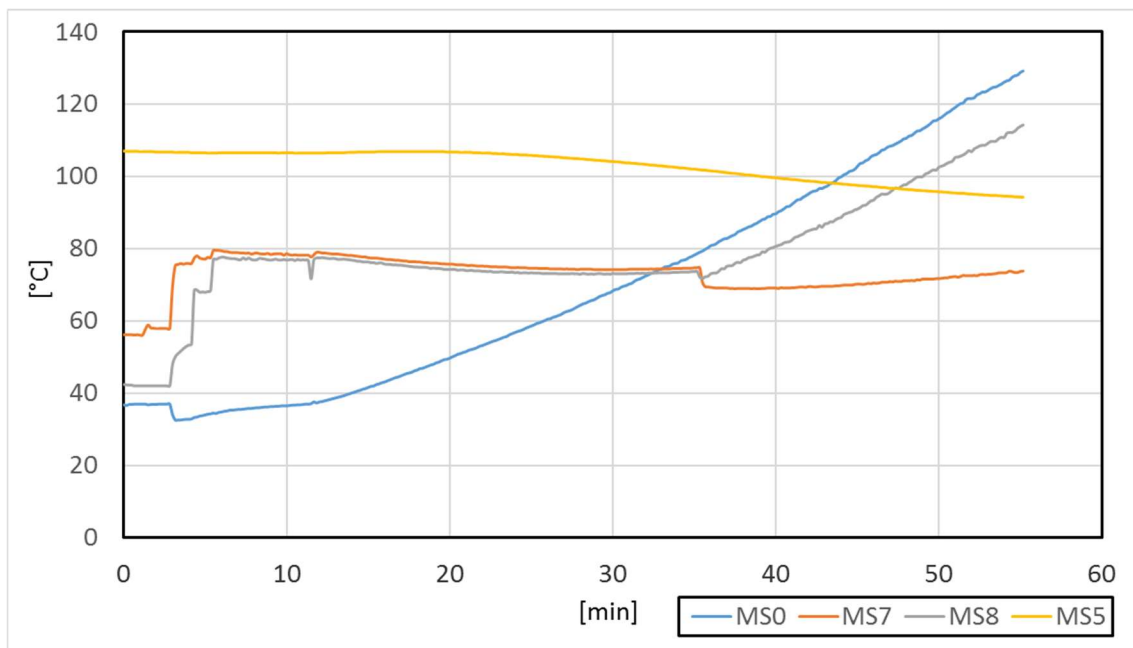


Abb. 2-61 Temperaturverlauf der Messstellen am LuVo-Speicher 2 während einer Entladung

Das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Wirkung sowohl des sensiblen Luftvorwärmers als auch der Latentwärmespeicher ist die erreichbare Verkürzung der Zeitdauer vom Vergaserstart bis zum Start des BHKW. Diese Betriebsphase (Kaltstart) ist für die Anlage mit starken Beanspruchungen verbunden und es treten umweltschädliche Emissionen auf. Aus diesem Grund wurde diese Zeitdauer während zahlreicher Betriebsfahrten ermittelt, und zwar

- als Referenz ohne Einsatz der Speicher,
- zum Vergleich mit Einsatz der Latentwärmespeicher,
- mit Einsatz des Luftvorwärmer-Speichers und
- mit Einsatz beider Speichersysteme.

In Tab. 2-34 sind die bestimmten Zeitdauern von Vergaser-Start bis BHKW-Start und bis zum Erreichen eines stationären Zustandes der Biomassevergasungsanlage aufgeführt. Diese sind in Abb. 2-62 noch einmal grafisch dargestellt. Die Auswahl der dargestellten Messfahrten beruht auf der Herstellung der Vergleichbarkeit und damit auf der Notwendigkeit gleicher Randbedingungen wie Außentemperatur und Brennstoffqualität.

Tab. 2-34 Vergleich Messfahrten mit / ohne Speichereinsatz, bei etwa gleichen Rahmenbedingungen, schwarz: kein Speichereinsatz, blau: Latentwärmespeichereinsatz, grün: LuVo-Speicher im Einsatz, lila: beide Speichertypen im Einsatz

Messfahrt Datum	Messfahrt (lfd. Nr.)	Startdauer BHKW in min	Zeitdauer bis Anlage stationär nach T1206 in min.	Außentemp., 8 Uhr in °C	Hallentemp. bei Start Datenerfassung in °C	PCM/LuVo- Speichereinsatz	PG-KK/Luft-emp. zum Anlagenstart in °C	Wärme für Komponenten- Vorwärmung in kWh	Brennstoff
13.04.2016	1	25	274	9	19	nein	19	keine	Standard HHS
24.11.2016	2	19	317	6	20	nein	20	keine	
26.04.2017	3	37	287	5	16	nein	16	keine	
23.10.2017	4	26	keine	8	20	nein	20	keine	
06.11.2017	5	20	229	6	16	nein	16	keine	
16.10.2018	6	23	keine	14	21	nein	21	keine	
09.11.2018	7	30	277	6	22	nein	22	keine	
22.11.2018	8	12	202	1	18	nein	18	keine	
29.04.2019	9	16	375	7	21	nein	21	keine	
10.09.2019	10	18	keine	13	21	nein	21	keine	
13.09.2019	11	21	257	16	21	nein	21	keine	
02.10.2019	12	30	266	15	20	nein	20	keine	
19.02.2020	13	43	275	3	18	nein	18	keine	
06.03.2020	14	27	263	4	18	nein	18	keine	
30.10.2020	15	21	250	8	19	PCM (64)	22	5,1	Macad.
05.11.2020	16	23	302	4	22	PCM (64)	49,2	7,8	
30.11.2020	17	18	266	-1	20	PCM (64)	75,1	5,6	
05.02.2021	18	11	277	0	21,8	PCM (64)	59,5	6,1	
08.02.2021	19	11	keine	-10	18,9	PCM (64)	64,8	3,7	
23.03.2021	20	14	keine	4	18,9	LuVo2 (15)	107	keine	
16.04.2021	21	18	keine	1	21,9	LuVo2 (10)	147,5	keine	
20.05.2021	22	12	keine	11	21,8	LuVo1 (15)	150	keine	
10.06.2021	23	12	keine	19	25,9	LuVo1 (10)	159,7	keine	
30.06.2021	24	15	keine	17	23,8	PCM (15) LuVo1 (15)	66,16 152	4,97 keine	
Mittelwerte		24,8	274,7	6,9	20,2		56,13	5,55	

Aus den Messwerten in Tab. 2-34 lassen sich bezüglich des Anlagenbetriebes folgende Feststellungen ableiten (Zeiten in min, Spalte 3):

- Während der Messfahrten ohne Speichereinsatz lag die Zeitdauer zwischen Vergaser- und BHKW-Start zwischen 12 und 43 min (schwarz). Eine einfache Mittelwertbildung liefert eine mittlere Zeitdauer von knapp 25 min.
- Bei Einsatz der Latentwärmespeicher zur Nutzung von Abwärme für die Vorwärmung des Produktgas-Kreislaufes (blau) ergeben sich Zeitdauern zwischen 11 und 23 min bei einer mittleren Zeitdauer von knapp 17 min. Hieraus ergibt sich bereits eine Verkürzung der anlagen- und umweltbelastenden Anfahrphase um im Mittel 8 min (~ 32 % bezogen auf Dauer ohne Speicher).
- Für den Einsatz des sensiblen LuVo-Speichers zur Vorwärmung der Vergaserluft verkürzen sich die Zeiten bis zum Start des BHKW auf 12 bis 18 min (grün), der Mittelwert ergibt 14 min. Dies entspricht einer Verkürzung der ineffizienten Anfahrphase um ~36 %, der Effekt liegt also in derselben Größenordnung.

- Am 30.6.2021 wurde eine Messfahrt durchgeführt, bei der beide Speichersysteme zum Einsatz kamen (Iila). Die gemessene Zeit zwischen Vergaser- und BHKW-Start betrug 15 min. Es durfte nicht erwartet werden, dass sich bei Einsatz beider Systeme deren Vorteile summieren. Dies ist in der Komplexität der Anlage und den unterschiedlichen Teilsystemen begründet, die die verschiedenen Speichersysteme bedienen.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass sich die Anfahrzeit der Anlage durchschnittlich **um ein Drittel** durch den Einsatz wahlweise eines oder beider Speichersysteme vermindern lässt. Das bedeutet: ein Drittel weniger verschleiß- und emissionsintensive Betriebsphasen des BHKW bei einem notwendigen Kaltstart. Dies darf als großer Erfolg für den Speichereinsatz und damit die unmittelbaren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Anlage gewertet werden. Abb. 2-62 veranschaulicht diese Ergebnisse noch einmal grafisch.

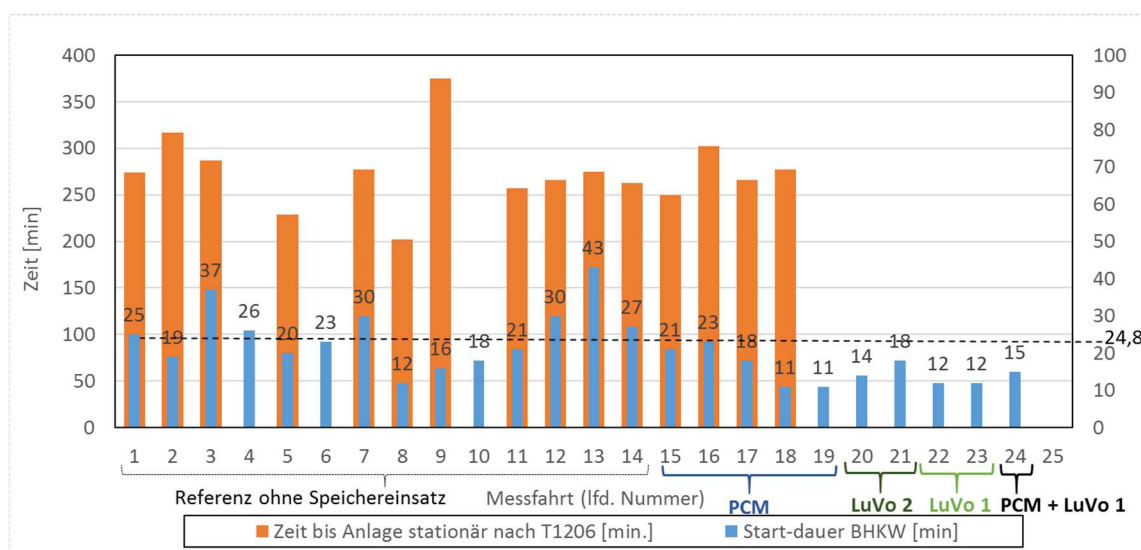


Abb. 2-62 Visualisierung der Zeitdauer zwischen Vergaser- und BHKW-Start (blau, Mittelwert aller Fahrten ohne Speichereinsatz 24,8 min [Strichlinie]) und bis zum Erreichen des stationären Betriebszustandes der Biomassevergassungsanlage (orange)

Die Datenlage ist mittlerweile deutlich aussagekräftiger als zum Zeitpunkt der Erstellung des Zwischenberichtes [1]. Es ist in Abb. 2-62 noch einmal erkennbar, dass – wie anhand der Tabellenwerte bereits erläutert – bei allen Messfahrten mit Speichereinsatz (Fahrten 15 bis 24) der Start des BHKW deutlich früher erfolgte, als bei den Fahrten ohne Speicher. Bei den erfassten Zeiten bis zum stationären Betriebszustand der Anlage (Spalte 4 in Tab. 2-34, Zeitdauer zwischen 3,3 und 6,3 Stunden) ergaben sich keine Unterschiede zu den Messfahrten ohne Speichereinsatz. Wenn kein stationärer Zustand erreicht wurde, war die Messfahrt zu kurz. Wie zu erwarten, wirkt sich der zeitlich befristete Speichereinsatz während des Anfahrens der Anlage nicht auf den langwierigen Prozess des Erreichens der Stationarität der Anlage aus. Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde die Anlage auch zur Zeitersparnis ab Messfahrt 19 nicht mehr bis in den stationären Betrieb gefahren.

Bei der letzten Messfahrt mit kombiniertem Speichereinsatz (Iila in Tab. 2-34) wurde der große LuVo-Speicher 1 eingesetzt, da dieser aufgrund seines höheren Wärmeinhaltes die höheren Luftaustritts- bzw. Vorwärmtemperaturen vorzuweisen hatte. Der LuVo-Speicher 2 wies dafür eine zu geringe Speicherkapazität auf und hätte in dieser Anlagenkonstellation keine messbaren Effekte verursacht.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Wirkung der eingesetzten Wärmespeicher ist die Kondensatbildung (Wasserabscheidung) in der Produktgasleitung, diesbezüglich

konnten ebenfalls aussagekräftige Ergebnisse verzeichnet werden. In Abb. 2-63 ist das Schauglas in der Produktgasleitung während fünf unterschiedlicher Messfahrten dargestellt, jeweils zum gleichen Zeitpunkt nach Vergaser-Start (ca. 45 Minuten). Im linken Bild ist das Schauglas kurz nach dem Einbau im Jahr 2017 und danach ab 2020 dargestellt. Es ist eine deutliche Verschmutzung mit Partikeln und Teer über diesen Zeitraum erkennbar. Dies soll zukünftig auch durch den Speichereinsatz und die damit realisierbare Anlagenvorwärmung verhindert oder zumindest reduziert werden. Auf den vier rechten Bildern a), b), c) und d) in Abb. 2-63 ist im Vergleich zum linken Bild ersichtlich, dass sich mit der Vorwärmung der Kondensatfüllstand (blaue Wellenlinie) im Schauglas etwa halbiert hat. Gut zu erkennen ist auch, dass Bild a) und Bild b) die deutlichste Reduzierung des Kondensatanfalls im Vergleich zum Bild links zeigen. Bei diesen Versuchsfahrten wurden die PCM-Speicherdemonstratoren eingesetzt. Der LuVo-Speicher-Einsatz hat gemäß Bild c) eine geringere Kondensatreduzierung als der PCM-Speicher-Einsatz zur Folge. In Kombination Bild d) wurde das beste Ergebnis erzielt und die Kondensatbildung konnte annähernd verhindert werden.

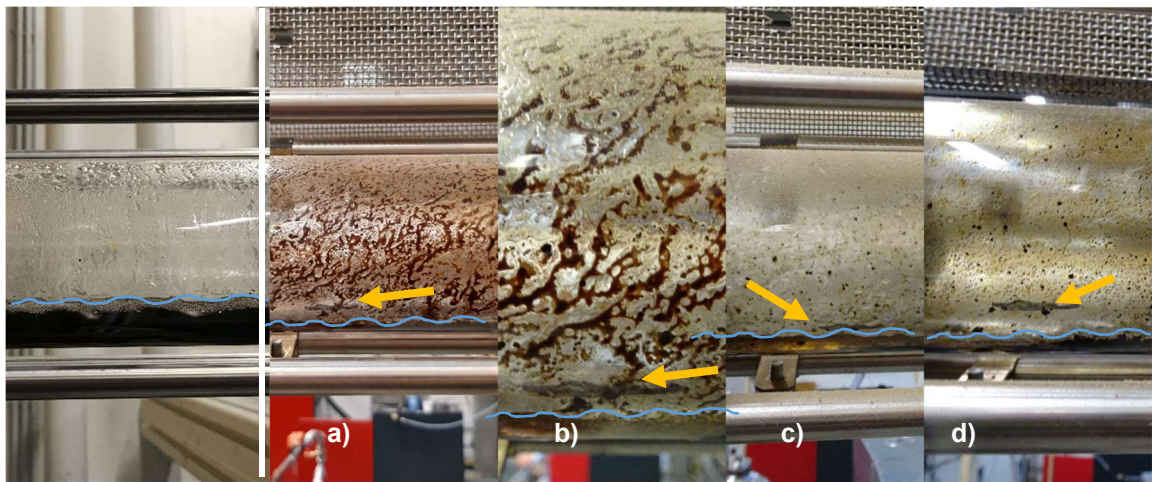


Abb. 2-63 Kondensatbildung am Schauglas in der Produktgasleitung – links: ohne Speichereinsatz; rechts: viermal bei unterschiedlichen Messfahrten mit verschiedenem Speichereinsatz a) PCM; b) PCM; c) LuVo; d) kombiniert

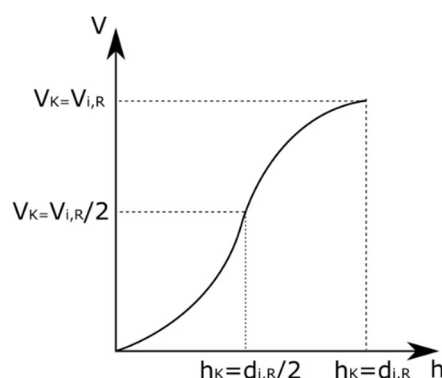


Abb. 2-64 Verlauf des Kondensatvolumens über der Schauglas-/Rohrhöhe

Der im Schauglas sichtbare Füllstand des Kondensates ist kein unmittelbares Maß für die dort vorhandene Kondensatmenge (Kondensatvolumen). Unter Berücksichtigung des Kreisquerschnittes des Rohres ergibt sich der nach Abb. 2-64 dargestellte Zusammenhang zwischen Füllhöhe h_K und Kondensatvolumen V_K . Daraus lässt sich abschätzen, dass sich die Kondensatbildung um etwa 60 bis 90 % reduzieren ließ durch den Einsatz der Wärmespeicher. Dies verdeutlicht die sehr positiven Auswirkungen der

Wärmespeicher auf das Anlagen-Betriebsverhalten trägt deutlich zur Verlängerung der Anlagenlebensdauer bei.

Als Fazit des Speichereinsatzes können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Effekte der Vorwärmung sind deutlich erkennbar und positiv zu bewerten.
- Anlagen-Startzeiten konnten reduziert werden (etwa um 1/3).
- Kondensatbildung beim Anlagenstart konnte drastisch reduziert, jedoch nicht gänzlich verhindert werden.
- Die eingesetzten Speicher verhalten sich im Anlagenbetrieb wie aus den Ergebnissen der vorhergehenden Validierungsmessungen erwartet.
- Bisher ist noch kein wirtschaftlicher Einsatz der Speicher möglich (Kosten-Nutzen-Verhältnis), da z.B. PCM zu teuer sind. Im Kontext der aktuellen Entwicklungen der Energiepreise, der daraus resultierenden verstärkten Nachfrage nach Wärmespeichern am Markt und der damit einhergehenden Kostensenkungen wird dies zukünftig wieder zu überprüfen sein.

10. Bewertung der Emissionen und Festlegung der Emissionsminderungstechnologie für den weiteren Versuchsbetrieb

Die in [1] beschriebenen Arbeiten zum Emissionsverhalten und zur Emissionsminderung bezüglich der Motorabgase wurden weitergeführt und vor allem in Bezug auf die Langzeiterfahrungen und Brennstoffvariationen ergänzt. Ebenso wurde die Abhängigkeit der Motorabgasemissionen von der Variation der Vergasungsmitteltemperatur untersucht.

Festlegung der emissionsoptimierten Motorfahrweise für weitere Untersuchungen

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

Die Auswirkungen beider Technologien auf einen dauerhaften, betriebssicheren und emissionsarmen Anlagenbetrieb müssen durch weitere Versuchsfahrten im Laufe der Projektarbeit bewertet werden. Die Emissionsminderungspotenziale der Vorzugsvariante werden während weiterer Versuchsfahrten untersucht. Mögliche Alterungseffekte der verwendeten Katalysatoren sollen aufgezeigt werden. Basis der Darstellung der Veränderungen im Emissionsverhalten ist die emissionsoptimierte Betriebsvariante „KAT-Strecke-Luft“ lt. Tab. 2-35.

Tab. 2-35 Emissionsminderungspotenzial der für den weiteren Versuchsbetrieb ausgewählten Emissionsminderungstechnologie

	ohne Minderungs- maßnahmen	Auslieferungs- zustand	KAT-Strecke- Luft (E2)
CO* [mg/m³]	2127	121	92
CO Reduzierung auf [%]	100%	5,7%	4,3%
NO _x * [mg/m³]	2274	861	371
NO _x Reduzierung auf [%]	100%	71,1%	16,3%
P _{el} [kW]	-30,5	-29,9	-29,4
P _{el} [Reduzierung auf %]	100%	98,0%	96,1%

*Angabe mit Bezug auf trockenes Gas und Normzustand sowie 5 Vol.-% Bezugssauerstoffgehalt

Betriebserfahrungen im weiteren Versuchsbetrieb

Die zuvor beschriebenen Emissionsminderungsmaßnahmen werden in den weiteren Versuchsfahrten beibehalten. Der erreichte Stand der Emissionsminderung wird hinsichtlich der dauerhaft erreichbaren Schadgaskonzentrationen im Motorabgas untersucht und mit dem Anlieferungszustand verglichen. Die Messfahrten zur Bewertung des Emissionsverhaltens wurden ausschließlich mit dem Brennstoff HHS durchgeführt.

Die erzielten Ergebnisse sind in Tab. 2-36 dargestellt. Die Spalte A1 stellt eine Fahrweise ohne jegliche Emissionsminderungsmaßnahmen dar, die Spalte B1 bezieht sich auf den Auslieferungszustand der Anlage, die Spalte E2 beschreibt die emissionsoptimierte Fahrweise lt. Tab. 2-35, die Spalten E2_a bis E2_g beschreiben die jeweiligen Versuchswiederholungen der emissionsoptimierten Fahrweise.

Tab. 2-36 Darstellung der über den Auswertezeitraum gemittelten Emissionen und erzeugten elektrischen Leistung der emissionsoptimierten Betriebsweise des BHKW

	A1	B1	E2	E2_a	E2_b	E2_c	E2_d	E2_e	E2_f	E2_g
CO* [mg/m ³]	2127	121	92	83	54	55	44	69	67	84
CO Reduzierung auf [%]	100%	5,7%	4,3%	3,9%	2,5%	2,6%	2,1%	3,2%	3,2%	4,0%
NO _x * [mg/m ³]	2274	1616	371	330	355	391	388	382	409	343
NO _x Reduzierung auf [%]	100%	71,1%	16,3%	14,5%	15,6%	17,2%	17,1%	16,8%	18,0%	15,1%
P _{el} [kW]	-30,5	-29,9	-29,4	-29,2	-29,3	-29,9	-28,9	-27,6	-28,0	-28,6
P _{el} Reduzierung auf [%]	100%	98,0%	96,1%	95,6%	95,7%	97,8%	94,4%	90,5%	91,7%	93,7%

*Angabe mit Bezug auf trockenes Gas und Normzustand sowie 5 Vol.-% Bezugssauerstoffgehalt

Die Darstellung in Tab. 2-36 zeigt, dass die CO-Emissionen während der weiteren Versuchsfahrten auf einem, zwar leicht schwankenden, niedrigen Niveau gehalten werden können. In Bezug auf die NO_x-Emissionen lässt sich ein ähnliches Verhalten feststellen. Vergleicht man die elektrische Leistung des BHKW, muss festgestellt werden, dass diese tendenziell geringer ausfällt, als noch zu Beginn der Untersuchungen. Die Komplexität der Versuchsanlage ist jedoch sehr hoch, so dass ein direkter Zusammenhang mit der emissionsoptimierten Fahrweise weder bestätigt, noch dementiert werden kann.

Neben der Darstellung der gemessenen Emissionen spielt sowohl das Alterungsverhalten der verwendeten Katalysatoren als auch der Wartungszustand der Anlage selbst eine Rolle beim Emissionsverhalten des Motors. In Tab. 2-37 sind die relevanten Anlagenparameter

- Betriebsstunden (absolut in h),
- das relative Alter der Gesamtanlage, bezogen auf die Messung B1 (B1 beschreibt den Auslieferungszustand der Anlage in Bezug auf die Emissionsminderungsmaßnahmen am Motor, Angabe in Tagen, relativ zur Messfahrt B1) sowie
- der Auswertezeitraum der angegebenen Zahlenwerte für die Emissionen bzw. die BHKW-Leistung (in hh:mm:ss)

dargestellt.

Tab. 2-37 Relevante Anlagenparameter zur Bewertung des zeitabhängigen Emissionsverhaltens und der BHKW-Leistung

B1	E2	E2_a	E2_b	E2_c	E2_d	E2_e	E2_f	E2_g
Betriebsstunden absolut in Stunden								
1392	1445	1472	1481	1495	1522	1536	1596	1611
Betriebsstunden relativ zu B1 in Stunden								
0	+ 53	+ 80	+ 89	+ 103	+ 130	+ 144	+ 204	+ 219
zeitl. Anstand zu B1 in Tagen								
0	+ 75	+ 131	+ 143	+ 167	+ 207	+ 222	+ 480	+ 503
Auswertezeitraum in hh:mm:ss								
01:59:53	01:25:03	01:59:53	07:00:06	08:29:55	06:29:54	10:59:59	12:59:43	06:30:03

Der Zeitraum der Untersuchungen des Emissionsverhaltens fand über eine Zeitspanne von über 500 Tagen ab der Festlegung des emissionsoptimierten Betriebs statt. In dieser Zeitspanne konnten keine negativen Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb festgestellt werden. Die Stabilität der ermittelten Zahlenwerte für die Emissionen und die BHKW Leistung wurde in teils bis zu 13 h langen Überwachungszeiträumen ermittelt. Auch das spricht für die eingesetzte Technologie und ihre dauerhafte Eignung, die BHKW Emissionen zu minimieren. Innerhalb des Untersuchungszeitraums wurden allerdings nur ca. 200 Betriebsstunden erreicht. Dies entspricht nicht den üblichen Laufzeiten bei Anwendung der Biomassevergasungstechnologie. Die Versuchsanlage wird lediglich zu geplanten Messfahrten betrieben und dient nicht zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen. Ein nächstes Ziel sollte sein, dass die hier erprobte Technologie dauerhaft in einer kommerziellen Anlage eingesetzt wird, um das zeitabhängige Verhalten der Anlage besser bewerten zu können.

Wie bereits in [1] dargestellt, eignen sich Kursdiagramme bei der Darstellung von teils stark schwankenden Messwerten, um ein Gefühl für den stabilen Anlagenbetrieb zu erlangen, der aus der reinen Darstellung der Mittelwerte nicht sichtbar wird. Ziel der folgenden Darstellung ist es auch, die Messfahrten untereinander zu vergleichen, ohne die Komplexität der Darstellung unnötig hoch anzusetzen.

In Abb. 2-65 sind, ausgehend vom Anlieferungszustand der Anlage, den werksseitig integrierten Emissionsminderungstechnologien am Motor und über die emissionsminimierte Fahrweise, die weiteren Messreihen dargestellt. Mit dargestellt ist der CO-Grenzwert lt. TA Luft 2002 [41] bzw. die Empfehlung der VDI 3461 [2]. Der werksseitig verbaute Oxidationskatalysator ist problemlos in der Lage, die CO-Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau zu halten. Die überstöchiometrische Fahrweise verhindert zudem Ausreißer nach oben. Durch die Veränderung der Motor-Fahrweise nehmen prozessbedingt die Schwankungen in den CO Emissionen zu, wobei diese Ausreißer bei keiner der Messfahrten zu einem Überschreiten der unterschiedlichen Grenzwerte führt. Der Mittelwert der CO-Emissionen kann dauerhaft unter dem Zahlenwert der CO-Emissionen im Auslieferungszustand gehalten werden.

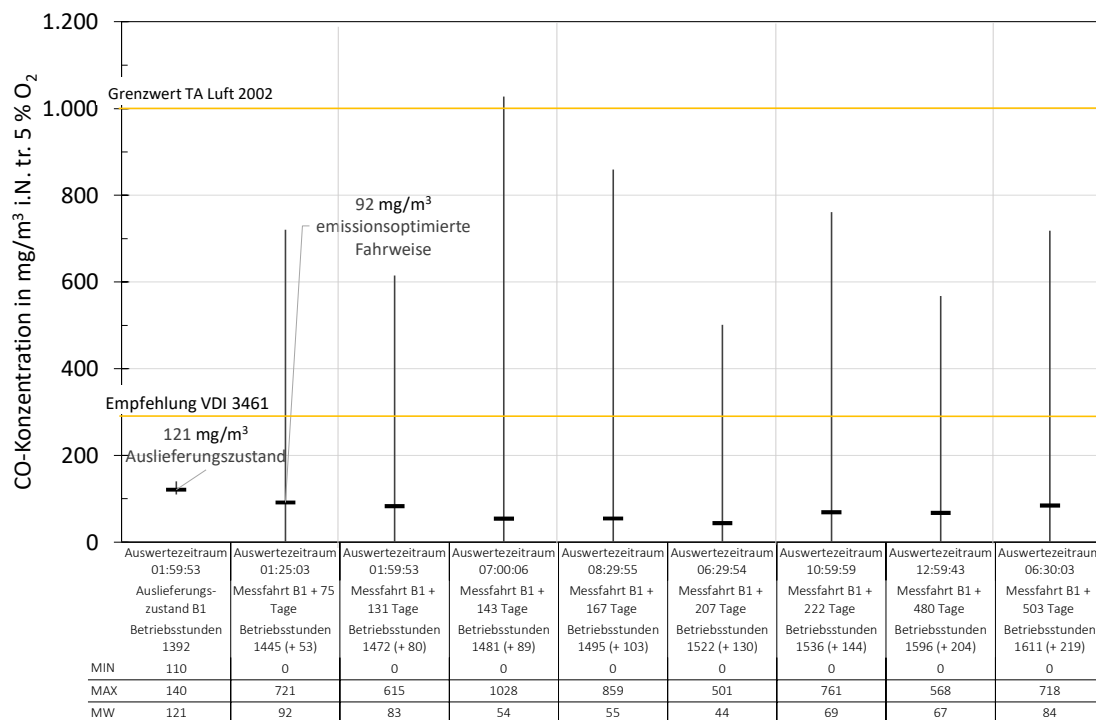


Abb. 2-65 CO-Emissionen Motorabgas – Langzeitverhalten

In Abb. 2-66 sind, ausgehend vom Anlieferungszustand der Holzvergasungsanlage und den werksseitig integrierten Emissionsminderungstechnologien am Motor, über die emissionsminimierte Fahrweise, die weiteren Messreihen dargestellt. Mit dargestellt ist der NO_x -Grenzwert lt. [41] bzw. die Empfehlung in [2]. Im Gegensatz zu den CO-Emissionen liegen die NO_x -Emissionen der werksseitigen Anlagenkonfiguration deutlich über den (nicht bindenden) Grenzwerten. Mithilfe der eingesetzten Emissionsminderungstechnologien konnten sowohl die Empfehlung [2] als auch der Grenzwert [41] dauerhaft unterschritten werden. Die Abweichungen vom Mittelwert fallen ebenfalls dauerhaft deutlich geringer aus, als im Auslieferungszustand der Anlage. Alterungserscheinungen am zusätzlich verbauten 3-Wege-Katalysator können im Rahmen der hier durchgeführten Versuchsfahrten nicht nachgewiesen werden.

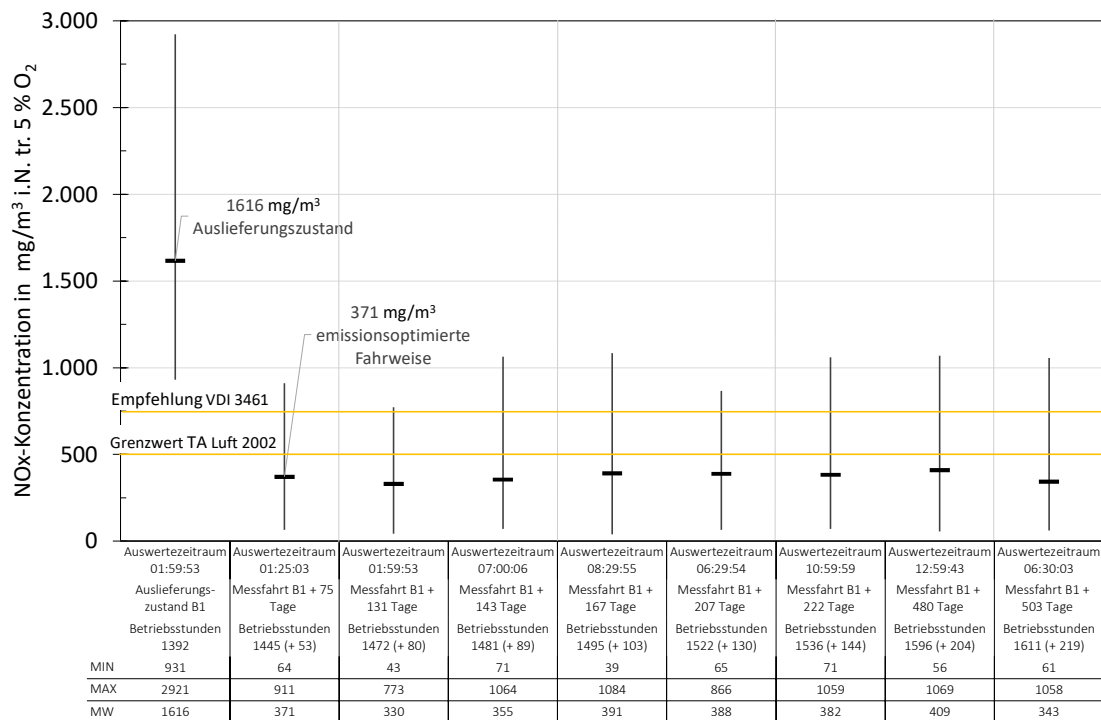


Abb. 2-66 NO_x-Emissionen Motorabgas – Langzeitverhalten

Im Gegensatz zu den positiven Langzeiterfahrungen in Bezug auf die gemessenen Motorabgasemissionen ist in Abb. 2-67 ersichtlich, dass die abgegebene elektrische Leistung des BHKW im Laufe der Zeit etwas geringer ausfällt. Nur ein einziges Mal fiel die mittlere elektrische Leistung mit -29,9 kW höher aus, als in der als Basis dienenden emissionsoptimierten Fahrweise mit -29,4 kW. Die Leistungsmittelwerte aller anderen Messfahrten lagen teils deutlich darunter. Auffällig ist insbesondere, dass die Schwankungen hin zu einer geringeren Leistungsabgabe deutlich zugenommen haben. Da die Gesamtanlage im Rahmen weiterer Untersuchungen – insbesondere im Bereich der Vergasung – modifiziert wurde, könnte auch dort der Grund für die geringere elektrische Leistung des BHKW liegen. Die Dauer der jeweiligen Messfahrt hingegen hat keinen Einfluss auf die elektrische Leistung.

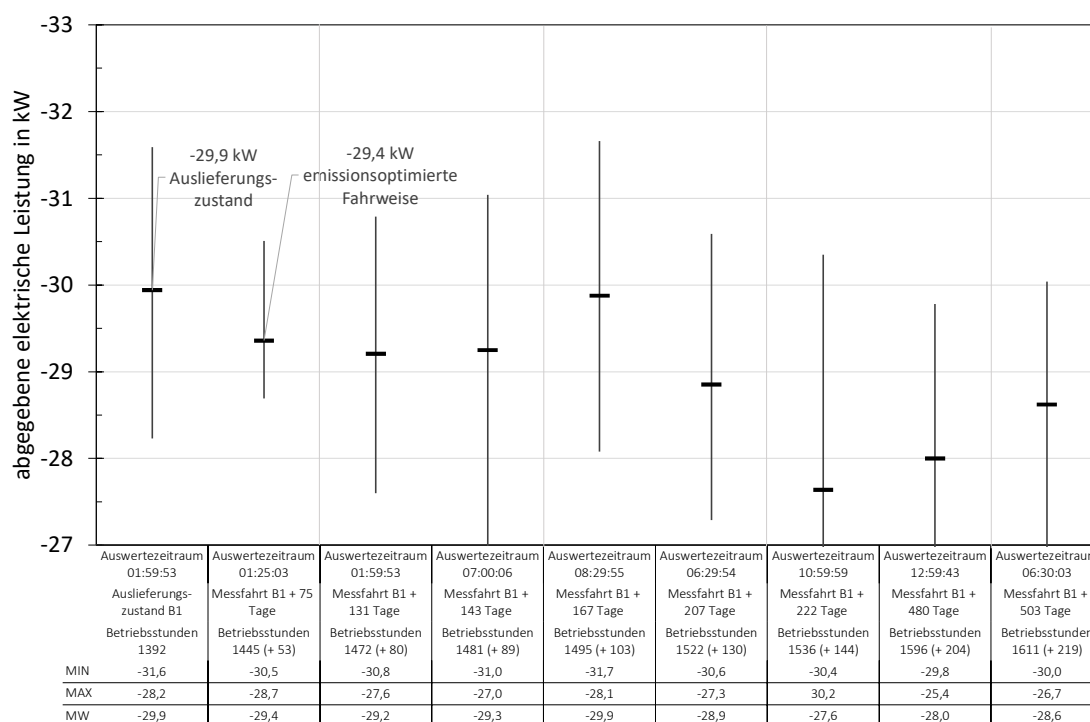


Abb. 2-67 Elektrische BHKW-Leistung – Langzeitverhalten

Einfluss alternativer Brennstoffe auf das Emissionsverhalten

Die hier untersuchte Biomassevergasungstechnologie findet in verschiedenen Branchen und Einsatzszenarien Anwendung. Damit einhergehend werden verschiedene Brennstoffqualitäten und Brennstoffe eingesetzt. Die bisherigen Untersuchungen in Bezug auf das Leistungs- und Emissionsverhalten der BHKW-Anlage bezogen sich ausschließlich auf den Brennstoff HHS. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden weitere Brennstoffe eingesetzt. Für den alternativen Brennstoff Landschaftspflegematerial (LPM) soll die Auswirkung auf das Emissionsverhalten am Motor untersucht und dargestellt werden. Die dabei zu beachtenden, grundlegenden Unterschiede in der Zusammensetzung der HHS und des eingesetzten LPM sind Tab. 2-17 im Kapitel Brennstoffvariationen zu entnehmen.

Im Versuch E2_a (Tab. 2-38 und Abb. 2-68) wurde zunächst der Brennstoff HHS eingesetzt und die resultierenden Motorabgasemissionen bewertet. In der zweiten Versuchsphase wurde der Brennstoff während des laufenden Betriebs auf LPM (E2_LPM) umgestellt. Die Messwerte und deren Verläufe sind in Abb. 2-68 ersichtlich.

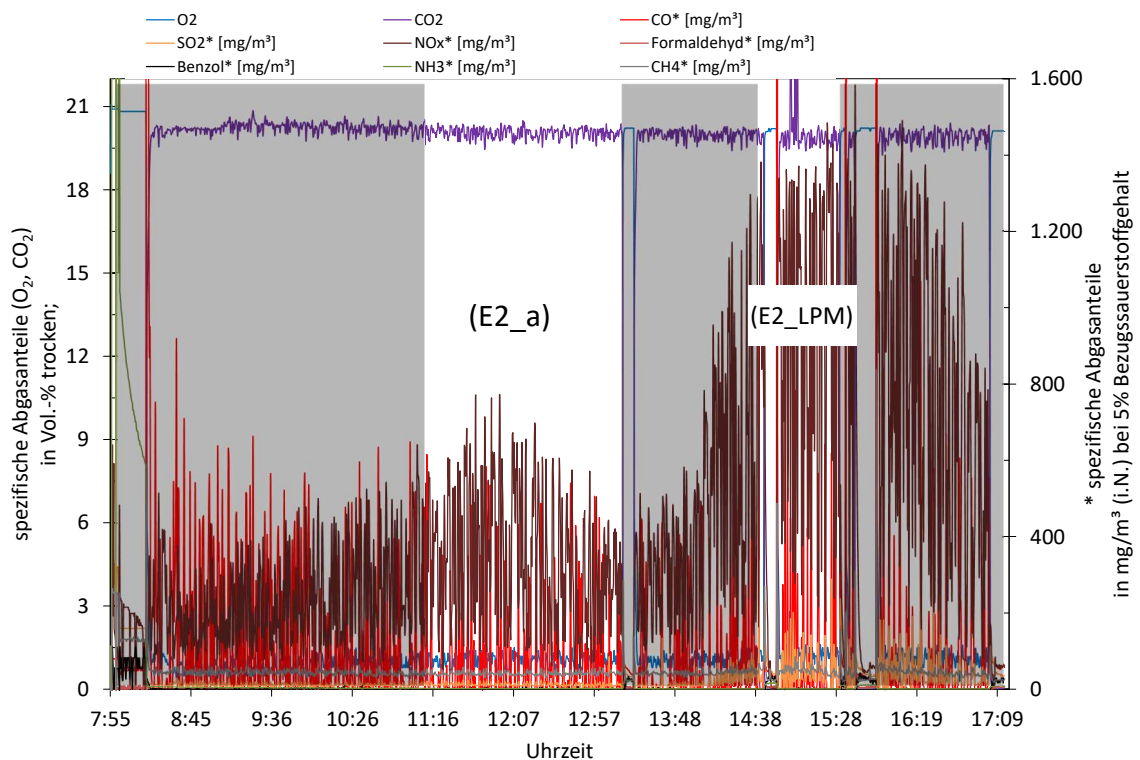


Abb. 2-68 Verlauf der Motorabgasemissionen bei Versuchsfahrt E2_a (HHS) und E2_LPM (Landschaftspflegematerial)

Für die Versuchsauswertung wurden folgende Zeitintervalle gewählt (Tab. 2-38):

Tab. 2-38 Zeitintervalle der Versuchsfahrten E2_a (HHS) und E2_LPM (Landschaftspflegematerial)

	E2_a	E2_LPM
Startzeit [hh:mm:ss]	11:10:02	14:40:05
Endzeit [hh:mm:ss]	13:09:55	15:29:57
Auswertzeit [hh:mm:ss]	01:59:53	00:49:52

Während des Versuchs mit LPM kam es zu einem kurzen Ausfall der Anlage. Bei der Bewertung der Emissionen und der BHKW-Leistung werden die damit verbundenen Messwerte verworfen, wodurch eine Auswertung trotz der Betriebsprobleme ermöglicht wird. Die Zeitspanne der Auswertung mit LPM ist aufgrund mehrerer Betriebsstörungen sehr gering, die Tendenzen aber klar erkennbar.

Die Bewertung der Emissionen und der elektrischen Leistung ergeben die Zahlenwerte in Tab. 2-39. Wie hier ersichtlich, steigen die NO_x -Emissionen stark an (+134 %). Ebenfalls stark steigend sind die CO-Emissionen (+21,8 %). Die elektrische Leistung des BHKW sinkt um ca. 4 %. Stichprobenartige Auswertungen weiterer Messfahrten mit alternativen Brennstoffen zeigen ein vergleichbares Ergebnis. Neben den verfahrenstechnischen Problemen bei Einsatz alternativer Brennstoffe weisen diese (im Rahmen der im Projekt gemachten Untersuchungen) deutlich höhere Emissionen (v.a. beim NO_x) auf. Die im Projekt entwickelte und eingesetzte Emissionsminderungstechnologie ist in Bezug auf die NO_x -Emissionen nicht in der Lage, diese unter den Grenzwert [41] bzw. unter die Empfehlung [2] zu senken. Weit weniger problematisch ist das Emissionsverhalten in Bezug auf CO. Zwar steigen auch hier die Emissionen an, jedoch nicht so stark, dass diese den Grenzwert überschreiten würden. Dies liegt in der wesentlich einfacheren Oxidationsreaktion des CO zu CO_2 , als die nur unter bestimmten Bedingungen ablaufende Reduktionsreaktion von NO_x zu N_2 und O_2 .

Tab. 2-39 Versuchsfahrt E2_a (HHS) und E2_LPM (Landschaftspflegematerial)

	E2_a			E2_LPM			Relative Veränderung		
Bezeichnung	NO _x *	CO*	P _{el}	NO _x *	CO*	P _{el}	NO _x	CO	P _{el}
Einheit	mg/m ³	mg/m ³	kW	mg/m ³	mg/m ³	kW			
MIN	43	0	-30,8	142	0	-29,8	+226%	-	-3,3%
MAX	773	615	-27,6	1484	1051	-23,6	+92,0%	+71,0%	-14,7%
MITTELWERT	330	83	-29,2	771	101	-28,2	+134%	+21,8%	-3,6%

*Angabe mit Bezug auf trockenes Gas und Normzustand sowie 5 Vol.-% Bezugssauerstoffgehalt

Neben LPM wurden in einer Messfahrt Macadamianussschalen eingesetzt. In einem Auswertzeitraum von ca. drei Stunden störungsfreiem Betrieb konnte ein vergleichbares Emissionsverhalten festgestellt werden. Die CO-Emissionen sind problemlos beherrschbar, die NO_x-Emissionen liegen dagegen weit über den Grenz- und Richtwerten. Auf eine ausführlichere Bewertung der Messfahrt mit Macadamianussschalen wird verzichtet, da diese lediglich mit der Werkskonfiguration der Emissionsminderungstechnologien durchgeführt wurde und keine Vergleichsbasis zur Verfügung steht.

Einfluss der Einbindung der Anlage in das Versuchsfeld und der Anlagenfahrweise auf das Emissionsverhalten

Neben der verwendeten Emissionsminderungstechnologie hat der Anlagenbetrieb und die Integration der Anlage in die Energieinfrastruktur eine entscheidende Rolle auf das Emissionsverhalten. Während CO-Emissionen davon nahezu unberührt bleiben, wirkt sich die Betriebstemperatur des Motors signifikant auf die NO_x-Emissionen aus. Wie in Abb. 2-69 ersichtlich gibt es einen direkten Zusammenhang der Temperaturen am Motoraustritt und den gemessenen NO_x-Emissionen. Da bei der motorischen Verbrennung in einem Motor thermisches NO_x der bestimmende Bildungsmechanismus ist, ist ein solcher Verlauf als typisch zu bezeichnen. Weitaus schwieriger ist die Identifikation der Ursache, die im Zusammenhang mit der Versuchsanlage auch in diesem Fall nicht zweifelsfrei ermittelt werden konnte. Es gibt gewisse Zusammenhänge mit der Motorkühlung, die jedoch nicht validiert werden können. Aus Abb. 2-69 ist jedoch klar der Trend zu erkennen, dass geringe Motoraustrittstemperaturen, die relativ leicht zu ermitteln und zu überwachen sind, tendenziell auch geringere NO_x-Emissionen mit sich bringen. Inwieweit sich diese beeinflussen lassen, hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab und wird beispielsweise durch die eingesetzten Wärmeübertrager sowie die für die Erfüllung der benötigten Energiedienstleistung hinreichend hohe Vorlauftemperatur der Wärmeversorgung limitiert.

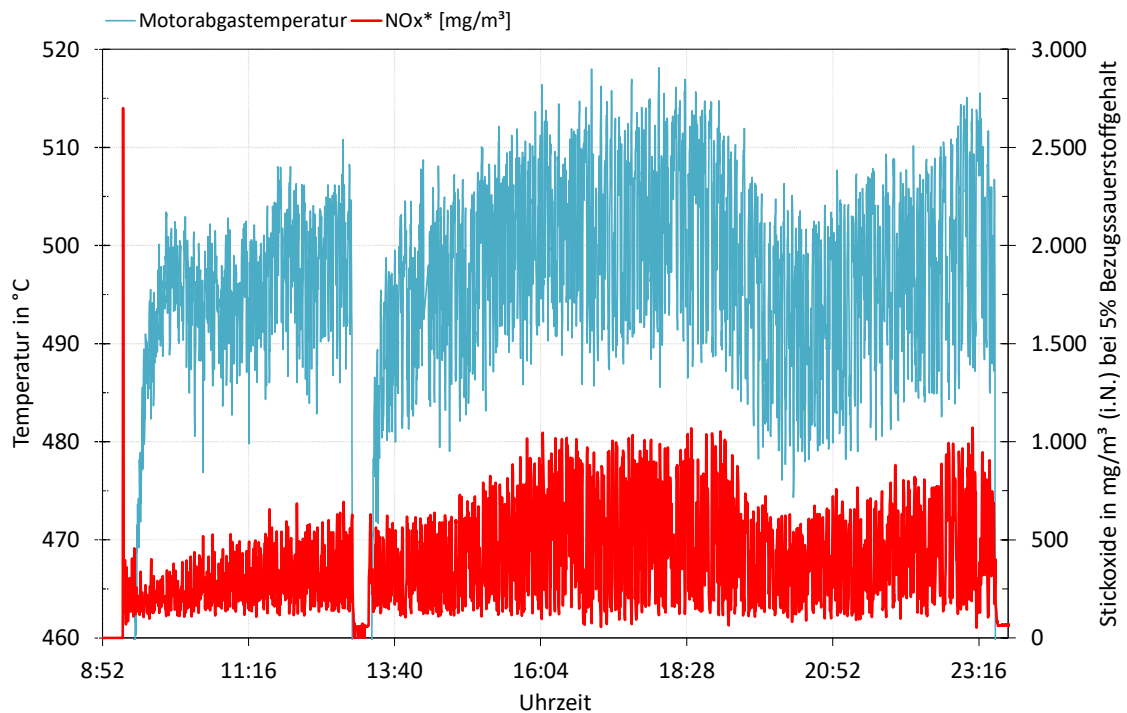


Abb. 2-69 Zusammenhang der Motorabgastemperatur und der gemessenen NO_x -Emissionen (Messfahrt E2_f)

In einem weiteren Versuch wurde die Temperatur des Vergasungsmittels variiert, um die Effizienz des chemischen Umsatzes in der Vergasungszone zu erhöhen. Die Temperatur wurde hierbei in drei Stufen variiert. Phase 1 beschreibt den üblichen Betriebszustand und es wird eine Vergasungsmitteltemperatur von ca. 180 °C erreicht. In Phase 2 wurde diese auf ca. 400 °C und in Phase 3 sogar auf ca. 580 °C erhöht. In Abb. 2-70 sind sowohl die Abgasemissionen für NO_x und CO als auch die Temperatur des Vergasungsmittels am Reaktoreintritt (T1206) sowie die sich daraus ergebende mittlere Wandtemperatur der Vergasungszone (Reformertemp. Mittelwert) dargestellt. Je weiter die Vergasungsmitteltemperatur gesteigert wird, umso höher fallen die NO_x -Emissionen aus. Besonders deutlich wird dies beim Übergang von Phase 1 zu Phase 2 um ca. 16:30 Uhr. Weniger deutlich, wenn auch trotzdem sichtbar, ist dies auch beim Wechsel zwischen Phase 2 und Phase 3 um 20:30 Uhr. Der sprunghafte Anstieg der Vergasungsmitteltemperatur setzt sich nicht direkt in eine gestiegene Reaktorinnentemperatur um, wenngleich der Einfluss deutlich zu erkennen ist. Offensichtlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Vergasungsmitteltemperatur und den NO_x -Emissionen des Motors, auch wenn eine allgemeingültige Aussage dahingehend nicht getroffen werden kann, welche Temperaturänderung welche Veränderung der NO_x -Emissionen hervorruft. Der in der Theorie beschriebene positive Einfluss der Vergasungsmitteltemperatur auf die Effizienz der Vergasung führt offenbar zu einer negativen Beeinflussung der NO_x -Emissionen, während die CO-Emissionen davon unberührt bleiben.

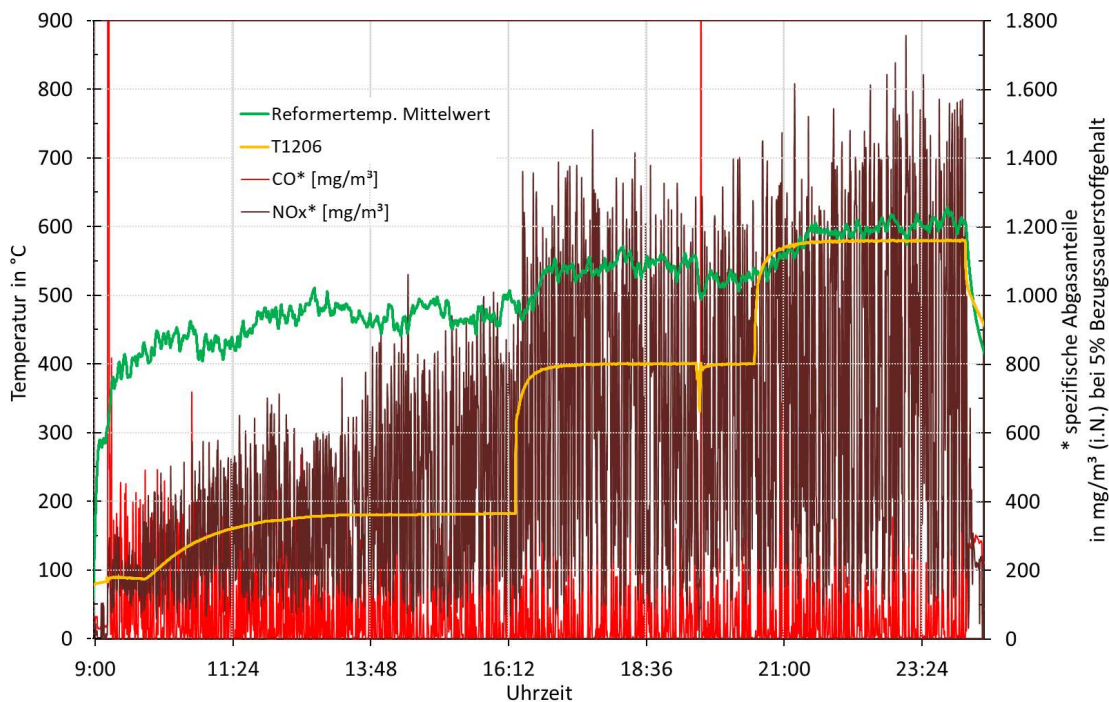


Abb. 2-70 Motorabgasemissionen in Abhängigkeit von der Vergasungsmitteltemperatur

Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz einer nachgeschalteten KAT-Strecke mit Zwischenlufteindüsung in Kombination mit einer Abgasrückführung beim Standardbrennstoff HHS ein hohes Potenzial im Bereich der Minderung von NO_x hat. Für die Emissionen von CO kann ebenfalls ein positives Fazit gezogen werden. Zwar schwanken die Zahlenwerte mehr als in der Werkskonfiguration, im Mittel liegen sie jedoch auch unter diesen. Die hierdurch erreichten Abgaskonzentrationen liegen im Mittel dauerhaft unter den Grenzwerten nach [41] bzw. unter den Empfehlungen aus [2] und stellen einen deutlich umweltschonenderen Betrieb der Biomassevergasungsanlage dar. Mit dem Betrieb der nachgeschalteten KAT-Strecke ist für die Oxidationsreaktion des CO eine Sauerstoffquelle notwendig. Diese wird durch Eindüsung von Umgebungsluft mittels Drehschieberverdichter realisiert. Der zusätzliche Elektroenergiebedarf von ca. 1 kW, verbunden mit den tendenziell etwas verringerten BHKW-Leistung, muss negativ bewertet und in weiteren Forschungsarbeiten optimiert werden. Insgesamt stellt dies aber kein Ausschlusskriterium der Einsatztauglichkeit der emissionsmindernden Umbauten dar. Für den Einsatz von alternativen Brennstoffen genügen diese Maßnahmen in Bezug auf NO_x jedoch nicht. Ob z.B. ein SCR-System mit Harnstoffeinspritzung die hierfür notwendigen Minderungspotenziale ausweist, sollte Gegenstand der weiteren Forschung sein. Die Emissionen von CO können jedoch mit den hier vorgeschlagenen Veränderungen am Motor sicher beherrscht werden.

Die Langzeitversuche haben gezeigt, dass eine sichtbare Verschlechterung des Emissionsverhaltens bei weit auseinanderliegenden und langen Messfahrten mit dem Standardbrennstoff nicht festgestellt werden kann. Aufgrund des reinen Versuchsbetriebs können jedoch noch keine Rückschlüsse auf z.B. die Alterung der Katalysatoren bei Anlagen, die im Dauerbetrieb fahren, gemacht werden. Hierfür werden die Umrüstung und turnusmäßige Überwachung einer Anlage im kommerziellen Betrieb vorgeschlagen.

Die Bewertung und Beeinflussung der Motorabgasemissionen ist ein hoch komplexer Vorgang und wird durch das Gesamtsystem beeinflusst. Wie dargestellt, sind die NO_x -Emissionen u.a. abhängig von der Temperatur des Vergasungsmittels. Im Zuge einer emissionsoptimierten Fahrweise von Biomassevergasungsanlagen mit BHKW sollten diese Betriebsparameter mit einbezogen und optimiert werden. Allgemeingültige Handlungsempfehlungen abzuleiten ist Bedarf weiterer Forschung.

11. Stoff- und Energiestrombilanzierung

Bilanzierung einer Beispielmessfahrt

Für die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme wurden Daten des Versuches vom 21.12.2021 verwendet und über einen gewählten Zeitraum von drei Stunden im stationären Zustand gemittelt. Dieser Versuchszeitraum war schon Gegenstand der Betriebsvariation der Vergasungsmitteltemperatur und kennzeichnet den Referenzzustand der Anlage. Im Gegensatz zur Konzentration ausschließlich auf den Reaktor innerhalb der Vergasungsmittelvariation wird hierbei die Gesamtanlage als Bilanzraum für die Stoff- und Energiestrombilanzierung berücksichtigt.

Die Berechnung der Massenströme der gasförmigen Medien erfolgte über den Volumenstrom und die Dichte im Normzustand. Es wurden, wie in Abb. 2-71 dargestellt, entsprechend der Bilanzgrenze die jeweiligen Stoffmassenströme 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. Unter Berücksichtigung dieser Abweichungen konnte schließlich eine Bewertung der Messdatenerfassung und -auswertung erfolgen und eventuelle Unsicherheiten detektiert werden.

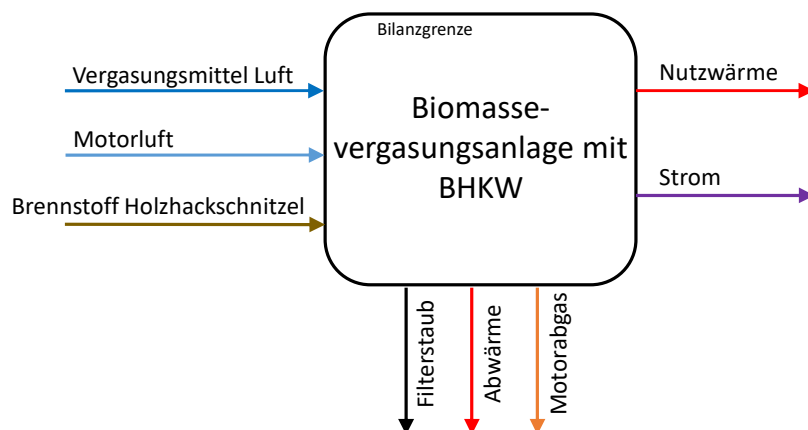


Abb. 2-71 Bilanzraum zur Stoff- und Energiestrombilanzierung

In Tab. 2-40 sind die für eine Bilanzierung notwendigen Messdaten, die daraus berechneten weiteren Versuchsparameter sowie die dem Versuch zuzuordnenden Ergebnisse der Laboranalysen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 2-40 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten

Parameter	KKS	Wert	Einheit	Datenherkunft
Brennstoff (HHS)				
Massenstrom	F1402	27,9	kg/h	Messung/Berechnung
C		50,26	Ma.-% TS	Laboranalyse
H		6,32	Ma.-% TS	Laboranalyse
N		0,01	Ma.-% TS	Laboranalyse
S		0,01	Ma.-% TS	Laboranalyse
O		43,0	Ma.-% TS	Berechnung
Heizwert		18,3	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Wassergehalt		2,6	Ma.-%	Laboranalyse
Aschegehalt		0,44	Ma.-% TS	Laboranalyse
Vergasungsmittel (Luft)				
Volumenstrom	F1202	41,19	m³/h	Messung
Massenstrom		43,91	kg/h	Berechnung
Temperatur	T1202	66,40	°C	Messung
Thermische Energie		0,51	kW	Berechnung
Produktgas				
Volumenstrom	F1101	84,45	m³/h	Messung
Massenstrom		68,52	kg/h	Berechnung
Temperatur	T1107	91,38	°C	Messung
Zusammensetzung	Q1106			
O₂		0,0	Vol.-%, tr.	Messung
CO		22,8	Vol.-%, tr.	Messung
CO₂		7,9	Vol.-%, tr.	Messung
CH₄		2,5	Vol.-%, tr.	Messung
H₂		15,8	Vol.-%, tr.	Messung
H₂O		8,8	Vol.-%	Messung
Heizwert		4,62	MJ/kg	Berechnung
Motorluft				
Massenstrom	F2203	81,81	kg/h	Messung
Massenstrom inkl. AGR	F2202	102,77	kg/h	Messung
Temperatur	T2201	35,12	°C	Messung
Thermische Energie		0,25	kW	Berechnung
Elektrische Energie				
Eigenbedarf Vergaser	E1703	1,31	kW	Messung
Eigenbedarf BHKW	E2701	0,13	kW	Messung
Netzeinspeisung	E2702	28,59	kW	Messung
Wärme				
Nutzwärmeleistung Vergaser	U1601	10,41	kW	Messung
Nutzwärmeleistung BHKW	U1602	60,12	kW	Messung
Filterstaub				
Massenstrom	Q1502	0,53	kg/h	Messung
Heizwert		26,3	MJ/kg	Laboranalyse/Berechnung
Aschegehalt		20,0	Ma.-% TS	Laboranalyse
Motorabgas				
Volumenstrom inkl. AGR	F2301	220,46	m³/h	Messung
Massenstrom inkl. AGR		159,15	kg/h	Berechnung
Massenstrom		138,18	kg/h	Berechnung
Temperatur	T2315	148,50	°C	Messung
Zusammensetzung*	Q2313			
O₂		0,91	Vol.-%, tr.	Messung
CO₂		20,11	Vol.-%, tr.	Messung
H₂O		13,73	Vol.-%	Messung
N₂		67,78	Vol.-%	Berechnung
Thermische Energie		5,04	kW	Berechnung

*betrifft nur die zur Bilanzierung relevanten Stoffströme

In Tab. 2-41 sind die Stoffstrombilanzen um die Gesamtanlage (Vergaser und BHKW) aufgestellt. Bezüglich der Abweichungen der Stoffstrombilanzen ist erkennbar, dass Abweichungen der einzelnen Elementbilanzen von 8 bis 28 % auftraten. Die Schwefelbilanz weist sogar einen Fehler von 77 % auf, deren Ursache bisher nicht geklärt werden konnte. Jedoch ist dabei zu beachten, dass die absoluten Schwefelmengen im Vergleich zu den anderen Stoffströmen sehr gering sind und nicht alle evtl. vorhandenen Schwefelverbindungen im Motorabgas (H_2S) erfasst werden konnten. Die Abweichung der Aschebilanz von 14 % weist auf eine Ungenauigkeit am Sammelbehälter des Filterstaubes oder auf eine Ansammlung des Filterstaubes innerhalb der Anlage (z.B. Gewebefilter, Transport- und Übergabesystem) für den Zeitraum der Versuchsphase hin. Diese Abweichung hat ebenfalls Auswirkung auf die Kohlenstoffbilanz, da der Kohlenstoff den massebezogenen Hauptanteil am Filterstaub darstellt und ebenfalls eine positive Bilanzabweichung von 24 % aufweist. Maßgebliche Unterschiede sind auch bei der Wasserstoffbilanz festzustellen. So lag deren Abweichung bei 28 %. Mögliche Fehlerquellen bei der Ermittlung der Stoffstromwerte sind u.a. bei den Probenahmen der Feststoffe, Laboranalysen sowie Messtechnik vorhanden. Die damit verbundenen Unsicherheiten müssen bei der Datenbewertung berücksichtigt werden, sodass daher die Gesamtmassebilanz mit einer eher geringen Abweichung von 9,7 % als belastbar eingeschätzt wird.

Tab. 2-41 Daten der Stoffstrombilanz in kg/h

Stoffströme	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Filterstaub	Motorluft	Motorabgas	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Kohlenstoff	13,65	0,00	-0,40	0,00	-9,95	3,31	24,2%
Wasserstoff	1,80	0,00	0,00	0,00	-1,30	0,50	27,6%
Sauerstoff	12,31	10,23	-0,02	19,05	-37,99	3,58	8,6%
Stickstoff	0,00	33,68	0,00	62,76	-88,94	7,50	7,8%
Schwefel	0,003	0,00	-0,001	0,00	$-2 \cdot 10^{-6}$	0,002	77,2%
Asche	0,12	0,00	-0,10	0,00	0,00	0,02	13,8%
Gesamtmasse	27,89	43,91	-0,53	81,81	-138,2	14,90	9,7%

In Tab. 2-42 ist die Energiestrombilanz um die Gesamtanlage (Vergaser und BHKW) aufgestellt. Unter dem Punkt Verluste sind die Konversionsverluste des Motor- und Generatorprozesses gemäß Datenblatt zusammengefasst. Bezüglich der Abweichung der Energiestrombilanz ist erkennbar, dass eine Abweichung der Energiebilanz von absolut 25 kW bzw. relativ 18 % ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum eintretenden Energiestrom ein um 18 % niedrigerer Energiestrom die Gesamtanlage verlässt. Da die im Bilanzraum auftretenden Oberflächenwärmeverluste an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion bilanztechnisch nur eingeschränkt erfasst werden können, bilden diese vermutlich den hauptsächlichen Anteil am Bilanzfehler der Messfahrt. In [6] wurden exemplarisch die entsprechenden Wärmeverluste untersucht und aufgeführt. Für die dort untersuchte Messfahrt ergab sich beispielsweise ein Gesamtwärmeverlust der Bauteiloberflächen von ca. 11 kW.

Tab. 2-42 Daten der Energiestrombilanz in kW

Energieströme	Brennstoff	Vergasungs- mittel	Filterstaub	Motorluft	Strom (netto)	Wärme	Motorabgas	Verluste	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Chemisch	141,74	0,00	-3,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Thermisch	0,00	0,51	0,00	0,25	0,00	-70,54	-5,04	-10,62		
Elektrisch	0,00	0,00	0,00	0,00	-27,15	0,00	0,00	0,00		
Energiebilanz	141,74	0,51	-3,87	0,25	-27,15	-70,54	-5,04	-10,62	25,28	17,7%

Graphische Darstellung der Bilanzierungsergebnisse

Die in Tab. 2-41 aufgeführten Daten für die Stoffstrombilanz sind im nachfolgenden Sankey-Diagramm (Abb. 2-72) visuell veranschaulicht. Der absolute Wert der Bilanzabweichung um die jeweilige Komponente ist im Sankey-Diagramm als Bilanzfehler-Strom gekennzeichnet.

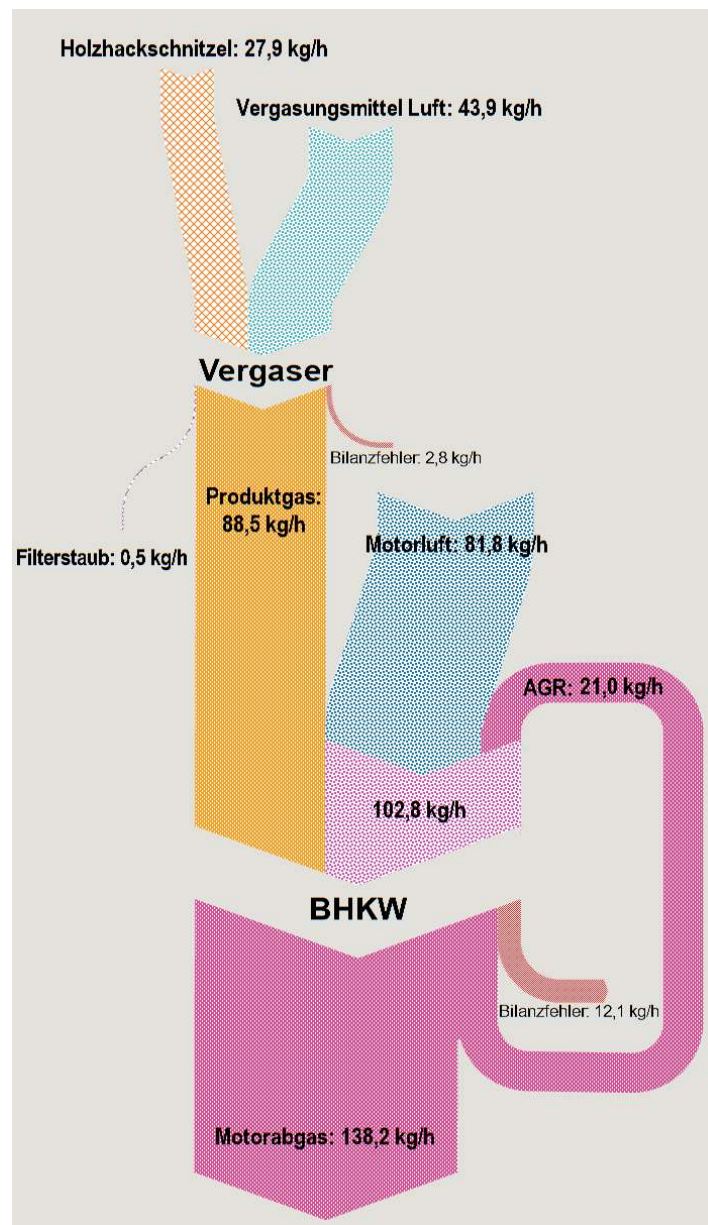


Abb. 2-72 Stoffstrombilanzierung der Gesamtanlage mittels Sankey-Diagramm

Die in Tab. 2-42 aufgeführten Daten für die Energiestrombilanz sind im nachfolgenden Sankey-Diagramm (Abb. 2-73) visuell veranschaulicht. Der absolute Wert der Bilanzabweichung um die jeweilige Komponente ist im Sankey-Diagramm wieder als Bilanzfehler-Strom gekennzeichnet. Die Abweichungen in Abb. 2-73 werden vor allem mit der messtechnisch bedingten unzureichenden Erfassung der Wärmeverlustströme über die Bauteiloberflächen (Strahlung, Konvektion) begründet.

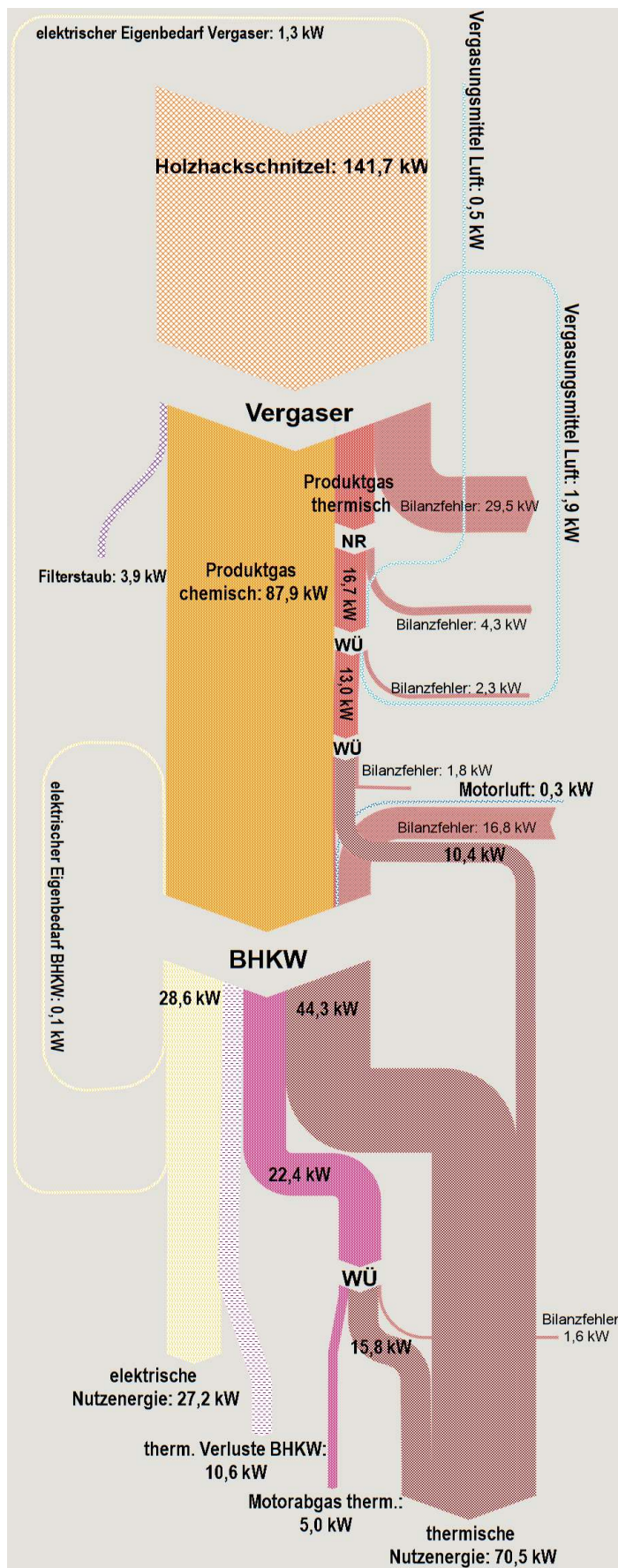


Abb. 2-73 Energiestrombilanzierung der Gesamtanlage mittels Sankey-Diagramm

Ermittlung der Kennwerte für die Beispielmessfahrt

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

Der **Kaltgaswirkungsgrad** beschreibt nach [34] 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 zur Verfügung gestellten (eingespeisten) elektrischen Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten chemischen Energie an. Der **Nutzwärmegrad** zeigt das Verhältnis der genutzten thermischen Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten chemischen 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. 2-43 aufgeführten technischen Kennwerte der zuvor beschriebenen Messfahrt verwendet.

Tab. 2-43 Zusammenstellung ausgewählter technischer Kennwerte

Parameter	Wert
Brennstoffleistung	141,7 kW
Chemische Produktgasleistung	87,9 kW
Nutzwärmeleistung	70,5 kW
Elektrische BHKW-Leistung	28,5 kW

Die entsprechend aus den technischen Parametern berechneten Bewertungskriterien der Beispielmessfahrt sind in Tab. 2-44 aufgeführt. So ergab sich für den Auswertungszeitraum ein Kaltgaswirkungsgrad von 62 % und ein Brennstoffausnutzungsgrad von 70 %.

Tab. 2-44 Zusammenstellung der berechneten Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Wert
Kaltgaswirkungsgrad	62 %
Elektrischer Anlagenwirkungsgrad	20 %
Nutzwärmegrad	50 %
Brennstoffausnutzungsgrad	70 %

2.3.2 Vergleich zu Fortschritten bei anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen

Im Folgenden werden bekannte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich der hier bearbeiteten Themenschwerpunkte (Biomassevergasung, Rest- und Abfallstoffe, thermische Energiespeicherung) aufgeführt und der grundlegende Zusammenhang dargestellt.

Im Kontext möglicher alternativer Verwertungsverfahren von Rest- und Abfallstoffen, aber auch hinsichtlich der Produktion von biogenem Wasserstoff, stehen thermochemische Verfahren wie Pyrolyse oder Vergasung im Zentrum vielfältiger Forschungsaktivitäten von Industrie und Wissenschaft. So stellt aus Sicht von [42] die thermochemische Vergasung von Biomasse und End-of-Life Kunststoffen mit nachfolgender Synthese von chemischen Grundstoffen wie z.B. Methanol eine Möglichkeit dar, die bisher Kohlenwasserstoff-basierte chemische Industrie mit nicht-fossilem Kohlenstoff zu versorgen. Insbesondere bei der Verwendung von Sauerstoff als Vergasungsmittel ergeben sich Synergien und Flexibilisierungsoptionen im Zusammenspiel mit einer (Hochtemperatur-)Elektrolyse. Jedoch beziehen sich diese Überlegungen eher auf großtechnische Anlagen in zentraler Anwendung.

Im Jahr 2021 eröffneten in Lindlar der Bergische Abfallwirtschaftsverband sowie die TH Köln ein Thermo-Chemisches Forschungszentrum [43]. Gemeinsam mit einer Anlage für Hydrothermale Karbonisierung bilden eine Pyrolyse- und eine Vergasungsanlage die entsprechende Forschungsinfrastruktur. Die Techniken bieten die Möglichkeit, innovative Verwertungswege zu erforschen und insbesondere neue Reststoffströme in den Blick zu nehmen. Neben biogenen Reststoffen sollen die Anlagen in weiteren Forschungsprojekten außerdem Kunst- und Verbundstoffe sowie mineralische Reststoffe verwerten. Im besten Falle könnten aus den Reststoffen Energie und Nebenprodukte gewonnen und wiederum Sekundärrohstoffe produziert werden.

Bei den Herstellern kleintechnischer Biomassevergasungsanlagen wird weitgehend versucht, jeweilige Detail- und Anwendungsprobleme grundsätzlich unterschiedlicher Ansätze wie die absteigende Vergasung (z.B. Spanner Re² GmbH) und aufsteigende Vergasung (z.B. Burkhardt GmbH) zu lösen. Daneben wurden in den letzten Jahren auch im kleinen Leistungsbereich zweistufige Vergasungsverfahren (z.B. Stadtwerke Rosenheim, SynCraft GmbH, LiPRO Energy GmbH & Co. KG) entwickelt und sind auf dem Markt verfügbar. Außerdem wurde die Entwicklung eines Vergaserprototypen der MFC Multifuel Conversion GmbH bekannt. Dieser Prototyp ist aufgrund seiner Ausführung und zusätzlicher mechanischer Komponenten in der Lage, Brennstoffe über ein Festbett-Gleichstrom-Vergasungsverfahren umzusetzen, die einen – im Vergleich zu Holz – niedrigen Asche-Schmelz-Temperaturbereich und relativ hohe Aschegehalte aufweisen. Durch die Zusammenarbeit der HSZG mit der Fa. MFC konnte dieser Prototyp als weiterer Vergasungsversuchsstand in das TCV integriert und im Projekt HORA, z.B. für Einsatztest von Strohpellets, genutzt werden.

Es wurden Forschungsprojekte identifiziert, die eine thematische Ähnlichkeit aufweisen. Ersichtlich sind dabei die thematischen Schwerpunkte hinsichtlich Einsatz alternativer Brennstoffe, der Verwertungsoptionen fester Vergaserrückstände und der Produktgasaufbereitung zu Synthesegas. So laufen derzeit zwei Forschungsprojekte des DBFZ (GASASH; KeVergAv), die in Zusammenarbeit mit Anlagenherstellern die Einsatzeignung von Reststoffen (Landschaftspflegematerial, Stroh, Gärreste) in marktverfügbaren Anlagen untersuchen. Auch die TU München (PyroGas) und die Universität Stuttgart (Bio2SNG) erproben die Vergasung von Rest- und Abfallstoffen in Versuchsanlagen. Die BtX Energy GmbH und A.H.T. Syngas Technology N.V. wiederum haben das gemeinsame Forschungsvorhaben „BiDroGen“ gestartet. Ziel dieses Projektes ist es, den Wasserstoffgehalt des aus Pellets produzierten Holzgases durch

den Einsatz von Shift-Katalysatoren zu maximieren. Auf diese Weise soll hochreiner Wasserstoff aus pelletiertem Restholz gewonnen werden.

- BiDroGen - Wirtschaftliche, dezentrale und mobile Herstellung von Grünem Wasserstoff aus dem Unterkorn (< 20mm) von der pelletierten Industrierestholzverwertung in einer Containerlösung, FKZ 03EI5438, BtX energy GmbH, 2022-2024
- KeVergAv - Brennstoffspezifische Kennzahlen zum Vergasungs- und Ascheverhalten unterschiedlich aufbereiteter Holz- und Stroh brennstoffe, FKZ 03EI5416, DBFZ, 2021-2023
- Bio2SNG - Innovatives Hochdruck-Vergasungsverfahren zur effizienteren Konversion biogener Rest- und Abfallstoffe zu nachhaltigem Bio-SNG (Synthetic Natural Gas) und kostengünstig integrierbarem Power-to-Gas, FKZ 03EI5422, Universität Stuttgart, 2020-2023
- AlthRO - Bioenergie aus Altholzvergasung in Kraft-Wärme-Kopplung, FKZ 03EI5414, Stadtwerke Rosenheim, 2020-2023
- BioBrick - Biomasse als Schlüssel für eine nachhaltige Produktion von Ziegeln – Energieversorgung, Erzeugung von Prozesswärme und stoffliche Verwertung von Vergaserrückständen, FKZ 03EI5410, Fraunhofer UMSICHT, 2020-2022
- OpToKNuS - Optimierungs-Toolbox mit Kinetischer Numerischer Simulation, FKZ03KB163, HS Hof, 2020-2022
- PyroGas - Dezentrale Verwertung von Abfall- und Reststoffen mittels Pyrolyse und anschließender Flugstromvergasung zur gasmotorischen Nutzung (KWK), FKZ 03KB158, TU München, 2019-2021
- VergaFlex - Flexibilisierung der Biomassevergasung durch Nutzung des Vergaserkokses als Biomaterial für die stoffliche Verwertung und als Brennstoff für Kleinstvergaser, FKZ 03KB157, DBFZ, 2019-2022
- GASASH - Thermo-chemische Konversion von Reststoffen in einem Vergaser-BHKW mit gekoppelter Aschegewinnung, FKZ 03KB139, DBFZ, 2018-2021
- VergaOpt - Mittel- und langfristige Sicherung des Holzvergaseranlagenbestandes und Beitrag zu dessen weiterem Ausbau durch Erschließung preiswerter Brennstoffsortimente, FKZ 03KB135, DBFZ, 2017-2020
- stROhgas - Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von asche- und chlorhaltiger Biomasse am Beispiel Stroh, FKZ 03KB085, DBFZ, 2013-2018

Hinsichtlich der Anwendung der Festbett-Gleichstrom-Vergasung bei der Verwertung von EPS (Styropor) aus Wärmedämmverbundsystemen entwickelt die RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit der ecoloop GmbH derzeit einen Verfahren zur Aufbereitung und Vergasung dieser Kunststoffabfälle in einem Holz-Kalk-Festbett [44].

Darüber hinaus wird im von der niederländischen B.T.G. Biomass Technology Group BV koordinierten EU-Forschungsprojekt SmartCHP (Grant agreement ID: 815259, Laufzeit 2019-2023) ein neues KWK-System für biogene Reststoffe entwickelt. Auch RWE hat eine Versuchsanlage (Multi-Fuel-Conversion-Anlage (MFC)) auf Basis der Vergasungstechnologie, in der Gemische von Klärschlamm, Klärschlamm asche und Braunkohle hohen Temperaturen um 1.500 °C und starkem Sauerstoffmangel ausgesetzt werden, in 2021 in Betrieb genommen [45].

Auf dem Gebiet der Entwicklung thermischer Energiespeicher wird an zahlreichen Forschungseinrichtungen in Deutschland gearbeitet, dazu zählen maßgeblich das

Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) am Standort Garching, das Fraunhofer-Institut UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg, das DLR in Stuttgart und viele Weitere. Eine Beobachtung aller dieser Forschungsaktivitäten ist nicht möglich und auch nicht erforderlich, da hier im Projekt HORA Wärmespeicher für einen speziellen Einsatzzweck entwickelt und erprobt wurden, nämlich für die Verbesserung des Betriebsverhaltens einer Biomassevergasungsanlage. Ein Forschungsprojekt mit vergleichbarem Ziel wurde während der Bearbeitung nicht bekannt.

Sensible Hochtemperatur-Wärmespeicher – hier konkret der LuVo-Speicher – stellen im Grunde den Stand der Technik dar, keramische Platten wie hier verwendet oder andere feste Speichermedien (Ziegel, Schamotte, Beton u.a.) sind marktverfügbar. Die Entwicklungsaufgabe besteht in der Anpassung der Speicherparameter (Wärmeinhalt, Speicherleistung, Temperaturniveau) an das wärmetechnische System, in das der Speicher integriert werden soll und ist damit projektspezifisch.

Ebenso verhält es sich mit Latentwärmespeichern in Rohrbündelbauweise, auch hier steht die systemische Integration im Mittelpunkt der Entwicklungsaufgabe. Die Adaptierung der Rohrbündel-Wärmeübertrager-Technologie ist nach wie vor ein geeigneter Weg zur erfolgreichen Entwicklung kapazitäts- und leistungsoptimierter Latentwärmespeicher unter Anwendung kostengünstiger Fertigungstechnologien. Rohrbündel-Latentwärmespeicher sind mittlerweile auch bedingt marktverfügbar, das Fachgebiet Technische Thermodynamik hat z.B. im Verlaufe des Projektes derartige Speicher der Bautzener Firma BME Dr. Golbs & Partner und des Jenaer Unternehmens Jekusol GmbH im ZKWL untersucht. Diese Speicher waren jedoch für einen Einsatz an der Biomassevergasungsanlage aufgrund deren spezifischer Betriebsparameter nicht geeignet.

Die Beobachtung der Aktivitäten anderer Forschungseinrichtungen und Unternehmen zeigt, dass auch weiterhin sehr intensiv an der Verkapselung von PCM in Kunststoffen (Kugeln, Platten, Sticks, Beutel, ...) gearbeitet wird, um auf dieser Basis sog. hybride Wärmespeicher zu entwickeln. Hybrid-Wärmespeicher kombinieren die hohe Leistung eines sensiblen Warmwasserspeichers mit dem Wärmeinhalt der Latentwärmespeicher. Auch auf diesem Gebiet erfolgte und erfolgt die Zusammenarbeit mit Unternehmen der Region Oberlausitz, so z.B. mit der Bautzener PCM Energy GmbH, in deren Auftrag Hybrid-Wärmespeicher im ZKWL untersucht wurden. Diese Technologie könnte bei erfolgreicher Weiterentwicklung und Erreichung einer verlässlichen Zyklenstabilität auch für den effizienten Einsatz in Biomassevergasungsanlagen geeignet sein.

2.4 Verwertungspotenzial der Vorhabensergebnisse

2.4.1 Beiträge des Vorhabens zur Erhöhung der eigenen wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit

Die HSZG schärft im Verlaufe des Projektes das Profil als kompetenter Partner bei der Weiterentwicklung energietechnischer Komponenten – speziell dezentraler thermochemischer Biomasse-Vergasungsanlagen sowie thermischer und stofflicher Speicher und zugehöriger Wandlungsanlagen – und zuverlässiger Mess- und Regelsysteme. Die HSZG genießt bereits einen Ruf als exzellenter Ausbildungs- und Forschungsstandort im Bereich der konventionellen und regenerativen Energietechnik, unter anderem bei Großunternehmen, aber auch bei zahlreichen (über-) regionalen mittelständischen Unternehmen (Hersteller und Betreiber von Energieanlagen), der im Verlaufe des Projektes weiter gestärkt und ausgebaut wurde. Fachliche Ergebnisse des Projektes HORA wurden darüber hinaus zur Erhöhung des Praxisbezuges von Lehrveranstaltungen in den Bachelor-, Diplom- und Master-Studiengängen Energie- und

Umwelttechnik genutzt. Das Ziel besteht weiter darin, Studierende aktiv in die Forschung einzubinden oder auch die Qualifizierung wissenschaftlichen Personals zu unterstützen.

In der Arbeitsgruppe des Teilprojektleiters Prof. Zschunke wurden insbesondere die mess- und analysetechnischen Fähigkeiten weiterentwickelt. Dies ist besonders bedeutsam sowohl unter dem Aspekt der spezifischen Eigenschaften der Brennstoffe und Zwischenprodukte dieses Prozesses als auch 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. Mindestens ein wirtschaftsfinanziertes Nachfolgeprojekt befindet sich in Vorbereitung. Im Rahmen der neuen EFRE-Förderperiode ist es außerdem geplant, weitere Vorhaben mit hohem Praxisanteil und engagierten Praxispartnern zur Stärkung der Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen auf den Weg zu bringen.

In der Arbeitsgruppe Technische Thermodynamik des Teilprojektleiters Prof. Meinert wurden auch während der Laufzeit des Projektes HORA mehrere Forschungsprojekte bearbeitet, die ebenfalls die Entwicklung sensibler, latenter oder hybrider thermischer Energiespeicher zum Inhalt hatten. Während der wärmetechnischen Auslegung der Latentwärmespeicher für das Projekt HORA – die weitgehend schon in [6] erfolgte – wurde deutlich, dass die zuverlässige Kenntnis der thermophysikalischen Stoffdaten der PCM dafür unerlässlich ist. Diese Motivation führte zur Einwerbung von Vorlaufforschungsmitteln des SMWK über die HSZG und zur Realisierung der Projekte PCM-Prop und PCM-Prop2 (Laufzeit bis 12/2022). Im Rahmen dieser Projekte wurde und wird die messtechnische Ausstattung des Labors Thermodynamik und Wärmetechnik zur Messung von Stoff- und Transportgrößen wie der Viskosität, der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit von flüssigen und festen Stoffen (hauptsächlich der flüssigen und festen Phase von PCM) substantiell erweitert.

Im Rahmen des parallel bearbeiteten Projektes LaNDER³ (Teil 2, Erforschung wirtschaftlicher Prozessketten für die nachhaltige Herstellung von Naturfaser-Kunststoff-Verbunden, BMBF, FKZ 13FH2I05IA) wurden die Erkenntnisse aus dem Projekt HORA zur erfolgreichen Entwicklung eines Rohrbündel-Latentwärmespeichers genutzt, der Abwärme aus einem Fertigungsprozess zur Trocknung von Naturfasern nutzt und damit den Aufwand an Trocknungswärme um 80 % reduziert.

Die umfangreichen Erfahrungen bei der Überführung von Latentwärmespeichern in die Praxis – wie im Vorhaben demonstriert – waren ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Einwerbung eines weiteren FuE-Projektes, das die Entwicklung von Abwärme-Nutzungskonzepten für industrielle Prozesse zum Ziel hat (Projekt ANKIP, Bündnis Lausitz Life & Technology, BMBF, FKZ 03WIR2707A, Laufzeit bis 06/2024). Dieses Projekt wird den Einsatz von Latentwärmespeichern zur Abwärmenutzung und damit die signifikante Verbesserung der energetischen Effizienz thermischer Industrieprozesse voranbringen. Dabei liegt der Fokus auf der Unterstützung von Unternehmen aus der Region Oberlausitz, der Senkung von Treibhausgasemissionen und der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Unternehmen durch eine höhere Wirtschaftlichkeit der Produktion ganz besonders in Zeiten wachsender Energiepreise.

Prof. Meinert ist weiter Obmann eines Normungsausschusses beim DIN e.V. und federführend an der Erstellung der 2020 veröffentlichten DIN 2384 [12] beteiligt. Zahlreiche Ergebnisse auch aus dem Projekt HORA sind in diese Norm eingeflossen. Die Beteiligung der Arbeitsgruppe Meinert an einem vom BMWK finanzierten Normungsvorhaben zur Entwicklung von Vergleichskennzahlen für thermische Energiespeicher wurde im Abschnitt 2.3.1 bereits erwähnt.

Das Projekt trägt mit den anderen Förder- und Industrieprojekten entscheidend zur Vervollkommnung der wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit der Arbeitsgruppe speziell in Bezug auf die Überführung von Latentwärmespeichern in die Praxis bei. Neben dem deutlichen Ausbau des grundlegenden fachlichen Knowhows im Bereich der Wärmespeicherung ist dieser Praxisbezug von entscheidender Bedeutung für die wissenschaftliche Reputation der HSZG als kompetenter Kooperationspartner für die lokale Industrie und für die Stärkung des Forschungsschwerpunktes Energie und Umwelt.

2.4.2 Beiträge des Vorhabens zur nachhaltigen Stärkung der eigenen wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit

- Bedarfsanalyse/-abschätzung für die Vorhabensergebnisse

Die Technologie der kombinierten Strom- und Wärmenutzung aus Biomasse auf Basis von Vergasung mit motorischer Gasnutzung kann zu hocheffizienten und weitgehend klimagasfreien dezentralen Energieversorgungskonzepten beitragen. Dies wurde auch im Projektvorhaben HORA nachgewiesen. Außerdem bietet die Technologie die Möglichkeit, auf sich verändernde Bedingungen für die Eigennutzung selbst erzeugten Stroms zu reagieren und die Substitution von Strom und Wärme aus fossilen Brennstoffen voranzutreiben. Unter anderem führte dies in den letzten Jahren zu einer Zunahme von Beratungsnachfragen aus der Wirtschaft. Diesbezüglich können auch die Ausführungen zu Anwendungsmöglichkeiten aus Kapitel 1.3 sowie die Interessensbekundungen herangezogen werden. Die Interessensbekundungen liegen in Form von LOI (Letter Of Intent) vor, welche dem Sachbericht als Anlagen beigelegt sind. Unter Beachtung des dort dargestellten, umfangreichen Interesses am Projekt und dessen Ergebnissen, kann ein signifikanter Bedarf aus der Wirtschaft abgeleitet werden. Außerdem führten und führen die Projektergebnisse und deren Veröffentlichung zu weiteren Anfragen aus der Wirtschaft zum Zwecke der Beratung und Unterstützung bei der Einführung dekarbonisierender Technologien in der Praxis. Als Beispiele hierfür können das Klinikum Oberlausitzer Bergland, die GICON GmbH oder auch die Spanner Re² GmbH genannt werden.

Gerade auch angesichts der derzeitigen Anforderungen an die Verminderung von Klimagasemissionen in Verbindung mit einer zu steigenden Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen ist zu erwarten, dass sich dieser Trend in nächster Zeit verstärken wird. In diesem Szenario ist das Projektteam – unter Nutzung der mit den Vorhaben TCV [5], TCVIII [6] und HORA aufgebauten Forschungsinfrastruktur an der HSZG – in der Lage, die angefragten Beratungs- und Forschungsdienstleistungen zu bearbeiten.

- Möglichkeiten zur Erschließung von privaten und öffentlichen Finanzierungsquellen

Die ökonomische Systemintegration der Biomassevergasungsanlagen stellt ein sehr umsetzungsorientiertes Projekt dar, da die Voraussetzungen für eine bestmögliche wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse geschaffen wird (Herstellen der „wirtschaftlichen Passfähigkeit“). Im engen fachlichen Austausch mit der regionalen Wirtschaft sowie (außer-) universitären Forschungseinrichtungen wird ein hohes Maß an lokaler Vernetzung zur Organisation eines effektiven Wissens- und Technologietransfers erzeugt. Beispielhaft hierfür können werden die Kooperations- und Interessensbekundungen aus Kapitel 1.3 und die LOI entsprechend der Anlagen zum Sachbericht aufgeführt.

Für den Bereich der Wärmespeicherentwicklung und deren systemischer Integration sind die Ergebnisse aus [6] und diesem Vorhaben von großer Bedeutung für die

Erschließung von Finanzierungsquellen. Die enge Zusammenarbeit mit Unternehmen aus der Region bei der wärme- und strömungstechnischen Charakterisierung von hybriden und Latentwärmespeichern im Rahmen von Industrieaufträgen wurde bereits erwähnt. Auch die erfolgreiche Einwerbung von Fördermitteln des Bundes (aktuell lfd. Projekte: VKTES, LaNDER³, ANKIP sowie ein bereits zur Förderung vorgeschlagenes weiteres WIR!-Projekt EDWENIA) geht nicht zuletzt auf die im Projekt HORA erworbenen Kompetenzen und die daraus resultierende wissenschaftliche Reputation zurück.

- 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. Brennstoffvariation bei Biomassevergasungsanlagen mit dem Schwerpunkt auf Rest- und Abfallstoffe) sind weiterhin von großer Bedeutung, weshalb die Chancen für eine nachhaltige Entwicklung im Drittmittelbereich sehr groß sind.

Selbstverständlich sichert das Projekt während der Laufzeit unmittelbar und durch Generierung von Anschlussprojekten vor allem auch zukünftig die Bündelung der personellen Kompetenzen im Bereich energieeffizienter und umweltschonender Technologien am Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Zittau. So hat das Projekt z.B. im Bereich der Wärmespeicherforschung in der Projektlaufzeit eine Vollzeitstelle für einen Forschungsmitarbeiter am Standort Zittau gesichert, die o.g. thematisch verwandten Förderprojekte des Bundes sichern aktuell 2,3 weitere Vollzeitstellen für wissenschaftliche und Forschungsmitarbeiter über einen Zeitraum von drei Jahren an der HSZG.

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

Das Forschungsvorhaben lässt sich in vieler Hinsicht in die Innovationsstrategie des Freistaates Sachsen einordnen. Bezogen auf die fachlichen Inhalte ist das Projekt in das Zukunftsfeld Energie einzuordnen. Die im Innovationsstrategiepapier genannten Schwerpunkte Energieerzeugung, Energiespeicherung und Energieeffizienz umschreiben die wesentlichen Projekthinhalte. Weitere Korrelationen entstehen zu den Feldern Rohstoffe (Nutzung natürlicher Rohstoffe) sowie Umwelt und Ressourcen (Emissionsminderung).

Die Bearbeitung eines derart komplexen und für die Energieversorgung der Zukunft bedeutsamen Projektes – wie des hier beantragten – führt in einem hohen Maße zur Stärkung der Strukturen und Kompetenzen in der Wissenschaftslandschaft des Freistaates Sachsen, und dies in einer strukturschwachen Region. Die HSZG stärkt damit ihren Ruf als Energiehochschule nicht nur auf dem Gebiet der Nutzung konventioneller, sondern gerade auch erneuerbarer Energieträger. Die Einbindung von Studierenden in anspruchsvolle Forschungsvorhaben im Rahmen studentischer Arbeiten und die Nutzung der Ergebnisse in qualitativ hochwertigen Lehrveranstaltungen führen zur Ausbildung von Spitzenkräften für die regionale und überregionale Wirtschaft. Besonders auch die postgraduale Qualifikation der jungen Wissenschaftler ist von persönlicher und gesellschaftlicher Bedeutung.

- 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 Mess- und Forschungsberichte erstellt und diese über die Webseite

(<http://ipm.hszg.de/de/fachgebiete/kraftwerks-dampferzeuger-und-feuerungstechnik/publikationen.html>) der HSZG der Öffentlichkeit zum Download bereitgestellt. In dieser Form wurden außerdem alle Zwischenberichte zum Vorhaben veröffentlicht.

- Verbesserung des Wissenstransfers in die Wirtschaft

Das Projekt bietet durch die anwendungsorientierten Forschungsinhalte beste Voraussetzungen sowohl für einen anschließenden direkten Wissenstransfer in die Wirtschaft im Rahmen industriefinanzierter Anschlussprojekte als auch für die Akquise öffentlich finanzierter Projekte zur weiteren Verbesserung der Anlagenflexibilität (z.B. Brennstoffspektrum). Aspekte der Arbeitsplatzsicherung und Nachwuchsqualifizierung in der strukturschwachen Region Oberlausitz sind dabei natürlich von besonderer Bedeutung. Der Wissenstransfer in die Wirtschaft und aus der Wirtschaft bekam einen kräftigen Impuls, weil mit dem im Projekt tätigen wissenschaftlichen Personal eine intensive Kommunikation mit den interessierten Firmen geführt wurde.

Aufgrund der Einschränkungen durch die pandemische Lage konnte von 2020 bis 2022 die Durchführung der sonst jährlich stattfindenden Tagung zur energetischen Biomassenutzung (Biomass to Power and Heat) mit einem breit gefächerten nationalen und internationalen Publikum nicht stattfinden. Anstatt dessen konnte jedoch 2020 durch die HSZG eine onlinebasierte Nachwuchswissenschaftlerkonferenz (Young Academics Conference, 17. Juni 2020) gemeinsam mit der TU Dresden, der TU Freiberg, dem ATB Potsdam und der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt werden. Der Tagungsband zu dieser Veranstaltung wurde veröffentlicht [46] und bildete darüber hinaus wie die in Kapitel 2.4.4 aufgeführten Veröffentlichungen einen Wissenstransfer in die Wirtschaft.

Im Rahmen und im Nachgang des Projektes erfolgte wie auch in anderen Forschungsprojekten eine enge Zusammenarbeit mit Unternehmen aus der Region. Wie bereits berichtet erfolgte die Untersuchung verschiedener marktverfügbarer Latentwärmespeicher auch unter Verwendung des messtechnischen Knowhows aus dem Projekt HORA im Auftrag der lokalen Industrie auf der Wärmespeicher-Testanlage im ZKW. Ergebnisse des Projektes wurden interessierten Unternehmensvertretern auf Workshops und anderen Informationsveranstaltungen vorgestellt, so wie z.B. im März 2020 auf dem Industrieworkshop Thermische Energiespeicher in Dresden, dem Oberlausitzer Energiesymposium im November 2021 oder im Mai 2022 auf der 5. Vernetzungsveranstaltung im Bereich Energieinnovation – Chancen für sächsische und ostdeutsche Akteure – der Sächsischen Energieagentur SAENA.

- 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 Energieeffizienz 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 weiterhin steigen und sich damit ein wirtschaftliches Nachfrageumfeld für die Erkenntnisse des Vorhabens ergeben.

2.4.4 Angabe der bereits erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Alle Forschungs-, Mess- und Zwischenberichte des Projektes HORA werden auf der Institutswebseite (<https://ipm.hszg.de/kompetenzen/kraftwerks-dampferzeuger-und-feuerungstechnik/publikationen>) veröffentlicht.

Wissenschaftliche Artikel

- SCHNEIDER, R., ZSCHUNKE, T.: Brennstoffvariation bei der kleintechnischen Holzvergasung, In: Thrän, D., Pfeiffer, D. (Hrsg.): Bioenergie: Der X-Factor!, Tagungsband zur 8. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung, ISBN 978-3-946629-27-6, Leipzig, September 2019
- HERLITZIUS, T. (Hrsg.): Die energetische Nutzung naturbelassener fester Biomasse. Technik, Ökonomie, Ökologie. In: Fortschritte Naturstofftechnik, Institut für Naturstofftechnik, Technische Universität Dresden, Springer Vieweg, 2021. ISBN 978-3-658-33496-3, ISBN 978-3-658-33497-0 (eBook), ISSN 2524-3365, ISSN (electronic) 2524-3373, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33497-0>
- THRÄN, D. (Hrsg.), PFEIFFER, D. (Hrsg.): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Methoden zur Bestimmung von Technologiekennwerten, Gestehungskosten und Klimagaseffekten von Vorhaben im Rahmen des BMWi-Forschungsnetzwerkes Bioenergie / BMWi-Förderbereich "Energetische Biomassenutzung" In: Schriftenreihe „Energetische Biomassenutzung“, Band 04, 5. Aufl., Leipzig. ISBN 978-3-946629-58-0, ISSN (online) 2701-2719, DOI: 10.48480/ddpt-ys74
- MEINERT, J.: Thermische Energiespeicher – die Normung nimmt Fahrt auf; Euro Heat&Power (2021), Heft 4-5, S. 18-23
- ZSCHUNKE, T., SCHNEIDER, R., POHL, R., HOFMEISTER, M.: Gasification of straw in a small-scale test stand, Frontiers Energy Research - Bioenergy and Biofuels, Frontiers in Biomass Pyrolysis, derzeit im Review

Mess- und Forschungsberichte

- GRUSLA, S.: CFK-Verbrennungsversuche, Forschungsbericht, Zittau, 20.01.2020
- POHL, R., SCHNEIDER, R.: Summary and conclusion of the investigation of the use of tobacco stems as a fuel, Forschungsbericht, Zittau, 13.03.2020
- SCHNEIDER, R., GRUSLA, S., HOFMEISTER, M., POHL, R., ZSCHUNKE, T.: Strohvergasung, Forschungsbericht, Zittau, Februar 2021
- SCHNEIDER, R., TITZE, E., SALOMO, B., GRUSLA, S., POHL, R., MEINERT, J., ZSCHUNKE, T.: Zwischenbericht Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA), SAB-Projekt, Zittau, 28.02.2021
- SCHILLINGER, L., SCHNEIDER, R.: Macadamianusschalen - alternativer Brennstoff für Holzgas-Anlagen, Forschungsbeitrag auf der Webseite und dem Branchenticker Holzgas (Ausgabe 7.9.21) der FEE e.V., URL: <https://fee-ev.de/themen/holzgas/meldungen-holzgas/macadamianusschalen>, Juli 2021
- SCHNEIDER, R., POHL, R., ZSCHUNKE, T., HOFMEISTER, M.: Vergasung von Stroh in einem kleintechnischen Festbett-Gleichstrom-Vergaser, Forschungsbeitrag auf der Webseite und dem Branchenticker Holzgas (Ausgabe 9.12.21) der FEE e.V., URL: <https://www.fee-ev.de/themen/holzgas/meldungen-holzgas/strohvergasung>, November 2021

- SCHNEIDER, R., POHL, R.: Variation Vergasungsmitteltemperatur bei der Festbett-Gleichstrom-Vergasung, Messbericht, Zittau, 29.03.2022

Vorträge und Poster

- TITZE, E.: Latentwärmespeicher in der Forschung, Pitch zur Eröffnung des Co-Creation Lab „Celsiuz“ der Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau, 21.11.2019
- SCHNEIDER, R.: Biomassevergasung in der Forschung, Pitch zur Eröffnung des Co-Creation Lab „Celsiuz“ der Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau, 21.11.2019
- TITZE, E.: Phasenwechselmaterialien (PCM) in der Forschung, Vortrag CIO (Cleantech Initiative Ostdeutschland) - Arbeitskreistreffen Energiespeicher zum Thema "Thermische Energiespeicher - Erfahrungen, Herausforderungen & Ausblicke", Zittau, 04.02.2020
- TITZE, E.: Integration von Latentwärmespeichern in ein Holzgas-BHKW, Vortrag zum Industrieworkshop Thermische Energiespeicher zur effizienten Abwärmenutzung des Fraunhofer IFAM, Dresden, 03.03.2020
- MEINERT, J.: Wärmespeicher für die industrielle Abwärmenutzung – Eine Einführung, Vortrag zum Industrieworkshop Thermische Energiespeicher zur effizienten Abwärmenutzung des Fraunhofer IFAM, Dresden, 03.03.2020
- ZSCHUNKE, T.: Kälte aus Biomasse: Drei Thesen zu einer Gesamtsystembetrachtung, Vortrag zum Workshop "Kälte aus Biomasse. Perspektiven für die Biomasse-Verbrennung und -Vergasung" der FEE e.V., Berlin, 02.11.2020
- SALOMO, B., TITZE, E., SCHNEIDER, R.: Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA), Poster zur Projektinformation, Zittau, 09.11.2020
- IPM: Image-Film der IPM-Fachgruppen im Rahmen der SAENA-Veranstaltung „2. Informations- und Vernetzungsveranstaltung in den Bereichen Energieforschung und Energieinnovation – Chancen für sächsische Akteure“, 09.12.2020
- MEINERT, J.: Steigerung der energetischen Effizienz dezentraler thermischer Energiesysteme, Oberlausitzer Energiesymposium, Zittau, 4.11.2021
- MEINERT, J.: Innovationen aus Zittau – Wärme effizient speichern und nutzen, 5. Vernetzungsveranstaltung im Bereich Energieinnovation – Chancen für sächsische und ostdeutsche Akteure, SAENA, Dresden, 13.5.2022

Weiterhin wurden im Rahmen der Projektarbeit folgende studentische Arbeiten betreut:

- Soufiane Anwar, Integration und Einsatzbewertung einer Messstrecke zur Minimierung von Motorabgasemissionen, Masterarbeit, HSZG, 04/2019 bis 10/2019, Betreuer: R. Schneider
- Kay Doßmann, Unterstützung bei Recherchearbeiten zur Brennstoffvariation sowie bei der Datenauswertung, studentische Hilfskraft, HSZG, 11/2019 bis 12/2019, Betreuer: R. Schneider
- Anas Bassir, Bewertung der Staubabscheidung in der Abluft einer Biomassetrocknungsanlage mit Hilfe eines Zyklons, Projektarbeit, HSZG, 12/2019 bis 02/2020, Betreuer: R. Schneider

- Rhea Nele Grabowsky, Untersuchung des Einflusses konvektiver Strömungen in der Flüssigphase von PCM auf die Kinetik latenter Wärmespeicher, Diplomarbeit, HSZG, 01/2020 bis 05/2020, Betreuer: Prof. Meinert
- Robert Weinhold, Nutzung von holzartigen Abfallkomponenten für Holzvergasungsanlagen zur Brenngasgewinnung, Masterarbeit, HTWK Leipzig, 08/2020 bis 02/2021, für Vergasungstests der Siebüberlauf-HHS externe Betreuung durch HSZG: R. Schneider
- Agustinus Giyai, Untersuchung des Einflusses freier Konvektionsströmungen auf das Beladeverhalten von Rohrbündel-Latentwärmespeichern, Masterarbeit, HSZG, 10/2020 bis 02/2022, Betreuer: Prof. Meinert
- Lea Schillinger, Anwendungsorientierte Untersuchung für die Verwertung von Macadamianusschalen zur dezentralen Energieerzeugung mit einem Holzvergasungs-Blockheizkraftwerk, Masterarbeit, HS Albstadt-Sigmaringen, für Vergasungstests der Macadamianusschalen externe Betreuung durch HSZG: R. Schneider
- Gnana Swaroop Krishnamurthy, Energy Conversion from Sewage Sludge in Decentralized Applications through Thermochemical Gasification Process, Praktikum an HSZG mit anschließender Masterarbeit, SRH Berlin, 04/2021 bis 05/2022, externe Betreuung durch HSZG: R. Schneider
- Robert Ato Newton, Investigation of Miscanthus samples from marginal and contaminated soils, Praktikum an HSZG mit anschließender Promotion, Jan Evangelista University Usti Nad Labem, 11/2021 bis 03/2022, externe Betreuung durch HSZG: R. Pohl
- Philipp Kutzner, Parametervariation zur Erhöhung der Prozesseffizienz einer kleintechnischen Vergasungsanlage, Diplomarbeit, HSZG, 11/2021 bis 05/2022, Betreuer: R. Schneider

2.5 Beiträge des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen

In Deutschland werden rund 2.300 Mrd. kWh Endenergie verbraucht, davon rund 20 % in Form von Strom, 27 % für Mobilität und 53 % als Wärme (vgl. Abb. 2-74) [47]. Während Strom bereits zu fast 50 % aus regenerativen Energieträgern erzeugt wird (verpixelter Anteil im Tortendiagramm) beträgt dieser Anteil an der Wärmeerzeugung aktuell 15 %. Neben dieser insgesamt ernüchternden Klimabilanz der Endenergiebereitstellung ergibt sich in jüngster Zeit die Notwendigkeit eines beschleunigten Ausstieges aus dem Import fossiler Energieträger. Dies gelingt nur durch einen effizienteren Energieeinsatz und die vermehrte Nutzung erneuerbarer Energien.

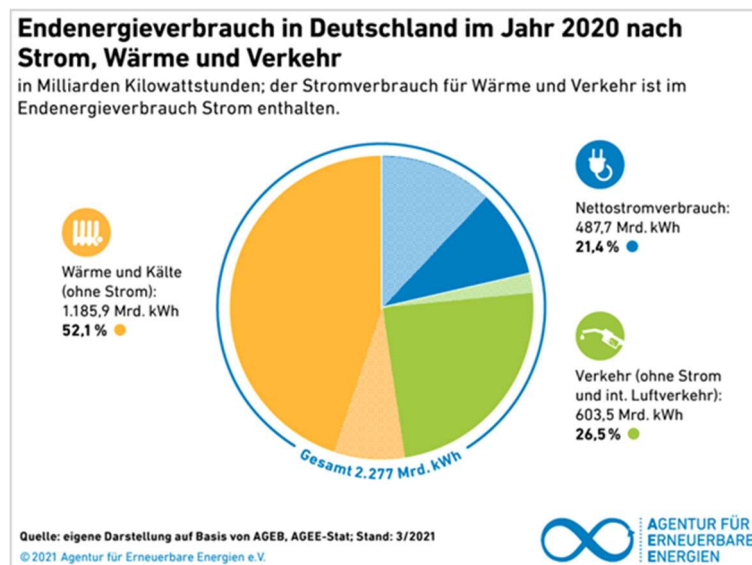


Abb. 2-74 Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren [47]

Das Projekt HORA leistet mit seinen Ergebnissen einen wichtigen Beitrag erstens zur effizienten Nutzung von Biomasse zum Zwecke der Stromerzeugung und zweitens zur Optimierung thermischer Energiespeicher für den Einsatz in dezentralen thermischen Energiesystemen. Somit kann damit ein enormer Beitrag zur Erreichung der Klimaziele und zur Verbesserung der Umweltbedingungen erreicht werden. Angesichts der aktuellen Entwicklungstendenzen für die Zukunft unserer Energieversorgung und im Kontext der enormen Kostensteigerung der Energiebereitstellung, erscheinen diese Projektergebnisse bedeutsamer, als dies zu Beginn des Projektes überhaupt abschätzbar war. Hier bestätigt sich, dass die Forschung auf dem Gebiet einer nachhaltigen Energiebereitstellung und effizienten Energieanwendung unter allen Bedingungen von großer Bedeutung ist.

Das mit Biomassevergasungsanlagen und anschließender Gasnutzung im BHKW umgesetzte Prinzip der KWK unter Nutzung nachwachsender Rohstoffe (hier HHS) oder sogar biogener Rest- und Abfallstoffe, erreicht einen sehr hohen Brennstoffausnutzungsgrad durch die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung und ist dabei – je nach Herkunft und Aufbereitungstechnologie des Brennstoffes – nahezu frei von klimaschädlichen CO₂-Emissionen. Im Gegensatz dazu ist jede Kilowattstunde Strom aus einem Braunkohle-Großkraftwerk mit rund 1.150 g CO₂ belastet [48], eine effiziente KWK ist bei Großkraftwerken kaum realisierbar. Auch die Stromerzeugung mit modernen Gas- und Dampf-Kraftwerken (GuD) erzeugt etwa 450 g CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde [48].

Die Entwicklung und Optimierung der Wärmespeicher im Projekt erfolgte unter der konkreten Prämisse der Integration dieser Speicher in die Biomassevergasungsanlage. Dennoch sind diese Speichertypen – speziell die entwickelten Rohrbündel-Latentwärmespeicher mit einer Speichertemperatur von 70 °C – auch für häusliche und industrielle Anwendungen bestens geeignet. Mit dem im Projekt entwickelten wärmetechnischen und experimentellen Knowhow lassen sich diese Speicher für beliebige Anwendungen adaptieren. Daraus ergibt sich ein enormes Potenzial z.B. für die Einspeicherung und zeitversetzte Nutzung von Wärme aus Niedertemperatur-Solarthermie, wie diese in unseren Breiten möglich ist. Denkbar ist auch die Nutzung der Speicher für das Abwärme-Recycling und damit u.a. die Reduzierung des Verbrauches von Erdgas in Unternehmen (die deutsche Industrie verbraucht jährlich rund 450 Mrd. kWh Prozesswärme). Die Technologie der Latentwärmespeicher kann auch für

Power-to-Heat-Anwendungen eingesetzt werden, wenn z.B. mittags anfallender Strom einer Photovoltaik-Anlage oder regenerativer Überschussstrom allgemein zur Beladung mit Wärme genutzt (Widerstandsheizer) und die Speicherwärme zeitversetzt zur Warmwasserbereitung eingesetzt wird.

Ein Latentwärmespeicher in der Größenordnung der im Projekt entwickelten PCM-Speicherdemonstratoren mit einem Wärmeinhalt von rund 50 kWh kann bei angenommen 300 Be- und Entladezyklen pro Jahr (also fast einmal täglich) jährlich rund 15.000 kWh Wärme speichern. Erfolgt diese Wärmespeicherung zur Substitution fossil erzeugter Wärme, so entspricht dies einer CO₂-Emissionsminderung von 3.000 kg (Wärme aus Erdgas 0,2 kg CO₂/kWh, bei Heizöl mehr). Bleibt der Speicher 10 Jahre unter diesen Bedingungen im Einsatz, werden durch nur einen solchen Speicher 30 Tonnen CO₂-Emissionen vermieden. Das Projekt leistet einen wichtigen Beitrag zur Überführung dieser Speichertechnologie in die Praxis und damit zur Multiplikation dieses Einsparpotenziales und zur Verbesserung der Umweltbedingungen.

2.6 Einschätzung des Finanzierungs- und Zeitplanes

Hinsichtlich des Projektbalkenplanes und der darin festgelegten zeitlichen Abfolge der Arbeitspunkte (AP) wurden im Berichtszeitraum Änderungen beantragt und gemäß den Bescheiden vom 14.10.2020 und 03.05.2021 genehmigt. Darauf beziehend haben sich die Bearbeitungszeiträume der AP nach Abb. 2-75 und Tab. 2-45 geändert.

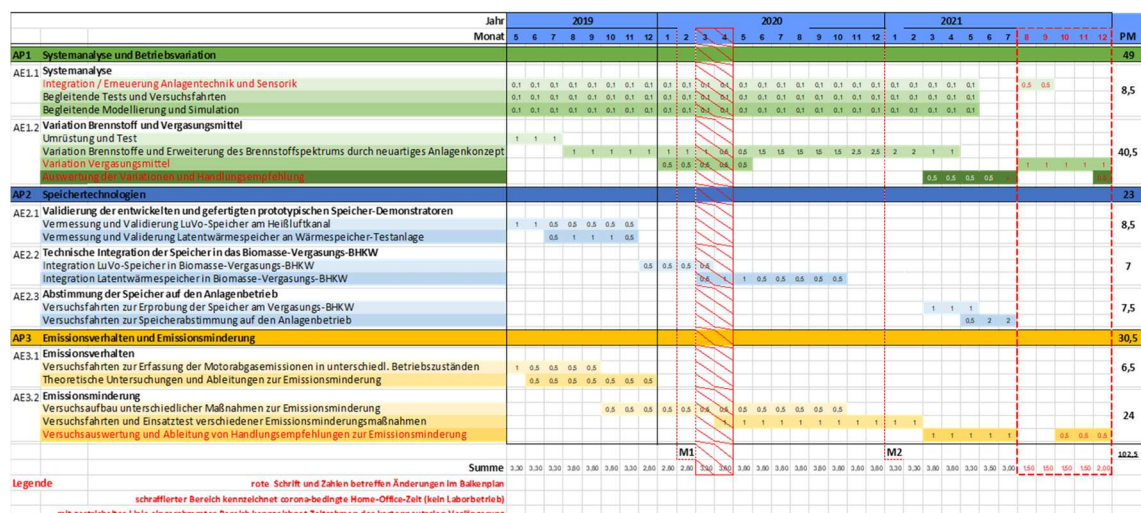


Abb. 2-75 aktualisierter Balkenplan zum Projekt HORA gemäß der Änderungsbescheide vom 14.10.2020 und 03.05.2021

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

Im Balkenplan (vgl. Abb. 2-75) wurde außerdem der zeitliche Bereich gekennzeichnet, in dem aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie keine Labortätigkeit möglich war. Dies betraf den Zeitraum von März 2020 bis Anfang Mai 2020. Zu Meilenstein 1 (M1 nach 9 Projektmonaten im Februar 2020) wurde eine Auswertung der AE2.1 und AE3.1 vorgenommen und der Validierungsabschluss der Speicher in AE2.1 erreicht. Wie zuvor beschrieben, wurde gemäß dem ersten Änderungsbescheid die Entwicklung und der Einsatz des Pulsationsdämpfers aus dem Arbeitsplan des AP2 Speichertechnologien gestrichen und der ebenfalls zu M1 ursprünglich anvisierte Beginn der Parametervariation des Vergasungsmittels vorerst ausgesetzt. Der Termin des Meilensteins 2 (M2 nach 20 Monaten im Januar 2021) wurde beibehalten. Aufgrund der genehmigten Ausweitung der AE1.2 konnte jedoch entgegen der bisherigen Planung zu diesem Zeitpunkt noch kein Abschluss der Brennstoffvariation erfolgen.

Mit dem zweiten Änderungsbescheid vom 03.05.2021 wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 5 Monate bis zum 31.12.2021, bei Umwidmung nicht abgerufener Sachmittel in Personalmittel, genehmigt. AP2 und AP3 waren zu diesem Zeitpunkt wie geplant vollumfänglich bearbeitet, sodass sich die Arbeitsschwerpunkte für den Zeitraum der kostenneutralen Verlängerung auf die Variation des Vergasungsmittels bezogen. Die hierfür notwendigen Bearbeiter standen in einem Umfang von 1,5 VZÄ weiterhin zur Verfügung. Begleitend zu diesen Versuchen wurde auch die Abhängigkeit der Emissionen von den Vergasungsmittelvariationen untersucht. Darüber hinaus wurde unter Nutzung des LDA eine Kalibrierstrecke für Gasvolumenstrom-Messgeräte aufgebaut. Die Inbetriebnahme und Nutzung dieser Kalibrierstrecke wurde ebenfalls in dem Zeitraum der kostenneutralen Verlängerung durchgeführt.

Tab. 2-45 Vergleich des Zeit- und Arbeitsplans inkl. der Meilensteinplanung nach Änderungsbescheid

AP/MS	Zeitplan	Aktueller Stand
AE1.1	05/19 bis 09/21**	Abgeschlossen
AE1.2	05/19 bis 12/21**	Abgeschlossen
AE2.1	05/19 bis 11/20*	Abgeschlossen
AE2.2	12/19 bis 10/20*	Abgeschlossen
AE2.3	03/21 bis 07/21	Abgeschlossen
AE3.1	05/19 bis 12/19	Abgeschlossen
AE3.2	10/19 bis 12/21**	Abgeschlossen
Meilensteine		
M 1	02/2020	Erfolgt
M 2	01/2021	Abschließend erst 12/21 erfolgt

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

** gemäß kostenneutraler Verlängerung bis zum 31.12.2021

Hinsichtlich des Finanzierungsplans wurden unter Berücksichtigung der Sachmittelumwidmung ca. 91 % aller geplanten sachbezogenen Mittel im Rahmen der Projektarbeiten verwendet. Die Umwidmung von Sachmittel in Personalmittel in Höhe von insgesamt 32.000,00 € erfolgte entsprechend des Änderungsbescheides vom 03.05.2021. Dies war möglich, da entgegen der ursprünglichen Mittelplanung keine zusätzliche Emissionsmesstechnik im Rahmen der Projektarbeit beschafft wurde. Darüber hinaus war die Fertigung und Installation der Wärmespeichersysteme am Versuchsstand deutlich kostengünstiger als zuvor abgeschätzt. Des Weiteren wurden mit dem bewilligten Änderungsantrag vom 13.10.2020 die Arbeiten hinsichtlich eines Pulsationsdämpfers im AP Speichertechnologien beendet, sodass auch hierfür weniger Sachmittel als kalkuliert benötigt wurden. Aufgrund der pandemiebedingten Schließung des Laborbetriebes der Hochschule über 2 Monate konnten nicht so viele Versuchsfahrten wie ursprünglich geplant stattfinden, sodass auch deutlich weniger

Verbrauchsmaterial benötigt wurde. Weiterhin wurde weniger Phasenwechselmaterial für die Latentwärmespeicher benötigt, da dessen Stabilität sich als deutlich besser als zuvor abgeschätzt herausgestellt hat und somit kein Wechsel des Speichermaterials notwendig wurde.

2.7 Angabe der Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

▪ Einsatz von CFK-Abfällen

Bei den Rest- und Abfallstoffen die im Fokus der Brennstoffvariationen standen, wurden u.a. auch Abfälle aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) betrachtet [1]. Eine verbrennungstechnologisch orientierte Bewertung der thermischen Behandlung von CFK-Abfällen an zwei spezialisierten Testapparaturen (Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 und Mikrobrennkammer MB 1500) konnte auf der Basis der an diesen Versuchsapparaturen durchgeführten Versuche nur unzureichend gegeben werden. Die Versuche an dem Mikroverbrennungsreaktor MR 1500 schlugen fehl. Ein Verbrennungsversuch an der Mikrobrennkammer MB 1500 mit reinen CFK-Abfällen sowie ein zweiter Versuch mit einem Mischprodukt (50%/50% Massenverhältnis) von CFK-Abfällen und Trockenbraunkohle konnten für einen begrenzten Versuchszeitraum aufrechterhalten werden, jedoch waren starke Schwankungen beim Betrieb des Feuerungssystems zu verzeichnen. Die angedachte Nutzung der Versuchsapparaturen zur Bestimmung der, zumindest qualitativen, Unterschiede der Verbrennungsabläufe von verschiedenen hergestellten CFK-Abfällen (unterschiedlichen Faserlängen, Bindematrix, Carbonisierung etc.) ist, vor allem bedingt durch die schlechte Dosierbarkeit der Stäube, nicht möglich.

Von einem Einsatz der CFK-Abfälle in der Biomassevergasungsanlage wurde aufgrund der nicht vorhandenen Homogenität des zur Verfügung stehenden CFK-Materials und der damit in Verbindung stehenden Nichteignung des anlageninternen Materialtransports abgesehen. Eine Zerkleinerung und Kompaktierung der CFK-Abfälle wurde bei einem externen Dienstleister angefragt, war jedoch mit den finanziellen Rahmenbedingungen des Projektes nicht vereinbar. Darüber hinaus konnte nicht sicher verhindert werden, dass beim Transport des CFK-Abfalls kleinste Partikel als Feinstaub in die Arbeitsatmosphäre gelangen, die aufgrund ihrer Lungengängigkeit die Arbeitssicherheit des Personals massiv verschlechtern können.

Die sichere Verwertungsmöglichkeit der CFK-Abfälle bleibt ein wichtiges Forschungsthema. Da eine Deponierung und Müllverbrennung von CFK rechtlich sowie verfahrenstechnisch kompliziert bis unmöglich ist [49], steht in dem Zusammenhang der Einsatz thermochemischer Prozesse (Pyrolyse, Vergasung) weiterhin im Mittelpunkt der Forschung.

▪ Produktgas-Pulsationsdämpfer

Durch Änderungen im Arbeitsplan (genehmigter Änderungsantrag vom 13.10.2020) mussten Teile des AP1 Systemanalyse und Betriebsvariation (AE1.2 Variation Brennstoff und Vergasungsmittel) hinsichtlich ihres zeitlichen und inhaltlichen Umfangs verändert werden. Dies war notwendig, um die Variation der Brennstoffe mit einem neuartigen Anlagenkonzept (Arbeitstitel „Strohvergaser“) zu erweitern und damit das einsetzbare Brennstoffspektrum der Rest- und Abfallstoffe maßgeblich zu erhöhen. Um dies zu gewährleisten, wurde die Entwicklung und der Einsatz des Pulsationsdämpfers aus dem Arbeitsplan des AP2 Speichertechnologien gestrichen. Die damit freiwerdenden Kapazitäten wurden für die Validierung des LuVo-Speichers und für den Ausbau der zuvor beschriebenen AE1.2 Variation Brennstoff genutzt.

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

Aus den Bearbeitungsergebnissen des Projektes HORA können weitere anschließende Untersuchungsschwerpunkte abgeleitet werden. So ist für die Technologie der eher kleintechnischen Festbett-Gleichstrom-Vergasung die Brennstoffvariation mit Einsatz von Rest- und Abfallstoffen (z.B. Klärschlamm, Kunststoffe) und damit eine systematische Fortsetzung der Erweiterung des Brennstoffbandes unter stetig anzupassenden anlagentechnischen Bedingungen weiter zu verfolgen. Auch die Bedeutung einer Verwertung von CFK-Abfällen wird aufgrund der stetig steigenden Anfallmenge weiter zunehmen, wobei die Vergasung gekoppelt mit Verfahren zur Bosch-Reaktion das Potenzial einer CFK-Dekomposition mit Kohlenstoffrückgewinnung aufweist. Das in Verbindung mit der Verwertung von biogenen Rest- und Abfallstoffen stehende breite Anwendungspotenzial thermochemischer Verfahren ist auch an den derzeit vielen laufenden Forschungsprojekten zu diesem Thema erkennbar (vgl. Kapitel 2.3.2).

Hinsichtlich der Betriebsvariation des Vergasungsmittels ist die Änderung der Vergasungsmitteltemperatur in Abhängigkeit von der Brennstofffeuchte ein interessanter Aspekt, der weiter untersucht werden sollte, da damit die bisher hohen Anforderungen an die Brennstoffqualität deutlich sinken würden. Eine stoffliche Veränderung des Vergasungsmittels als solches ist vor dem Hintergrund ebenfalls sehr wichtig, da sich vor allem bei einem stickstoffarmen bzw. -freien Produktgas die Nutzungsoptionen des Gases maßgeblich erweitern ließen. Folglich wäre dann eine Gasnutzung in einer Brennstoffzelle oder in nachgeschalteten Gasreformierungsprozessen (z.B. Wasserdampf-Shift-Reaktor oder katalytische Methanisierung) denkbar, was wiederum eine Gewinnung von Gasen mit Marktpotenzial (Biomethan, Wasserstoff) mit sich bringen würde.

Darüber hinaus sollen zukünftig die weiteren folgenden Themen untersucht werden:

- Die physikalisch-chemische und reaktionskinetische Prozesssimulation mit dem Ziel, eine Optimierung von Betriebsbedingungen unterschiedlicher Prozesszustände in einem digitalen Zwilling vornehmen zu können.
- Die Produktgasverbrennung zwecks Prozesswärmegewinnung mit Nutzung des Ammoniakgehaltes im Produktgas, um damit eine primär NO_x-freie Verbrennung zu erhalten.
- Auch die Zugabe von Additiven in der Feststoffvergasung und in diesem Zusammenhang die Möglichkeiten zur Katalyse, ist ebenfalls ein zukünftiger Untersuchungsschwerpunkt, um das Brennstoffband maßgeblich zu erweitern.

Zukünftige Untersuchungen im Bereich der Entwicklung thermischer Energiespeicher müssen – wie dies im Projekt bereits exemplarisch erfolgt ist – den Fokus auf die optimale systemische Integration legen. Das bedeutet, Betriebsparameter wie die Speichertemperatur, die Momentanleistung, der Wärmehalt und der Wirkungsgrad der

Speicher müssen in möglichst idealer Weise an das wärmetechnische System angepasst werden, in das die Speicher integriert werden sollen. Viele negative Betriebserfahrungen z.B. mit Latentwärmespeichern, die deren Image ruinieren und damit deren Einsatz in der Praxis unwahrscheinlicher machen, resultieren aus einer fehlerhaften Abstimmung zwischen Speicher und System („falscher Speicher im falschen System“). Dazu müssen die Grundlagen zur wärmetechnischen Auslegung weiter vervollkommen werden, was wiederum z.B. die Berücksichtigung freier Konvektionsströmungen in der Flüssigphase von PCM einschließt. Die thermophysikalischen Stoff- und Transportgrößen der Speichermedien müssen zuverlässig temperaturabhängig bestimmt und in die Auslegungsrechnungen einbezogen werden. Die Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen der Wärmespeicher sollten durch genormte Kenngrößen verallgemeinert und für den Planer einfach und zuverlässig nutzbar sein. Allen diesen aktuellen und zukünftigen Herausforderungen stellt sich das Fachgebiet Technische Thermodynamik der HSZG bereits im Rahmen laufender bzw. zeitnah startender Forschungsaktivitäten.

Literaturverzeichnis

- [1] SCHNEIDER, R., TITZE, E., SALOMO, B., GRUSLA, S., POHL, R., MEINERT, J., ZSCHUNKE, T.: Zwischenbericht Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA), SAB-Projekt, Zittau, 28.02.2021
- [2] VDI 3461: Emissionsminderung Thermochemische Vergasung von Biomasse und Kraft-Wärme-Kopplung (Emission Control Thermochemical gasification of biomass in combined heat and power configurations), Berlin: Beuth Verlag, 2018
- [3] ZSCHUNKE, T., SCHNEIDER, R., SCHÜßLER, I.: Abschlussbericht Verbundprojekt Bundesmessprogramm zur Weiterentwicklung der kleintechnischen Biomassevergasung, BMU FKZ 03KB017B
- [4] ZEYMER, M., HERRMANN, A., OEHMICHEN, K., SCHNEIDER, R., HEIDECHE, P., LING, H., VOLZ, F.: DBFZ-Report Nr. 18: Die kleintechnische Biomassevergasung als Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung, Leipzig, 2013
- [5] 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, Zittau, 2015
- [6] SCHNEIDER, R., TITZE, E., SÉNÉCHAL, U., SALOMO, B., GRUSLA, S., POHL, R., SCHNEIDER, M., SYNOWZIK, S., HAASER, F., SILBERMANN, S., MEINERT, J., ZSCHUNKE, T.: Sachbericht – Thermochemisches Versuchsfeld III – (Thermodynamische und fluid-dynamische Optimierung einer Biomasse- Festbettvergasung mit BHKW), Zittau, 2019
- [7] POLLEX, A.: stROHgas: Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von asche- und chlorhaltiger Biomasse am Beispiel Stroh, Abschlussbericht, DBFZ, gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), FKZ 03KB085B, 2019
- [8] UNGER, C., SCHULZKE, T.: Thermodynamische Herausforderungen der Biomassevergasung, Vortrag zur 5. Internationalen Anwenderkonferenz für Biomassevergasung, Stuttgart, 11.02.2011
- [9] PFEIFER, C.: Perspektiven der thermochemischen Vergasung aus Sicht der IEA Bioenergy, Vortrag zur Anwenderkonferenz Biomassevergasung, 02.12.2021
- [10] BROSIOWSKI, A., ADLER, P., ERDMANN, G., STINNER, W., THRÄN, D., MANTAU, U., BLANKE, C., MAHRO, B., HERING, T., REINHOLDT, G.: Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen Status Quo in Deutschland, Band 36, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), 2015, ISBN 978-3-942147-29-3
- [11] STERNER, M., STADLER, I.: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration; Verlag Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2014
- [12] DIN 2384:2020-10, Thermische Energiespeicher – Terminologie, Anforderungen, Kenngrößen, Prüfgrundlagen
- [13] MEINERT, J.: Thermische Energiespeicher – die Normung nimmt Fahrt auf, Euro Heat&Power (2021), Heft 4-5, S. 18-23
- [14] 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
- [15] DURST, F., MELLING, A., WHITELAW, J.H.: Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie, G. Braun GmbH Karlsruhe, 1987

- [16] BÜKER, O.: Untersuchungen zur Darstellung und Weitergabe der Skala 'Volumen von Wasser' mithilfe laseroptischer und konventioneller Messverfahren. PhD thesis, TU Berlin, 2010, https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/2979/2/Dokument_47.pdf
- [17] MÜLLER, U., DUES, M., BAUMANN, H.: Vollflächige Erfassung von ungestörten und gestörten Geschwindigkeitsverteilungen in Rohrleitungen mittels der Laser-Doppler-Velocimetrie. Technisches Messen, 2007.
- [18] ONG, Z., CHENG, Y., MANEERUNG, T., YAO, Z., TONG, Y.W., WANG, C.H., DAI, Y.: Co-gasification of Woody Biomass and Sewage Sludge in an Fixed-Bed Downdraft Gasifier, American Institute of Chemical Engineers AIChE J, 61: 2508-2521, 2015 10:925-936, DOI 10.1002/aic.14836
- [19] SUSATRIAWAN, A.A.P., SAPTOADI, H., PURNOMO: Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 76 (2017): 989–1003, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>
- [20] DBFZ: Informationen zum Forschungsprojekt VergaFlex - Flexibilisierung der Biomassevergasung durch Nutzung des Vergaserkokes als Biomaterial für die stoffliche Verwertung und als Brennstoff für Kleinstvergaser, 2022, <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/VergaFlex-623>, abgerufen am 12.04.2022
- [21] Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V.: Holzgas-Branchenguide 2020: Potenzial Holzgas: Wärme und Strom aus einer Hand, https://www.feeev.de/images/FEE__Holzgas_Branchenguide_2020.pdf
- [22] Spanner Re² GmbH: Strom & Wärme aus Holz: CO₂-neutrale Holz-Kraft-Anlagen von Spanner Re², <https://www.holz-kraft.com/de/produkte/holz-kraft-anlage.html>, abgerufen am 28.09.2020
- [23] SCHNEIDER, R., GRUSLA, S.: Brennstoffvariation am Holzvergaser-BHKW des TCV, Forschungsbericht, Hochschule Zittau/Görlitz, 2019
- [24] DIETZ, E., KUPTZ, D., BORCHERT, H., HARTMANN, H.: Hackschnitzelqualität. In: Berichte aus dem TFZ 46: Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern: Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt (S. 75-110), TFZ und LWF, Straubing und Freising-Weihenstephan, 2016
- [25] WEBER, K., EICHENAUER, S., STADLBAUER, E., SCHULTEN, M.-A., ECHTERHOF, T., KAMMANN, C., SCHMIDT, H.-P., GERLACH, A., GERLACH, H.: Verwendung von Biomassekarbonisaten. In: QUICKER, P., WEBER K. (Hrsg.), Biokohle (S. 213-346), Springer Fachmedien (Springer Vieweg), 2016
- [26] BASU, P.: Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory (Second edition), Academic Press, 2013, <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>
- [27] International Energy Agency: Africa Energy Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report. <https://webstore.iea.org/africa-energy-outlook-2019>
- [28] ZAHORANSKY, R.: Energetische Verwertung von Biomasse. In: ZAHORANSKY, R. (Hrsg.): Energietechnik: Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf (8. Auflage, S. 441-454), Springer Fachmedien (Springer Vieweg), 2019
- [29] TYAGI, S.K., SANSANIWAL, S.K., PAL, K., ROSEN, M.A.: Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 72 (2017): 363-384, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>

- [30] MEVISSSEN, N., SCHULZKE, T., UNGER, C., MAC AN BHAIRD, S.: Thermodynamics of Autothermal Wood Gasification, *Environmental Progress & Sustainable Energy* (Vol.28, No.3), American Institute of Chemical Engineers, DOI 10.1002/ep.10393, 2009
- [31] FUCHS, J., SCHMID, J.C., MÜLLER, S., MAUERHOFER, A.M., BENEDIKT, F., HOFBAUER, H.: The impact of gasification temperature on the process characteristics of sorption enhanced reforming of biomass, *Biomass Conversion and Biorefinery* (2020) 10:925-936, <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00439-9>, 2019
- [32] NUSSBAUMER, T.: Grundlagen der Holzvergasung, *Heizung Klima* 7 1990, 52-60
- [33] REIL, S.: Zur Biomassevergasung in „stratified downdraft“ Reaktoren und deren Prozessstabilisierung, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2019
- [34] THRÄN, D. (Hrsg.), PFEIFFER, D. (Hrsg.): Methodenhandbuch, Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Methoden zur Bestimmung von Technologiekenwerten, Gestehungskosten und Klimagaseffekten im Vorhaben im Rahmen des BMWi-Forschungsnetzwerkes Bioenergie / BMWi-Förderbereich „Energetische Biomassenutzung“, In: Schriftenreihe „Energetische Biomassenutzung“ Band 04, 5. Aufl. Leipzig, ISBN 978-3-946629-58-0, DOI: 10.48480/ddpt-ys74
- [35] KLEMM, M.: Small Scale Biomass Gasification for Rural Electrification. In: KALTSCHMITT, M. (ed.), *Energy from Organic Materials (Biomass)* (S. 715), 2019, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7813-7_252
- [36] SCHRAUBE, C., FEHRENBACH, D., KREMERS, E., BÜCHNER, D., THEURICH, S., WURDINGER, S.: DBFZ Report Nr. 42, Rahmenbedingungen für einen optimierten Betrieb von kleinen biomassebasierten BHKW, Leipzig, DBFZ, 2021, ISBN 978-3-946629-75-7, DOI: 10.48480/w956-8a59
- [37] HOFBAUER, H., KALTSCHMITT, M., KEIL, F., NEULING, U., WAGNER, J.: Vergasung in der Gasatmosphäre. In: KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (Hg.): *Energie aus Biomasse* (S. 1059), 3. Auflage, Springer Fachmedien (Springer Vieweg), 2016
- [38] Spanner Re² GmbH: Brennstoffe – Holzvergaser & Holzgas-BHKW, <https://www.holz-kraft.com/de/holzvergaser/brennstoffe-holzvergaser-bhkw.html>, abgerufen am 29.03.2022
- [39] SCHILLINGER, L.: Anwendungsorientierte Untersuchung für die Verwertung von Macadamianusschalen zur dezentralen Energieerzeugung mit einem Holzvergasungs-Blockheizkraftwerk, Masterarbeit, HS Albstadt-Sigmaringen, 2021
- [40] WEINHOLD, R.: Nutzung von holzartigen Abfallkomponenten für Holzvergasungsanlagen zur Brenngasgewinnung, Masterarbeit, HTWK Leipzig, 2021
- [41] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002 (GMBI, 2002, Nr. 25-29, S. 511-605)
- [42] SCHULZKE, T.: Synergies from direct coupling of BtL- and PtL-plants, *Chemical Engineering & Technology* 40, 254-259, 2017, doi: 10.1002/ceat.201600179
- [43] Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V.: Pressemitteilung, 01.03.2021, <https://www.fee-ev.de/themen/holzgas/branchenmeldungen>, abgerufen am 20.04.2022
- [44] CARL, K., QUICKER, P.: Kunststoffvergasung im Holz-Kalk-Festbett. Ein neues Verfahren zur Verwertung schwieriger Fraktionen, Vortrag zur Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, 11.06.2021

- [45] RWE Power AG: Mit der Multi-Fuel-Conversion-Anlage forscht RWE an der Gewinnung des wichtigen Rohstoffs Phosphor aus Klärschlamm, Pressemitteilung, <https://www.rwe.com/presse/rwe-power/2021-07-06-mit-multi-fuel-conversion-anlage-forscht-rwe-an-gewinnung-von-phosphor-aus-klaerschlamm>, abgerufen am 13.04.2022
- [46] HERLITZIUS, T. (Hrsg.): Die energetische Nutzung naturbelassener fester Biomasse. Technik, Ökonomie, Ökologie. In: Fortschritte Naturstofftechnik, Institut für Naturstofftechnik, Technische Universität Dresden, Springer Vieweg, 2021. ISBN 978-3-658-33496-3, ISBN: 978-3-658-33497-0 (eBook), ISSN: 2524-3365, ISSN (electronic): 2524-3373, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33497-0>
- [47] Agentur für Erneuerbare Energien: Endenergieverbrauch nach Strom, Wärme und Verkehr, <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/endenergieverbrauch-strom-waerme-verkehr>, abgerufen am 28.04.2022
- [48] ICHA, P., LAUF, T., KUHS, G.: Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021, Schriftenreihe CLIMATE CHANGE 15/2022, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, April 2022, ISSN 1862-4359
- [49] RWTH Aachen University: CFK-Recycling, Pressemitteilung, <https://www.rwth-innovation.de/de/rwth-technologien/detail/cfk-recycling>, abgerufen am 20.04.2022

Anlagen

- Anlage 1 LOI der ECU.de – ein Betrieb der Glaubitz GmbH & Co. KG
- Anlage 2 LOI der ULT AG
- Anlage 3 LOI der SRW metalfloat GmbH
- Anlage 4 LOI der AEL Apparatebau GmbH
- Anlage 5 LOI der WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH
- Anlage 6 LOI der Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH
- Anlage 7 LOI der Westsächsischen Entsorgungs- u. Verwertungsgesellschaft mbH
- Anlage 8 Information der naturamus GmbH (WALA Heilmittel GmbH)

Anlage 1



Glaubitz GmbH & Co. KG · Görlitzer Straße 53 · 02763 Zittau



ecu.de – ein Betrieb der
Glaubitz GmbH & Co. KG

Telefon: 03583/ 55 47 8-0
Telefax: 03583/ 55 47 820
Internet: www.ecu.de
e-mail: info@ecu.de

Tobias Zschunke
Prof. Dr.-Ing. habil.
Prorektor Forschung
Hochschule Zittau/Görlitz
02763 Zittau
Theodor-Körner-Allee 16

Interessensbekundung

Für das Vorhaben **Thermochemisches Versuchsfeld (TCV 4)**

gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes
Sachsen, koordiniert durch die Sächsische Aufbaubank (SAB)

Sehr geehrter Herr Prof. Zschunke,

hiermit bekunden wir, die ecu.de (eine Marke der Glaubitz GmbH & Co. KG, Zittau), unser Interesse
an einer Zusammenarbeit mit der Hochschule Zittau/Görlitz im Rahmen des oben genannten
Vorhabens.

Die von Ihnen vorgestellte Anlagentechnik und dass durch Ihre Mitarbeiter entwickelte
anwendungsorientierte Wissen in Bezug auf die lasergestützte Erfassung von Gasströmungen steht
im direkten Zusammenhang mit den in unserem Unternehmen anfallenden Entwicklungsarbeiten.

Die Ermittlung von pulsierenden, stark schwankenden und in schwieriger Einbaulage zu ermittelnden
Gasvolumenströmen stellen ein Hemmnis bei der Entwicklung von exakt arbeitenden
Volumenstrommesseneinrichtungen an Verbrennungsmotoren dar. Synergieeffekte bei der
Zusammenarbeit im Rahmen des oben genannten Vorhabens entstehen durch die von uns zur
Verfügung gestellte Praxiserfahrung beim Umgang mit Karman-Vortex-Systemen, das in unserem
vorhandenen Teststand bereits im Einsatz ist. Dieses System realisiert eine berührungslose,
verschleißfreie und schnelle Erfassung des Verbrennungsluftvolumenstroms, wenn es gelingt, die
spezifischen Kennlinien hochgenau, zeitlich und räumlich, zu erfassen.

Im Falle der Projektbewilligung stehen wir für einen wissenschaftlichen Austausch und die Beratung
zur Mess- und Regelungstechnischen Erfassung von Betriebsparametern von Verbrennungsmotoren,
zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen



Glaubitz GmbH & Co. KG

Görlitzer Straße 53
02763 ZITTAU
Telefon (0 35 83) 55 47 80
Telefax (0 35 83) 55 47 820
Internet: www.ecu.de - E-Mail: Info@ecu.de

Glaubitz GmbH & Co. KG
Görlitzer Straße 53 · 02763 Zittau
Sitz: Zittau
Amtsgericht Dresden HRA 4688

Umsatzsteuer-Ident.Nr.:
DE 219170462

Volksbank Löbau-Zittau e.G.
Kto.-Nr.: 4 515 151 309
BLZ: 855 901 00
IBAN: DE88559010045151309
BIC: GENODEF1NGS

Persönlich haftende Gesellschafterin:
Glaubitz Verwaltungs GmbH
Sitz: Zittau
Amtsgericht Dresden HRB 25672
Geschäftsführer: Andreas Ullmann

Anlage 2



ULT AG | Am Göpelteich 1 | D-02708 Löbau

Hochschule Zittau/Görlitz
Dipl.-Ing. (FH) Bert Salomo
Fakultät Maschinenwesen
Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau
Tel.: 03583-612-4820
E-Mail: B.Salomo@hszq.de

Löbau, 07.02.2019

Sehr geehrter Herr Salomo,

vielen Dank für Ihre umfangreiche Vorstellung der neuen und für uns sehr hoch interessanten Messtechnik zur Strömungsvisualisierung.

- LETTER OF INTENT -

Die ULT AG ist ein wachstumsstarkes, mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Löbau, das hochwertige Produkte der Luftfilter-, Absaug- und Trocknungstechnik entwickelt. Als Systemlieferant bedient die ULT AG Kunden aus der Automobil-, Kunststoff-, Laser-, Pharma- und Elektroindustrie sowie der Metallverarbeitung weltweit mit technisch hochwertigen Lösungen. Treue zum Umfeld, hohe Investitionen in Forschung, Entwicklung und zukünftige Arbeitsplätze sowie die Unterstützung von Jugendarbeit und sozialen wie kulturellen Projekten sind bedeutende Attribute, die ULT ausmachen. CEO/CTO Dr. Stefan Jakschik und CSO Alexander Jakschik sowie Firmengründer Dr. Christian Jakschik wurden im April 2016 mit dem Preis "Sachsens Unternehmer des Jahres 2016" ausgezeichnet.

Begründung zur Teilnahme

Bei der thermochemischen Umwandlung von sehr aschereichen Brennstoffen muss von einer deutlich höheren Belastung des anlageninternen Gewebefilters ausgegangen werden. Daraus folgend ergibt sich auch ein deutlich größerer Reststoffmassenstrom. Dieser, als deponierfähiger Abfall eingestufte Reststoff, muss aufgrund seiner chemischen Eigenschaften sicher gehandhabt werden um Gesundheitsrisiken für den Betreiber und späteren Entsorger zu minimieren. Der mit dem Anlagenbetrieb zwangsweise Umgang mit Reststoff

ULT AG

Am Göpelteich 1
D-02708 Löbau

Tel.: +49 (0) 3585 4128-0
Fax: +49 (0) 3585 4128-11
E-Mail ult@ult.de
URL www.ult.de

Sparkasse Oberlausitz-Niederschlesien
IBAN: DE 26850501003000200230
BIC WELADED1GRL

Commerzbank Görlitz
IBAN: DE 75850400000305405300
BIC COBADEFFXXX

Firmensitz: Löbau,
HRB 22716, Registergericht Dresden
Vorstand: Dr. Stefan Jakschik, Alexander Jakschik
Aufsichtsratsvorsitzender: Dr. Volker Hänsel
St.-Nr. 208/100/02280
USt-Id.-Nr. DE 233 491 711
EORI-Nr. DE5318955



muss daher unter möglichst definierten Bedingungen erfolgen. Mit der Firma ULT AG aus Löbau wird daher eine strategische Partnerschaft geschlossen. Dieses, auf Filtertechnik spezialisierte Unternehmen, leistet mit seinem Know-how einen wichtigen Betrag bei der zielgerichteten Absaugung beim Umgang mit Reststoffen unter anderem aus Holzvergasungsanlagen. Die Schwierigkeit besteht darin, dass der Raum, in dem sich der Reststoff ausbreiten kann undefiniert und groß ist. Eine zielgerichtete Absaugung kann nur dann erfolgen, wenn der Wirkbereich der Absaugung bekannt ist.

Hierfür konnte im Vorgängerprojekt TCVIII das notwendige Wissen erarbeitet werden. Durch die messtechnische Erfassung des Wirkraumes der verwendeten Absaugtechnologie, z.B. beim Umlagern von Reststoff, der ULT AG, können Gesundheitsrisiken beim Betrieb von diesen und artverwandten Anlagen minimiert werden. Diese verfahrenstechnische Weiterentwicklung lässt sich zukünftig auf weitere Technologiefelder im Bereich des Sekundärbrennstoffhandlings ausweiten und stellt damit einen erfolgsversprechenden Ansatz dar.

Neben diesen Prozessen ist insbesondere auch die Erfassungen und Abscheidung von Stäuben aus Laserprozessen (eine der Kernkompetenzen der ULT AG) ein fokussiertes Anwendungsgebiet. Oft werden hier noch handbetriebene Prozesse angewendet und es können sehr gesundheitsrelevante Stoffe am Arbeitsplatz freigesetzt werden.

Hier ist neben einer entsprechend geeigneten Filtration dieser Stoffe insbesondere die Erfassung ein integraler Bestandteil. Dazu ist unabdingbar das Verhalten der Strömung an der Entstehungsstelle zu kennen und entsprechende Erfassungselemente zu entwickeln. Alle diesbezüglichen Erkenntnisse aus der Forschungstätigkeit der HSZG können entsprechend in die Arbeit der ULT AG integriert werden und damit kontinuierlich zu einer innovativen Produktentwicklung beitragen.

Aus diesen Gründen sehen wir einen hohen wissenschaftlich/wirtschaftlichen Nutzen in dieser Technologie.

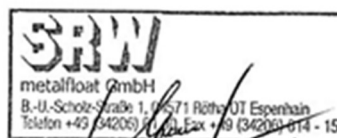
ULT AG
Am Göpelteich 1 - OT Kittlitz
D - 02708 Löbau
Telefon +49(0)3585 / 41 28 - 0
Telefax +49(0)3585 / 41 28 - 11
mailto:info@ult.de www.ult.de

[Löbau, den 07.02.2019, Dr. Stefan Jakschik]

Anlage 3

Interessensbekundung eines Partners in einem aFuE-Antrag

Name des Partners	SRW metalfloat GmbH
Rechtsform Partners	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Anschrift des Partners (bitte auch Bundesland angeben)	Berndt-Ulrich-Scholz-Straße 1 04571 Rötha OT Espenhain Sachsen
Branche / Wirtschaftszweig / Arbeitsbereich des Partners	Recyclingunternehmen
Thema und Kurztitel des Forschungsvorhabens	Thermochemisches Versuchsfeld (TCV 4)
Name der antragstellenden Hochschule und der Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. habil Tobias Zschunke (Hochschule Zittau/Görlitz, IPM)
Kurze Erläuterung zum Hintergrund der Beteiligung an dem geplanten Vorhaben Die SRW metalfloat GmbH arbeitet seit mehreren Jahren im Rahmen von studentischen Arbeiten und Forschungsprojekten mit dem iTN, Prof. Dr.-Ing. Jürgen I. Schoenherr der HSZG zusammen. Im Rahmen interdisziplinärer Forschung an der HSZG zeigte sich der Bedarf einer weiteren intensiven Zusammenarbeit mit dem Schwerpunkt der thermischen Verfahrens- und Energietechnik.	
Kurze Erläuterung zur möglichen Verwertung der Ergebnisse durch den Partner Die SRW metalfloat GmbH erzeugt in ihren Anlagen unter anderem auch Produkte, die als Ersatzbrennstoffe (EBS) eingesetzt werden können. Jährlich handelt es sich um ca. 105.000 t an weitestgehend metallfreien Abfällen, die in den einzelnen Anlagen anfallen und sich hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung z. T. deutlich unterscheiden (z. B. chlorarm, chlorreich, holzarm, holzreich, etc.) Auch die Zusammensetzung innerhalb der einzelnen Fraktionen unterliegt aufgrund diverser Inputströme und unterschiedlicher Quellen einer gewissen Streuung. Für den Einsatz als Ersatzbrennstoff gelten jedoch strenge Vorgaben, vor allem bezüglich der Heizwerte sowie der Gehalte an Schwermetallen (Zink, Blei, etc.) und anderen kritischen Verbunden wie beispielsweise carbonfaserhaltigen Kunststoffen (CFK). Bei einem Überschreiten der festgelegten Grenzwerte ist ein Einsatz als klassischer Ersatzbrennstoff nicht mehr möglich. Die Firma SRW ist daher auf der Suche nach alternativen thermischen Verfahren, um eine Verwertung dieser Produkte auch zukünftig realisieren zu können. Vorlauftforschung und damit die Zusammenarbeit mit der Hochschule Zittau/Görlitz ist notwendig und wird als zielführend angesehen, um Antworten auf aktuelle Fragestellungen sowie Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Produkten aus der Post-Shreddertechnologie als EBS zu bekommen. Speziell die Verwertungsmöglichkeiten kritischer (z. B. CFK-haltiger oder schwermetallhaltiger) Abfälle stehen, unter Berücksichtigung der technologischen und ökonomischen Machbarkeit, sowie der Übertragbarkeit vom Labor- in den industriellen Maßstab, im Vordergrund des Interesses der geplanten Untersuchungen.	
Geplante Barleistung des Partners für das Vorhaben:	Keine
Geplante geldwerte Leistung des Partners für das geplante Vorhaben	Konsultationsleistungen, Teilnahme an Projektberatungen
EURO-Wert der geldwerten Leistung (Schätzung!)	Keine



12.02.19

Datum, Unterschrift des Partners
Stempel

Anlage 4



AEL Apparatebau
GmbH Leisnig
Döbelner Str. 9
04703 Leisnig

Tel.: +49 34321 61-

Web: www.ael.de
Mail: info@ael.de

AEL Apparatebau GmbH Leisnig · Döbelner Str. 9 · 04703 Leisnig

Hochschule Zittau/Görlitz
Fakultät Maschinenwesen
Fachgebiet Technische Thermodynamik
Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau

Leisnig, den 11.02.2019

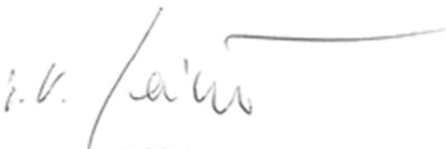
Letter of Intent TCV4

Sehr geehrtes Projektteam der Hochschule Zittau/Görlitz,

die AEL Apparatebau GmbH Leisnig ist eines der führenden Unternehmen Sachsens im Bereich der Entwicklung und Fertigung von Komponenten und Anlagen der thermischen Verfahrenstechnik. Dazu zählen u. A. rekuperative Wärmeübertrager in Rohrbündel-Bauweise.

Die im Rahmen des beantragten Projektes TCV4 in Zittau geplanten Arbeiten zur Entwicklung latenter Wärmespeicher mit maßgeschneiderten Speicherkapazitäten und -leistungen für den Einsatz in dezentralen Energieversorgungsanlagen stoßen bei uns auf großes Interesse. Ganz besonders deshalb, weil die entwickelten Latentwärmespeicher auf Wärmeübertrager-technologien basieren, die bei uns im Hause bereits gefertigt werden, und diese Wärmespeicher auf vielfältigste Weise flexibel in der Wärmeversorgungstechnik einsetzbar sind. Wir sehen in den Latentwärmespeichern ein sehr zukunftssträchtiges Marktsegment für unser Unternehmen.

Wir unterstützen Ihren Projektantrag ohne Vorbehalt und wünschen Ihnen für die Beantragung und Bearbeitung des Projektes viel Erfolg. Wir unterstützen Sie gern in fachlicher Hinsicht und freuen uns über eine rege Kommunikation bezüglich des Projektverlaufes.



Dr.-Ing. Detlef Seime
Leiter Verfahrenstechnik/Entwicklung

Geschäftsführer
Sebastian Münch
Mario Richter

St.-Nr. 236/105/00250
Amtsgericht Chemnitz
HRB 104503
Ust.-Id.-Nr.: DE 141706215

Commerzbank AG Leipzig
Deutsche Bank AG Leipzig
Kreissparkasse Döbeln
LBBW Bank Leipzig
VR Bank Mittelsachsen

BIC COBADE33XXX IBAN DE24 8504 0000 0410 0160 00
BIC DEUTDE33XXX IBAN DE57 8507 0000 0229 2605 00
BIC SOLADE33DIN IBAN DE31 8505 5462 0035 0208 87
BIC SOLADE33T00 IBAN DE06 6005 0101 7461 5125 18
BIC GENODE33D11 IBAN DE80 8506 5468 0060 2404 34



Anlage 5

Sehr geehrtes Projektteam der Hochschule Zittau/Görlitz,

die WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH in Olbernhau ist eines der innovativsten Unternehmen Sachsens im Bereich der Entwicklung und Fertigung energietechnischer Komponenten mit dem Schwerpunkt Wärmeübertrager. Zum Kundenkreis gehören mehrere Hersteller von Blockheizkraftwerken, welche unsere Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung nutzen. Durch dies B2B Kontakte ist uns der Kundenbedarf für Lösungen zur Speicherung latenter Wärmepotentiale als Systemintegration bekannt.

Die im Rahmen des beantragten Projektes TCV4 in Zittau geplanten Arbeiten zur Entwicklung latenter Wärmespeicher mit maßgeschneiderten Speicherkapazitäten und -leistungen für den Einsatz in dezentralen Energieversorgungsanlagen stoßen bei uns auf großes Interesse. Ganz besonders deshalb, weil die entwickelten Latentwärmespeicher auf Wärmeübertragertechnologien basieren und sehr flexibel auch im Zusammenhang mit fossilen BHKW bzw. auf vielfältigste Weise in der Wärmeversorgungstechnik einsetzbar sind.

Wir unterstützen Ihren Projektantrag ohne Vorbehalt und wünschen Ihnen für die Beantragung und Bearbeitung des Projektes viel Erfolg. Wir unterstützen Sie gern in fachlicher Hinsicht und freuen uns über eine rege Kommunikation bezüglich des Projektverlaufes.

Mit besten Grüßen



Volker Schubert
Innovationsmanager

WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH

04. 11.2.2023

Anlage 6



Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH Großkaynaer Str. 1 06217 Merseburg - Beuna

Tobias Zschunke
 Prof. Dr.-Ing. habil.
 Hochschule Zittau/Görlitz
 Theodor-Körner-Allee 16
 02763 Zittau

09.09.2020

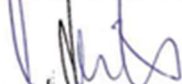
- Letter of Intent -

Für das Vorhaben **Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA)**
 gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Sachsen,
 koordiniert durch die Sächsische Aufbaubank (SAB)

Sehr geehrter Herr Prof. Zschunke,

hiermit bekunden wir, die Entsorgungsgesellschaft Saalekreis mbH, unser Interesse an einer Zusammenarbeit mit der Hochschule Zittau/Görlitz im Rahmen des oben genannten Vorhabens. Die von Ihnen vorgestellte Anlagentechnik zur thermochemischen Vergasung und das anwendungsorientierte Wissen Ihrer Mitarbeiter in Bezug auf die energetische Nutzung von Rest- und Abfallstoffen steht im direkten Zusammenhang mit den aktuellen Entwicklungsarbeiten unseres Unternehmens. Die Einsatzeignung der durch uns aufbereiteten Rohstoffe der Grünschnittsammlung für die Prozessbedingungen der thermochemischen Vergasung stellt für uns ein Hemmnis bei der weiteren technologischen Betrachtung der Nachnutzung dar. Synergieeffekte bei der Zusammenarbeit im Rahmen des oben genannten Vorhabens entstehen durch die von uns zur Verfügung gestellte Praxiserfahrung beim Umgang mit nachwachsenden Rohstoffen kommunaler Sammlung und deren vielfältige mechanische Aufbereitung. Im Rahmen der Projektbearbeitung stehen wir für einen wissenschaftlichen Austausch zur beschriebenen Thematik gern zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen



Volker Huth
 Geschäftsführer

Sitz der Gesellschaft
 Großkaynaer Str.1
 06217 Merseburg – Beuna
 Telefon 0 34 61/4 40-0
 info@egsaaalekreis.de
 www.egsaaalekreis.de

Niederlassungen
 Am Stadtwege 9
 06268 Querfurt
 Telefon 0 34 61/4 40-2 80

Lilienthalstr. 3
 06188 Landsberg - Oppin
 Telefon 0 34 61/4 40-2 70

Geschäftsführer
 Volker Huth
 Aufsichtsratsvorsitzender
 Hartmut Handschak

Bankverbindung Saaleparkasse
 IBAN DE50 8005 3762 3310 0030 85
 BIC NOLA21HAL
 USt.-Id.Nr. DE139715854
 HRB Stendal Nr. 202630

Anlage 7

Westfälische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH
Am Westufer 3 ■ 04463 Großpösna/OT Störmthal

Hochschule Zittau/Görlitz
Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke
Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau



Firmensitz

Am Westufer 3
04463 Großpösna/OT Störmthal

Zentraldeponie Cröbern
MBA Cröbern

Telefon: (03 42 99) 53 - 0
Telefax: (03 42 99) 53 - 1 28

info@wev-sachsen.de
www.wev-sachsen.de



Zertifiziert nach
DIN EN ISO 14001:2015



Entsorgungs-
Fachbetrieb

Datum
24.07.2020

- Letter of Intent -

Für das Vorhaben

Hochtemperaturkonversion von Rest- und Abfallstoffen für Energiedienstleistungen (HORA)

gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Sachsen, koordiniert durch die Sächsische Aufbaubank (SAB)

Sehr geehrter Herr Prof. Zschunke,

hiermit bekunden wir, die Westfälische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH, unser Interesse an einer Zusammenarbeit mit der Hochschule Zittau/Görlitz im Rahmen des oben genannten Vorhabens.

Die von Ihnen vorgestellte Anlagentechnik zur thermochemischen Vergasung und das durch Ihre Mitarbeiter*innen entwickelte anwendungsorientierte Wissen in Bezug auf die energetische Nutzung von Rest- und Abfallstoffen steht im direkten Zusammenhang mit den in unserem Unternehmen aktuell anfallenden Entwicklungsarbeiten.

Im Rahmen seiner Masterarbeit ermittelt unser Masterand, Herr Robert Weinhold, ob das Holz aus Siebüberläufen einer Biomüll- und Grünschnitt-Kompostieranlage zur Gewinnung von Holzgas genutzt werden kann. Das dabei entstehende Produktgas soll nicht, wie sonst üblich, in einem BHKW zum Einsatz kommen, sondern als Brenngas für eine „regenerative thermische Oxidation“ zur Abluftreinigung genutzt werden. Wir erhoffen uns davon, in der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlage Cröbern den Erdgaseinsatz minimieren und Stoffkreisläufe schließen zu können.

/2

Aufsichtsratsvorsitzender
Landrat Henry Graichen

Geschäftsführer
Bernd Beyer

Sitz der Gesellschaft
Großpösna/OT Störmthal

Registergericht
Amtsgericht Leipzig
HRB 4545

Commerzbank AG Leipzig

Konto-Nr.: 43 70 077 00
BLZ: 860 800 00
IBAN DE61 8608 0000 0437 0077 00
SWIFT-BIC: DRES DE 33 060

Deutsche Kreditbank AG Berlin

Konto-Nr.: 13 64 645
BLZ: 120 300 00
IBAN DE37 1203 0000 0001 3646 45
SWIFT-BIC: DEUT 33 001

Stadt- und Kreissparkasse Leipzig

Konto-Nr.: 11 000 39860
BLZ: 860 555 92
IBAN DE11 8605 5592 1100 0398 60
SWIFT-BIC: WELA DE 33 000



Bei den Vergasungstestläufen an der Hochschule Zittau sollen die Produktgaszusammensetzung und die Vergasungsrückstände analysiert sowie die allgemeine Machbarkeit des Vorhabens geprüft werden.

Im Rahmen der Projektbearbeitung stehen wir für einen wissenschaftlichen Austausch zur beschriebenen Thematik gern zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

**Westsächsische Entsorgungs- und
Verwertungsgesellschaft mbH**


i.V. Dr. Karsten Mänz
Technischer Leiter
i.A. Sebastian Seyfarth
Projekting. Technik / Energiemanagement

Anlage 8



naturamus GmbH | Weilheimer Straße 3 | 73101 Aichelberg

Herr Roman Schneider
Hochschule Zittau/Görlitz
Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung
und Meßtechnik
Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau

22. Sep. 2020

Seite 1 | 1

Prüfung der Machbarkeit energetischer Verwertung von Macadamianusschalen

Sehr geehrter Herr Schneider,

wie besprochen, erläutere ich Ihnen gerne unser Projekt und den Grund für den Testdurchlauf der Macadamianusschalen auf Ihrer Anlage.

Die naturamus GmbH ist als Tochtergesellschaft der WALA Heilmittel GmbH für den Rohstoffeinkauf für die WALA zuständig. Die naturamus bezieht seit vielen Jahren Macadamianüsse von Kleinbauern über die Limbus Group Ltd. in Kenia. Unser Partner Limbus trocknet, knackt, sortiert und exportiert die Nüsse. Aktuell wird ein Teil der Schalen verbrannt, um mit der dabei entstehenden Wärme die Nüsse zu trocknen. Bei der letzten Ernte sind zusätzlich 1000 Tonnen Schalen übriggeblieben, die bislang nicht genutzt werden können.

Die Wala erarbeitet mit der Klimaschutzorganisation Atmosfair ein Konzept zur CO₂-Kompensierung. Dabei wurde diskutiert, ein eigenes Klimaprojekt mit den Kompensationszahlungen zu realisieren. Durch einen Kontakt zwischen der WALA und einem bayrischen Landwirt, der eine Holzvergaser-Anlage der Firma Spanner Re2 betreibt, entstand die Idee, eine solche Anlage in Kenia für die dezentrale Energieerzeugung durch die Vergasung der Macadamianusschalen zu planen und zu installieren. Geplant ist die entstehende Wärme weiterhin zur Trocknung der Schalen zu nutzen und den Strom möglicherweise über Mikro-Grids den Landwirten zur Verfügung zu stellen.

Im Rahmen meiner Masterarbeit koordiniere ich den Testdurchlauf, werte die Ergebnisse aus und ermittle Potenziale und Schwachstellen. Wir freuen uns, dass Sie uns bei diesem Vorhaben unterstützen!

Bei weiteren Fragen können Sie sich gerne mit mir in Verbindung setzen.

Freundliche Grüße,

A.L. Schillinger

Lea Schillinger

naturamus GmbH	info@naturamus.de	Geschäftsführer Ralf Kunert	Kreissparkasse Göppingen BIC: GÖPS DE 66
Weilheimer Straße 3	naturamus.de	Amtsgericht Ulm	IBAN DE 61 6105 0000 0049 0448 14
73101 Aichelberg	+49 71 64 94 99 1-0	HRB 729771	Kontrollstelle DE-ÖKD-007
Germany	+49 71 64 94 99 1-99	USt-Id DE291687147	Erfüllungsort u. Gerichtsstand ist Göppingen