Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

Brennstoffspezifische Kennzahlen zum Vergasungs- und Ascheverhalten unterschiedlich aufbereiteter Holz- und Strohbrennstoffe (KeVergAv)

Schlussbericht

Rafiandy Dwi Putra, André Herrmann, Dr. Marco Klemm, Dr. Annett Pollex

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112

www.dbfz.de
info@dbfz.de

Datum: 12.11.2024

Brennstoffspezifische Kennzahlen zum Vergasungs- und Ascheverhalten unterschedlich aufbereiteter Holz-und Strohbrennstoffe (KeVergAv)

Auftraggeber oder Zuwendungsgeber (bei Forschungsförderung)	Projektträger Jülich (PtJ) | Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) Ansprechpartner: Herr Tropschug Zimmerstraße 26 - 27 10969 Berlin
Kontakt:	DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Torgauer Straße 116 04347 Leipzig Tel.: +49 (0)341 2434-112 E-Mail: info@dbfz.de Internet: www.dbfz.de **Rafiandy Dwi Putra** Tel.: +49 (0)341 2434-512 E-Mail: rafiandy.dwi.putra@dbfz.de **André Herrmann** Tel.: +49 (0)341 2434-573 E-Mail: andre.hrermann@dbfz.de
Erstelldatum:	19.11.2024
Projektnummer DBFZ:	3130074
Projektnummer Auftraggeber oder Zuwendungsgeber:	03EI5416
Gesamtseitenzahl + Anlagen	43 + 11

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis ..... **IV**

1 Kurzfassung **6**

1.1 Aufgabenstellung 6

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 6

1.3 Planung und Abflauf des Vorhabens 6

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 7

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8

2 Eingehende Darstellung **10**

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnissdarstellung 10

2.1.1 Arbeitspaket 1: Brennstoffbereitstellung 10

2.1.2 Arbeitspaket 2: Vergasungsversuche | Kennzahlenbestimmung 12

2.1.3 Arbeitspaket 3: Untersuchungen zum Ascheverhalten 22

2.1.4 Arbeitspaket 4: Analytik 28

2.1.5 Arbeitspaket 5: Wissenstransfer 34

2.2 Meilensteine und Maßnahmen 34

2.3 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 35

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 35

2.5 Verwertbarkeit der Ergebnisse 36

2.6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens von anderen Stellen 37

2.7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 37

Abbildungsverzeichnis **38**

Tabellenverzeichnis **40**

Literatur- und Referenzverzeichnis **41**

A 1 Haupt- und Nebenelemente der festen Rückstände aus der Ascheuntersuchung im Muffelofen **44**

A 2 Vortrag zum Statuskonferenz **46**

A 3 Homogenisierungsworkshop **50**

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
Al	Aluminium
Al_2O_3	Aluminiumoxid
AP	Arbeitspaket
Ar	Argon
AS4	mit 4 Ma.% additivierte Strohpellets
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
C	Kohlenstoff
C_2H_4	Ethylen
C_2H_6	Ethan
Ca	Kalzium
CaO	Kalziumoxid
CH_4	Methan
Cl	Chlor
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTG	Ableitung der Thermogravimetrie
EUBCE	*European Biomass Conference and Exhibition*
Fe	Eisen
Fe2O3	Eisen(III)-oxid
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
H	Wasserstoff
H_2	Wasserstoffgas
H_2O	Wasserdampf
HAWK	Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
HCl	Salzsäure
ICP-EOS	Emissionsspektrometrie unter Verwendung eines induktiv gekoppelten Plasma
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Kalium
K_2O	Kaliumoxid
$KAlSi_2O_6$	Leuzit
$KAlSiO_4$	Kalsilit
Mg	Magnesium
MgO	Magnesiumoxid
MnO	Manganoxid
N	Stickstoff
Na	Natrium

Abkürzung	Erklärung
Na_2O	Natriumoxid
NH_4Ac	Ammoniumacetat
O	Sauerstoff
O_2	Sauerstoffgas
P	Phosphor
P_2O_5	Diphosphorpentoxid
PC	Hauptkomponente
PCA	Hauptkomponentenanalyse
ROC	Restliche oxidierbare Kohlenstoffe
S	Schwefel
SEM	Raster-Elektronmikroskopie
Si	Silizium
SiO_2	Siliziumoxid
SO_3	Schwefeltrioxid
SP	Strohpellets
STA-QMS	simultane thermische Analyse gekoppelt mit Quadrupol-Massenspektrometer
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
TGA	Thermogravimetrie Analyse
Ti	Titan
TIC	Totale anorganische Kohlenstoffe
TOC_{400}	Totale organische Kohlenstoffe
TRL	Technologiereifegrad
TW230	Bei 230 °C torrefizierte Pellets aus Landschaftspflegeholz
TW270	Bei 270 °C torrefizierte Pellets aus Landschaftspflegeholz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
W	Pellets aus homogeniesiertem Landschaftspflegeholz
WS	gewaschene Strohpellets
XRD	Röntgendiffraktometrie
Zn	Zink

1 Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts ist die Ableitung von brennstoffspezifischen Kennzahlen anhand der durchgeführten Versuche und Simulationen, um das Vergasungs- und Ascheschmelzverhalten beim thermochemischen Vergasungsprozess zu beschreiben. Im Projekt wurden die beiden Brennstoffe Holz und Stroh untersucht. Dabei wurden Stroh und Holz unterschiedlich aufbereitet (Waschen, Torrefizieren, und Additivieren) und als Pellets sowohl für Ascheuntersuchungen in einer STA-QMS im Labor und bei Verbrennungsversuchen als auch in einem Festbettlaborvergaser im DBFZ-Technikum eingesetzt. Mit den Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab sollte der Einfluss des Aufbereitungszustandes der eingesetzten Biomassen auf das Vergasungs- und Ascheschmelzverhalten untersucht werden.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Neben der personellen Kompetenz verfügt das DBFZ über gut ausgebaute Labor- und Technikumskapazitäten zur Charakterisierung und Aufbereitung biogener Festbrennstoffe. Das DBFZ erforscht in einer Vielzahl von Projekten die Prozesse bei der thermochemischen Konversion von biogenen Festbrennstoffen und verfügt über eine breite Datenbasis zu den Eigenschaften und der Zusammensetzung solcher Brennstoffe. Neben einer großen Expertise auf dem Gebiet der Biomasseverbrennung wurden in den letzten Jahren sowohl die technischen Möglichkeiten als auch die praktischen Erfahrungen auf dem Gebiet der Biomassevergasung systematisch ausgebaut. Zu diesem Aufbau gehört auch die Methodenentwicklung am Festbett-Laborvergaser des DBFZ, der in diesem Projekt eingesetzt werden soll. Die Methode zur Charakterisierung von Brennstoffen im Festbett-Laborvergaser wurde im Rahmen des Projektes OpToKNuS (FKZ: 03KB163A) erstmals entwickelt [1] und dann im KeVergAv-Projekt genutzt.

1.3 Planung und Abflauf des Vorhabens

Das Projekt wurde im Februar 2021 gestartet und sollte planmäßig nach 2 Jahren abgeschlossen werden. Im Laufe des Projekts wurden zwei kostenneutrale Projektverlängerungen bis zum 31.03.2024 beantragt. Die Gründe der kostenneutralen Verlängerungen waren die Personalsituation (Elternzeit, Fluktuation von Mitarbeitenden) und der, auch durch Krankheit und Mitarbeiterfluktuation bedingte, verzögerte Abschluss der Methodenentwicklung am Festbett-Laborvergaser im Projekt OpToKNuS.

Im Laufe des Projekts fanden neben dem Auftakttreffen regelmäßige Projekt- / Arbeitstreffen statt. In diesen Treffen wurden der aktuelle Stand sowie die Probleme und Herausforderungen bei der Durchführung einzelner Arbeitspakete vorgestellt und das weitere Vorgehen diskutiert. Abgesehen vom oben erläuterten Zeitverzug erfolgten nur geringfügige Anpassungen bezüglich der Arbeitsinhalte. Die geplante Vergasungsversuche wurden erfolgreich durchgeführt. Kennzahlen bezüglich des Vergasungs- und Aschebildungsverhaltens konnte abgeleitet werden. Basierend auf den Festbett-Laborvergaseruntersuchungen wurden die Vergasungsprozesse für die Brennstoffe Holz und Stroh analysiert, bilanziert, beschrieben und verglichen.

Zur Erreichung der Projektziele wurden die Aufgaben in diesem Vorhaben auf die folgenden Arbeitspakete aufgeteilt:

- Arbeitspaket 1: Brennstoffbereitstellung
- Arbeitspaket 2: Vergasungsversuche | Kennzahlenbestimmung
- Arbeitspaket 3: Untersuchungen zum Ascheverhalten
- Arbeitspaket 4: Analytik
- Arbeitspaket 5: Wissenstransfer

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ausgangspunkt für die Arbeiten im Projekt KeVergAv waren die Probleme im Praxisbetrieb von Biomassevergasern mit Holzsortimenten minderer Qualität und nicht-holzartigen Brennstoffen wie Stroh. Diese Probleme sind auf kritische Inhaltsstoffe der schwierigen Brennstoffe und daraus resultierenden Störungen wie z. B. durch auftretende Verschlackungen sowie auf die Inhomogenität der Brennstoffchargen zurückzuführen. Daher war ein stabiler wirtschaftlicher Betrieb mit Stroh oder anderen Rest- und Abfallstoffen im Bereich der kleintechnischen Biomassevergasung noch nicht der Stand der Technik. Zur Anpassung der Vergasungstechnik an schwierige Brennstoffe ist eine genaue Kenntnis des Verhaltens dieser Brennstoffe unter Vergasungsbedingungen notwendig.

Um eine Abgrenzung zu anderen Förderprojekten sicherzustellen und den Stand der Technik auf den vom Vorhaben berührten Arbeitsgebieten zu ermittlen, wurde in folgenden Portalen recherchiert:

- Förderkatalog des Bundesregierung, herausgegebenen von Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) http://foerderportal.bund.de
- Projekdatenbank der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) http://www.nachwachsenderohstoffe.de/projekt-foerderung/
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/projektsuche
- Deutsche Paten- und Markenamt www.dpma.de
- Technologie- und Förderzentrum Bayern (TFZ) www.tfz.bayern.de
- EnArgus: Zentrales Informationssystem Energieforschungsförderung https://www.enargus.de

Der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich des brennstoffspezifischen Vergasungs- und Ascheschmelzverhaltens und zugehöriger Kennzahlen sowie das Einfluss der verschiedenen Aufbereitungstechniken wurde im Projektvorfeld und im Laufe der Projektdurchführung durch Recherchen in den folgenden Wissenschaftsportalen ermittelt:

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Verlags Elsevier https://www.sciencedirect.com
- Wissenschaftliche Veröffentlichung der Fachgesellschaft American Chemical Society https://pubs.ac.org
- Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Verlags Springer https://link.springer.com
- Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Verlags MDPI https://mdpi.com
- Wissenschaftliche Veröffentlichungen der Verlagsgruppe Taylor and Francis https://taylorandfrancis.com
- Literaturrecherche zu wissenschaftlichen Produkten mittels Google Scholar https://scholar.google.de

Biomassevergasung

Die Biomassevergasung ist ein thermochemischer Konversionsprozess, bei dem biogene Festbrennstoffe unter unterstöchiometrischen Bedingungen in ein biogenes Produktgas umgewandelt werden, wobei in der Regel ein kohlenstoffreicher Rückstand (der sogenannte Vergaserkoks) gebildet wird [2–4]. In den letzten Jahrzehnten haben Biomassevergasungsanlagen einen hohen Technologiereifegrad (TRL 7 - 9) erreicht und es existieren zahlreiche kommerzielle Anlagen [2]. In Deutschland und Europa war über viele Jahre eine stetige Zunahme von Anlagen im Bereich der Biomassevergasung zu verzeichnen, die insbesondere für Deutschland in den letzten Jahren in einen zunehmend stagnierenden Markt übergegangen ist. Für Deutschland ist ein zunehmend schwieriges Umfeld, etwa bei der Brennstoffversorgung, zu beobachten [5]. Damit sind Aktivitäten zur Diversifizierung des Brennstoffspektrums, wie sie Gegenstand des Projektes KeVergAv waren, essentiell für eine gesicherte Zukunft der Holzvergaserbranche. Für die dezentrale Anwendung kommen bei der kleintechnischen Anwendung in der Regel autotherm betriebene Festbettvergaser mit Temperaturen von z. T. deutlich über 1000 °C zum Einsatz, die mit Holzpellets oder -hackschnitzeln betrieben werden [6]. Ein Großteil der installierten kleintechnischen Anlagen stammt aus deutscher Herstellung [7] Da die Produktgasqualität einen entscheidenden Einfluss auf die Nutzbarkeit in den nachgelagerten Gasnutzungspfaden hat, sind dort in den letzten Jahren erhebliche technische Verbesserungen realisiert worden. Dies ermöglicht nicht nur die effiziente energetische Nutzung, sondern ermöglicht auch die stoffliche Nutzung des Synthesegases. Der feste Rückstand aus der Biomassevergasung wird nur in Einzelfällen genutzt und in den meisten Anlagenkonzepten als Abfall entsorgt.

Mit Blick auf die DBFZ-Aktivitäten knüpft das Projekt direkt an das Projekt OpToKNuS an, da die hier entwickelte Untersuchungsmethode zur Brennstoffcharakterisierung genutzt wurde und bereits bestehende Messergebnisse zum Vergleichen und zur Plausibilitätsprüfung dienten.

Aschebedingte Probleme bei der energetischen Nutzung von biogenen nicht-holzartigen Reststoffen

Das Ascheschmelzverhalten und die damit verbundene Verschlackungsneigung hängen zum einen von der tatsächlichen Glutbetttemperatur und zum anderen von der Zusammensetzung des Brennstoffes ab. Besonders hohe Anteile an den Alkalimetallen Kalium und Natrium führen in Verbindung mit hohen Chlorgehalten oder anderen Salzbildnern, z. B. Sulfaten, aufgrund der Bildung von Salzschmelzen, sowie beim Vorhandensein sogenannter Netzwerkbildner wie Silizium und Aluminium, zu niedrigen Ascheschmelztemperaturen [8,9]. Durch die Anwesenheit von Erdalkalimetallen werden anstelle der niedrig schmelzenden Kaliumsilikate höher schmelzende Calciumsilikate gebildet und es kommt zu höheren Kaliumemissionen. Die Zugabe des Aluminiumsilikates Kaolin führt ebenfalls zu einer Erhöhung des Ascheschmelzpunktes [10–12]. Allerdings wird Kalium hier als K-Al-Silikat eingebunden. Dadurch führt die Zugabe von Kaolin nicht nur zu einer verringerten Verschlackungsneigung, sondern trägt auch zur verringerten Freisetzung von Aschebildnern und einer Verminderung der Kaliumemissionen bei.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Da zukünftig verstärkt biogene Rest- und Abfallstoffe statt des bislang präferierten Brennstoffs Holz für die Bioenergieerzeugung eingesetzt werden sollen und diese deutlich heterogener sind als Holz, gewinnt der Aspekt der Brennstoffhomogenisierung bzw. der Erzeugung von vergleichbaren Teilchargen zunehmend an Bedeutung. Ausgehend vom Beispiel Stroh und unter Einbindung von Erfahrungen aus einer

Vielzahl von Projekten wurde daher mit der Erstellung einer Best-Practise-Sammlung zur Homogenisierung begonnen. Dabei arbeitet das DBFZ mit den folgenden Stellen zusammen:

- Technolgie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe in Straubing (TFZ Straubing): vielfältige Projekterfahrung mit Holzhackschnitzeln und Holzreststoffsortimenten
- Univeristät Kassel: Erfahrung mit der Aufbereitung von Bioabfallströmen
- BEA Institut für Bioenergie GmbH: Ringversuchsanbieter und Mitarbeit in den Bionorm-Projekten auf europäischer Ebene
- Hochschule für Anhewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) Hidelsheim/Holzminden/Göttingen: langjährige Erfahrung in der Standardisierung von biogenen Festbrennstoffen
- Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg: Erfahrung in der Aufbereitung und Analyse von Holzbrennstoffsortimenten
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Siherheits-, und Energietechnik UMSICHT: Erfahrung in der Aufbereitung von Laub

Innerhalb dieses Projektes fanden 7 Projekttreffen zu diesem Thema statt. Die dabei entstandene Best-Practise-Sammlung ist finalisiert.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnissdarstellung

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Aufgaben im Projekt. Die Ergebnisse zu den einzelnen Arbeitspaketen sind im Folgenden ausführlich dargestellt.

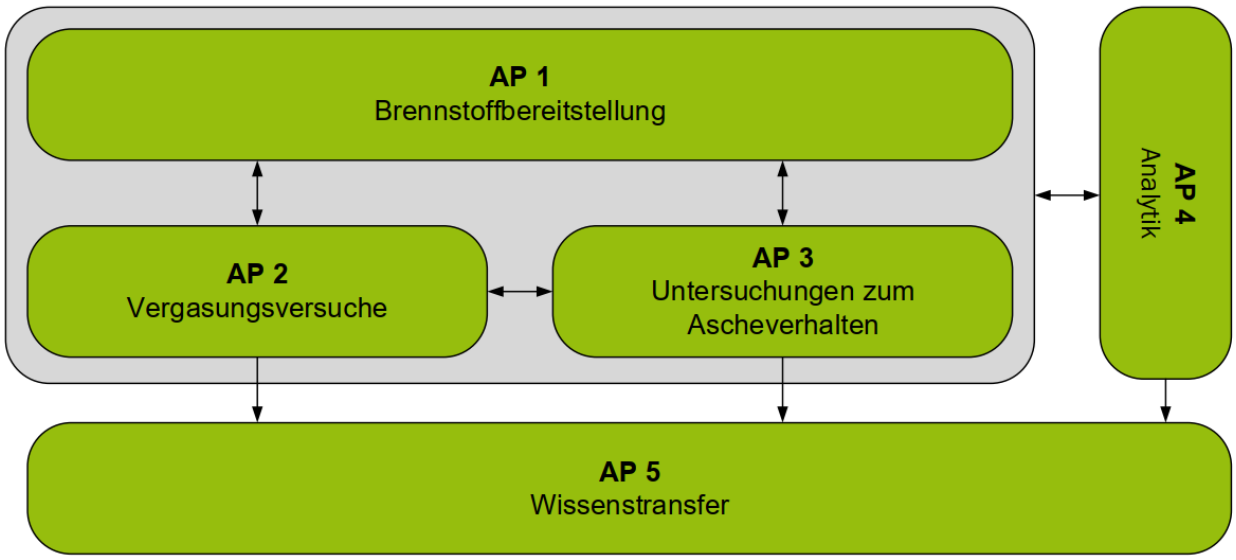


Abbildung 1 Übersicht Arbeitspakete / Arbeitsschwerpunkte

2.1.1 Arbeitspaket 1: Brennstoffbereitstellung

Das Ziel dieses Arbeitpakets war die Bereitstellung der Brennstoffchargen aus holz- und strohartigen Reststoffen zur Nutzung in den weiteren Arbeitspaketen. Aus dem Projekt „stROhgas“ standem dem DBFZ noch folgende Brenstoffe zur Verfügung:

- Pellets aus homogenisiertem Stroh
- Pellets aus homogenisiertem und gewaschenem Stroh
- Pellets aus mit 4 Ma-% Kaolin additiviertem Stroh
- homogenisierte ungewaschene (roh) Strohspäne

Die Menge und die Qualität der vorhandenen Strohbrennstoffen, sowie die Vollständigkeit der dazugehörigen Daten wurden in einem ersten Schritt geprüft. Nach dieser Prüfung wurde festgestellt, dass die bereits vorhandenen Strohbrennstoffe in diesem Projekt eingesetzt werden können. Als Referenz wurden Pellets aus holzartigem Landschaftpflegematerial beschafft, homogenisiert und für die weitere Projektarbeit eingesetzt. Die Aufbereitung des Landschaftspflegematerials wurde dabei analog zu den Strohbrennstoffen durchgeführt und wird in Abbildung 2 gezeigt. Ein Teil der holzartigen Pelletschargen wurde bei zwei verschiedenen Temperaturstufen (230 °C, 270 °C) in einem Drehrohrofen torrefiziert.

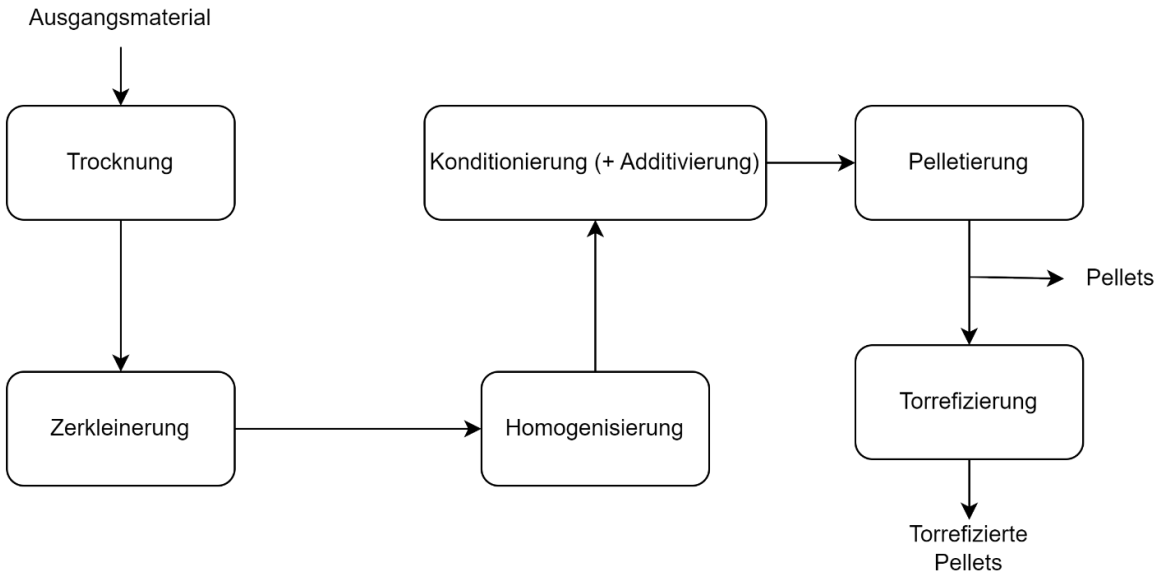


Abbildung 2 Fließbild der Brennstoffaufbereitung

Brennstoff	roh	gewaschen	Torrefiziert 230°C	Torrefiziert 270°C	Additiviert 4% Kaolin
Stroh			nicht untersucht	nicht untersucht	
Landschafts pflege material		nicht untersucht			nicht untersucht

Abbildung 3 Visuelle Darstellung der hergestellten Pelletsproben

Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurden insgesamt diese folgenden pelletierten Brennstoffchargen aus den holzartigen (Landschaftspflegematerial) und strohartigen Reststoffen für die weiteren Arbeitspakete zur Verfügung gestellt:

- Pellets aus homogenisiertem Stroh (SP)
- Pellets aus gewaschenem Stroh (WS)
- Pellets aus mit 4 Ma-% Kaolin additiviertem Stroh (AS4)
- Pellets aus homogenisertem Landschaftspflegeholz (W)
- Bei 230 °C torrefizierte Pellets aus Landschaftsfplegeholz (TW230)
- Bei 270 °C torrefizierte Pellets aus Landschaftspflegeholz (TW270)

Die Ergebnisse der Brennstoffanalyse werden im Arbeitspaket 4 Analytik dargestellt.

2.1.2 Arbeitspaket 2: Vergasungsversuche | Kennzahlenbestimmung

STA- Versuche

Zwei STA-Versuchsreihen würden mit jeweils unterschiedlichen Atmosphären durchgeführt: **(1)** 0 %-O_2 (O_2:Ar = 0 %:100 %) und **(2)** 10 %-O_2 (O_2:Ar = 10 %:90 %) durchgeführt. Diese zwei Atmosphären wurden eingestellt, um respektiv die Pyrolyse- und Vergasungsbedingungen zu modellieren. Dazu wurde das Gerät STA 445 FS Jupiter (NETZSCH GmbH) verwendet. Für die thermische Untersuchung wurden alle Brennstoffpellets gemahlen und durch 0,5 mm-Maschen gesiebt. Bei jedem Versuch wurde 15 mg von Proben bis auf 1000 °C mit der Heizrate von 10 K/min geheizt. Während des Versuchs wurden der Massenverlust und die entstandenen Gase überwacht.

Die Bestimmung der bei der STA-Versuche entstandenen Gase erfolgte kontinuierlich mit dem Quadrupol-Massenspektrometer QMS 403 D Aëolos (QMS) (NETZSCH GmbH). Die STA-QMS-Kopplung wurde durch eine Transferleitung (Quarzkapillarrohr) realisiert, die beheizt und auf einer konstanten Temperatur von 200 °C gehalten wurde, um eine Kondensation der entstehenden Gase zu vermeiden. Die Gase wurden anhand ihrer Intensität entsprechend ihrem jeweiligen Masse-Ladungs-Verhältnis (m/z) nachgewiesen. Die Moleküle mit den atomaren Masseneinheiten von 2, 16, 18, 28, 30, und 44 wurden analysiert und überwacht, die H_2, CH_4, H_2O, CO, C_2H_6, und CO_2 entsprechen.

Abbildung 4 stellt die Ergebnisse der Thermogravimetrie Analyse (TGA) der STA-Versuche von verschiedenen Brennstoffchargen unter Atmosphäre 0 %-O_2 und 10 %-O_2, während die Ableitung der TGA-Kurve (*engl. Derivative thermogravimetric (DTG)*) in Abbildung 5 präsentiert wird. In der Atmosphäre mit 0 %-O_2 lässt sich überwachen, dass die Hauptzersetzung von flüchtigen Bestandteilen zwischen 300 °C und 400 °C passiert. Dieser Temperaturbereich entspricht die Zersetzungstemperatur von Zellulose. Daher lässt sich feststellen, dass Zellulose der Hauptbestandteil sowohl der holzigen als auch der strohartigen Brennstoffe ist. Wegen der Zersetzung von den flüchtigen Bestandteilen bleibt nach der thermischen Behandlung nur der feste Kohlenstoff und die Asche. Wegen seines geringen festen Kohlenstoff- und Aschegehalt ist die Restmasse von WS mit ca. 30 Ma.% am niedrigsten. Im Unterschied dazu haben die torrefizierten Proben, besonders TW270, die höchste Restmasse. Durch die Torrefizierung werden die flüchtigen Bestandteile ausgestoßen und daher steigt der Anteil vom festem Kohlenstoff. Bei den holzartigen Proben ist eine kleine Spitze der Rate des Massenverlusts bei ca. 650 °C zu erkennen. Diese ergibt sich voraussichtlich wegen der Zersetzung von $CaCO_3$ in CaO und CO_2, da die holzartigen Brennstoffe an Kalzium reich sind.

Unter Vergasungsbedingungen (Abbildung 4 (b) und Abbildung 5 (b)) bleibt weniger Restmasse von allen Brennstoffproben im Vergleich zu den Pyrolysebedingungen. Hier passierte nicht nur die Zersetzung von flüchtigen Bestandteilen, sondern auch die Vergasung des Kohlenstoffgehalts durch die Reaktion mit dem vorhandenen Sauerstoff. Im Unterschied zu den Pyrolysebedingungen haben die holzartigen Proben unter Vergasungsbedingung die niedrigste Restmasse, da die holzartigen Proben geringeren Aschegehalt als die Strohproben aufweisen. Voraussichtlich wurde der Kohlenstoffanteil der Brennstoffe während der Versuche komplett vergast und bleibt am Ende der Versuche nur der Ascheanteil. Die Hauptzersetzung unter Vergasungsbedingungen passiert in zwei Phasen: (1) zwischen 280 °C und 350 °C, (2) zwischen 450 °C und 550 °C. Wie unter Pyrolysebedingungen, entspricht die erste Hauptzersetzung der Entfernung der flüchtigen Bestandteile, während die zweite Zersetzung auf die Vergasung des Kohlenstoffs zurückzuführen ist. Die erste Hauptzersetzung bei den torrefizierten Proben ist schwacher als bei den

anderen Proben, da die torrefizierten Proben niedrigere Gehalte an flüchtigen Bestandteilen aufweisen. Die Intensität ihrer zweiten Zersetzung ist ähnlich wie die Intensität der anderen Proben. Die zweite Zersetzung der torrefizierten Proben fand jedoch in einem größeren Bereich statt, was auf die stabileren Kohlenstoffbindungen zurückzuführen ist.

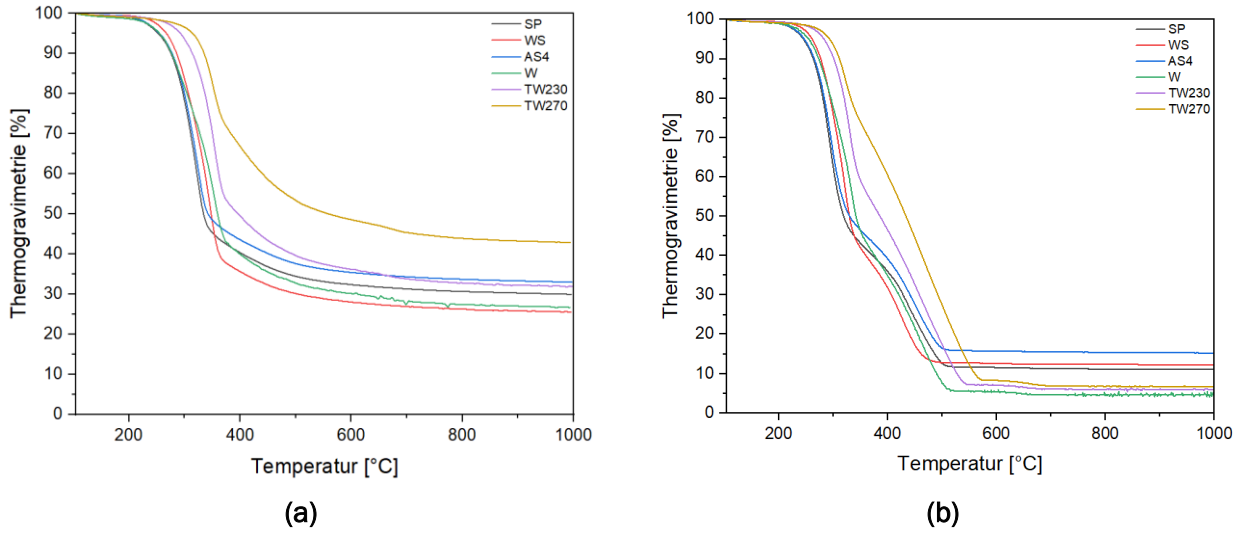


Abbildung 4 Thermogravimetrische Analyse (TGA) der thermischen Behandlung von verschiedener Brennstoffchargen unter **(a)** 0 Ma-% O_2 und **(b)** 10 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270).

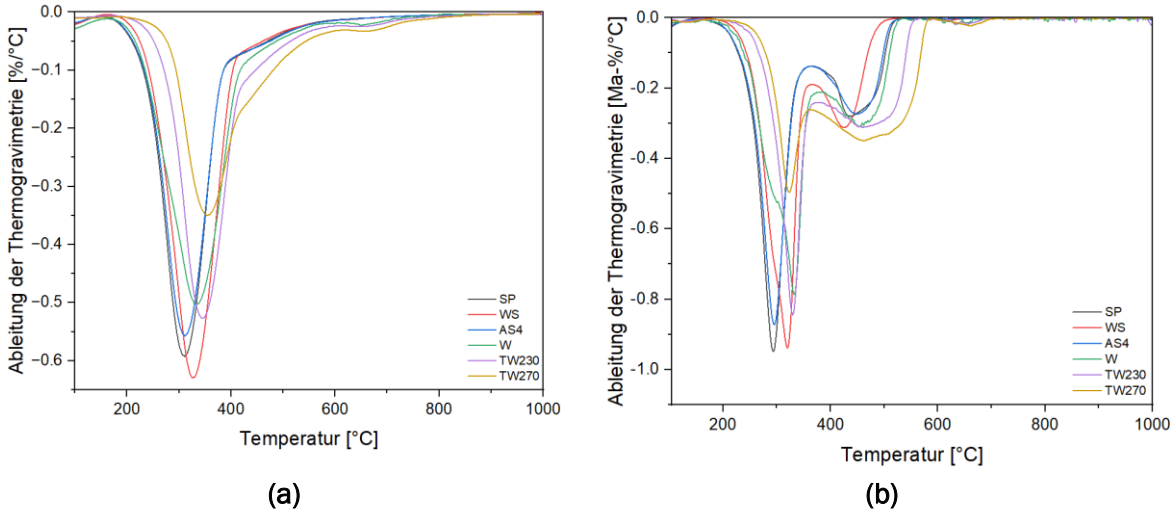


Abbildung 5 Ableitung TGA-Kurve (DTG) der thermischen Behandlung von verschiedener Brennstoffchargen unter **(a)** 0 Ma-% O_2 und **(b)** 10 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270)

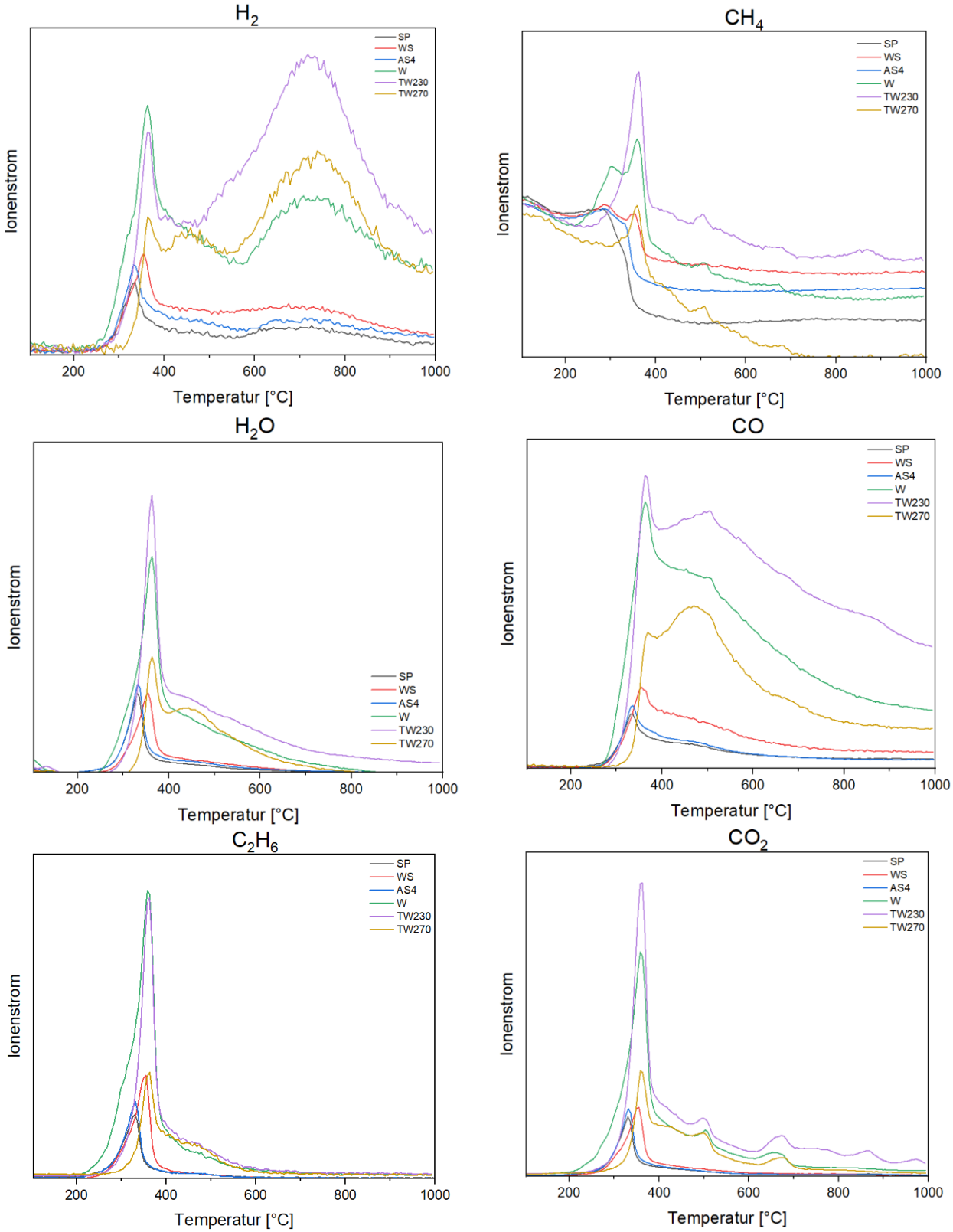


Abbildung 6 Vergleich des einzelnen Gasaustoß aus der thermischen Behandlung verschiedener Brennstoffchargen unter 0 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270).

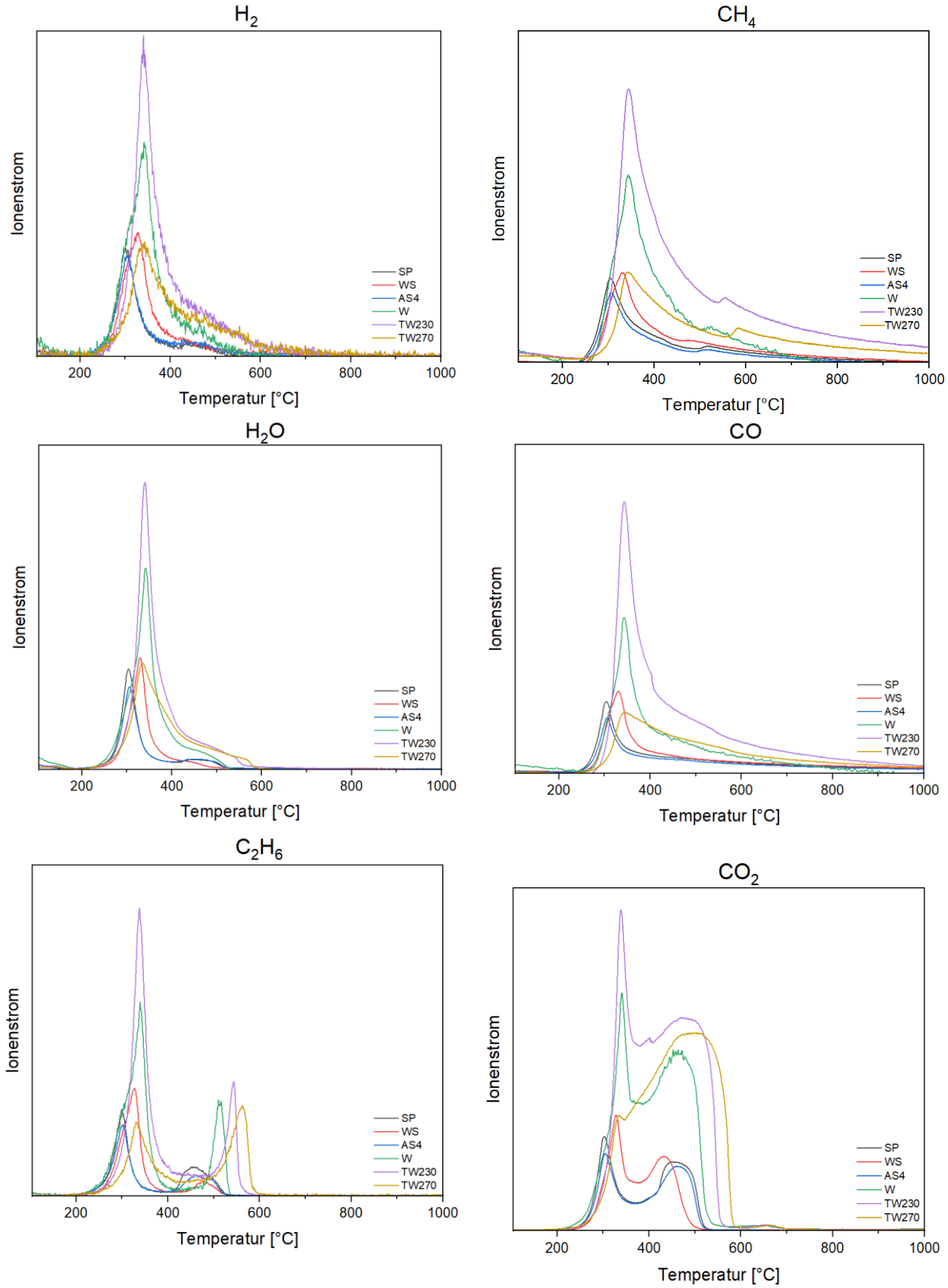


Abbildung 7 Vergleich des einzelnen Gasaustoß aus der thermischen Behandlung verschiedener Brennstoffchargen unter 10 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270).

Die Kurven der freigesetzten Gase während der thermischen Behandlung unter Pyrolyse- (0 %-O_2) und Vergasungsbedingung (10 %-O_2) sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt. Unter Pyrolysebedingung fand nur eine Hauptzersetzungsphase statt. Die Zersetzung der Lignozellulose führt zur Entwicklung des untersuchten Gas, wie H_2, CH_4, H_2O, CO, C_2H_6, und CO_2. Die nur bei Holzproben auftretende geringfügige Zersetzung bei höheren Temperaturen führt nicht nur zur Freisetzung von CO_2 sondern auch H_2. Dies könnte darauf hindeuten, dass in diesem Bereich auch andere Reaktionen als die Zersetzung von $CaCO_3$ ablaufen können. Die Gasentwicklung unter Vergasungsbedingungen zeigt eine ähnliche Tendenz wie unter Pyrolysebedingungen. Wie bereits beschrieben, erfolgt die Zersetzung von Kohlenstoff unter Vergasungsbedingungen bei erhöhten Temperaturen. Dabei entstehen haupsächtlich CO_2 und C_2H_6, wie in Abbildung 7 dargestellt.

Festbett-Laborvergaser-Versuche

Um nicht nur Einzelpartikel zu betrachten bzw. zu untersuchen, sondern auch Prozesse in einem Festbett mit Blick auf Bettporosiät, Gasströmung und den damit verbundenen Reaktionsbedingungen zu betrachten, wurden in diesem Projekt Versuche mit dem Festbett-Laborvergaser des DBFZ durchgeführt. Damit soll eine Praxisnähe erreicht werden, die den Wissens- und Ergebnisstransfer zu Marktanlagen und Industriepartnern erleichtert. Die Versuche am Festbett-Laborvergaser basieren auf der im OpToKNuS-Projekt[1] entwickelten Methodik. Dabei wird das komplexe Reaktionssystem der thermochemischen Vergasung bestehend aus Pyrolyse, Oxidation und Reduktion in Einzelreaktionen zerlegt. Dadurch kann das unterschiedliche Vergasungsverhalten verschiedener Einsatzstoffe leichter bestimmt werden.

Der Festbett-Laborvergaser hat ein zylindrisches Reaktionsvolumen von ca. 4 L, das für Tempraturen bis 950°C und Drücke bis 20 bar ausgelegt ist. Mit einer Vorheizung bis 800 °C können die Gase N_2, O_2, synthetische Luft, CO_2, CH_4, H_2, CO und Wasserdampf flexibel und frei einstellbar (entsprechend sicherheitstechnischen Kriterien) in den Reaktor bzw. das Reaktionsvolumen dosiert werden. Der Reaktor wird dabei von unten nach oben durchströmt und kann am Boden mit einer Zone und an der Wand mit drei Zonen beheizt werden. Dabei kann das in den Reaktor gefüllte und damit festbettbildende Material frei in der Höhe des Reaktor angeordnet werden. Das entstehende Produktgas wird mit 350 °C zu einem Wärmeübertrager mit Kondensatbehälter geführt und dort definiert auf < 20 °C abgekühlt. Das dabei anfallende Kondensat (Wasser und Teere) wird im Kondensatbehälter gesammelt. Zur Bestimmung der Gasmenge wird das abgekühlte Produktgas durch einen Balgengaszähler geführt. Anschließend wird ein Teilstrom des Gases über eine Analysestrecke mit Gasaufbereitung (Kondensatabscheider, Filter, Kühler), einen µGC zur Konzentrationsbestimmung von N_2, O_2, H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, und einen optischen Analysator zur Bestimmung der O_2-Konzentration geleitet. Vor und nach dem Versuch werden die Materialmenge, die in den Reaktor gefüllt wird, und die Koksmenge, die aus dem Reaktor entnommen wird, gewogen, um zusammen mit der berechneten Gasmasse die Massenbilanz für jeden Versuch aufstellen zu können. Grundlage dabei ist jeweils die Stickstoffmenge, die dem Reaktor zugeführt wird, da diese inert d. h. ohne Reaktionsbeteiligung durch den Reaktor geführt und im Produktgas als Konzentration bestimmt wird und damit bekannter Ausgangspunkt für die Produktgas-Gesamtvolumenstromberechnung ist. Versuchsergebnisse sind damit die kontinuierlich (Messwert ca. alle drei Minuten) gemessene Zusammensetzung des Produktgases, die Massenbilanz des Reaktors für eine definierte Versuchs-

[1] https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/projekte/03KB163

dauer und das kontinuierlich bestimmte Temperatur- und Druckprofil des Reaktor und der Gesamtanlage.

Mit den als Pellets bereitgestellten Brennstoffen Landschaftspflegematerial (roh, torrefiziert) und Stroh (roh, gewaschen, additiviert) wurde Charakterisierungsversuche zur Pyrolyse des Brennstoffes und zur CO_2-Vergasung des jeweils hergestellten Pyrolysekokses durchgeführt. Grundlage dabei waren homogene Brennstoffe, die mittes Probenteiler auf die Einsatzmenge von ca. 1 kg, was einem maximal gefüllten Reaktionsraum im Festbett-Laborvergaser entspricht, gebracht wurden bzw. repräsentativ und reproduzierbar hergestellte Pyrolysekoksmengen. Pyrolyseversuche mit abweichenden Versuchsbedingungen aufgrund von Problemen beim Versuchsablauf oder der Versuchstechnik (z. B. Verstopfung, durch Teerkondensation) wurden konsequent verworfen, um ausschließlich die Einflüsse der Brennstoffaufbereitung in den sich unterscheidenden Versuchsergebnissen sehen zu können.

Die Versuche zur Pyrolyse wurden wie folgt durchgeführt:

- Einfüllen des ausgewogenen Brennstoffs
- Aufheizen der Versuchsanlage mit Stickstoff auf Betriebstemepratur mit dem Reaktor im Bypass
- Umschalten des vorgeheizten Gases vom Bypass auf den Reaktoreingang nach Erreichen der Gastemperatur von 600 °C
- Einschalten der Reaktorheizung in der 1. Stufe auf 850 °C und in der 2.Stufe auf 900 °C nach ca. 1,5 h Versuchszeit
- Durchströmen des sich aufheizenden Reaktors mit Brennstoff mit dem vorgeheizten Gas
- Pyrolyse des Brennstoffs im Reaktor abwarten und per kontinuierlicher Gasanalytik überwachen
- Nach dem vollständigen Auspyrolysieren des Brennstoffs (Versuchsabbruchkriterium H_2-Konzentration unter 1 Vol.-%) Abbruch des Versuch
- Abkühlen der Anlage durch Abstellen der Heizungen und Durchströmung mit Stickstoff über Nacht
- Öffnen des kalten Reaktors und Entnahme der Pyrolysekoksmenge zum Auswiegen

Der Ablauf eines Pyrolyseversuchs ist exemplarisch in Abbildung 8 dargestellt.

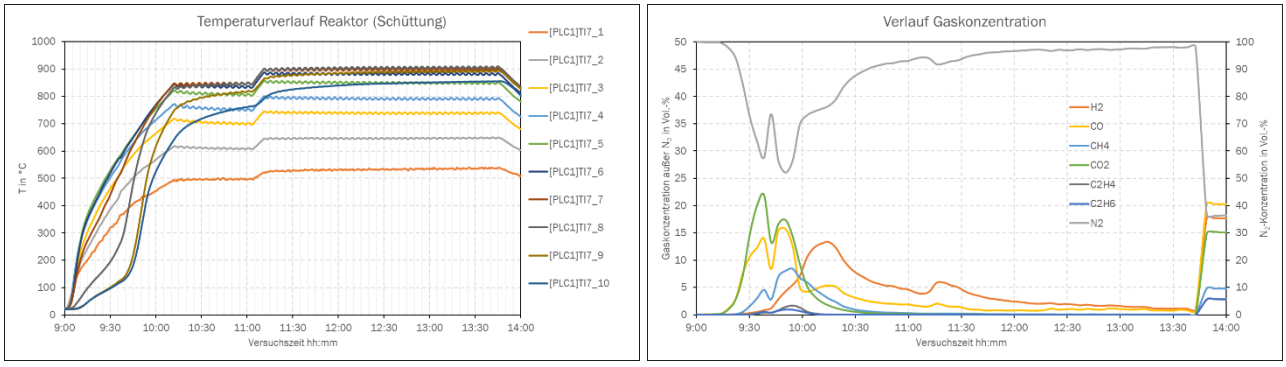


Abbildung 8: Ablauf Pyrolyseversuch Festbett-Laborvergaser 202400030 - 9 Uhr Start Pyrolyse bei 850 °C Reaktortemperatur nach vorheriger Anlagenaufheizung mit Reaktor im Bypass, 11 Uhr Erhöhung der Reaktortemperatur auf 900 °C, 13:40 Uhr Versuchsende (*links:* Temperaturverlauf im Reaktor; *rechts:* Produktgas-Konzentrationsverlauf)

Nach einem ähnlichen Ablauf wurden auch die CO_2-Vergasungs-Versuche durchgeführt:

- Einfüllen des ausgewogenen Pyrolysekokses
- Aufheizen der Versuchsanlage mit Stickstoff auf Betriebstemepratur mit dem Reaktor im Bypass
- Umschalten des vorgeheizten Gases vom Bypass auf den Reaktoreingang nach Erreichen der Gastemperatur von 600 °C
- Einschalten der Reaktorheizung auf 800 °C
- Durchströmen des sich aufheizenden Reaktors mit Pyrolysekoks mit dem vorgeheizten Stickstoff
- Bei konstanter Betttemperatur von 800 °C Umstellung des Reaktoreintrittsgases von Stickstoff auf eine Stickstoff CO_2-Mischung zum Start der CO_2-Vergasung
- CO_2-Vergasung im Reaktor 2 h laufen lassen und per kontinuierlicher Gasanalytik überwachen
- Nach 2 h Reaktionszeit (Versuchsabbruchkriterium 2 h Versuchsdauer mit CO_2) Abbruch des Versuchs
- Abkühlen der Anlage durch Abstellen der Heizungen und Durchströmung mit Stickstoff über Nacht
- Öffnen des kalten Reaktors und Entnahme der Vergaserkoksmenge zum Auswiegen

Der Ablauf eines Pyrolyseversuchs ist exemplarisch in Abbildung 9dargestellt

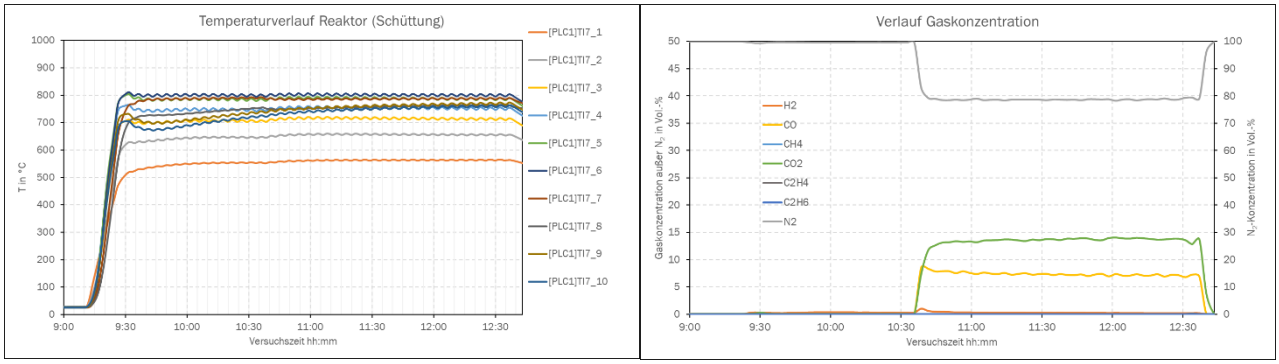


Abbildung 9: Ablauf CO_2-Vergasungsversuch Festbett-Laborvergaser 202400059 - 9:10 Uhr Start Aufheizung des Reaktors (Pyrolysekoks) mit Stcikstoff nach vorheriger Aufheizung der Anlage, 10:35 Uhr bei konstanter Reaktortemperatur Umstellung des Vergasungsmittels auf Stickstoff/Kohlendioxidmischung, 12:35 Uhr Versuchsende (links: Temperaturverlauf im Reaktor; rechts Produktgas-Konzentrationsverlauf)

Das durch die Aufheizung generierte gleichmäßige und konstante Temperaturprofil im Reaktor, führt nach der Umstellung des Vergasungsmittels von Stickstoff auf ein Stickstoff / Kohlendioxid-Gemisch direkt zu einer konstanten Reaktion am Pyrolysekoksbett im Reaktor.

Die Ergebnisse der Pyrolyse- und Vergasungsversuche am Festbett-Laborvergaser sind im folgenden dargestellt und diskutiert. Da für die Versuche am Festbett-Laborvergaser repräsentative Brennstoffproben aus einer Gesamtmenge für die Pyrolyse durch Teilung mittels Riffelteiler hergestellt wurden, sind die jeweiligen Ausgangsmenge bzw. -gewichte des Brennstoff für die Pyrolyseversuche unterschiedlich aber jeweils im Bereich von ca. 1 kg. Daraus folgend ergeben sich durch die Nutzung der vollständigen Menge des hergestellten Pyroylsekokses für die CO_2-Vergasung auch unterschiedliche Ausgangsgewichte des Pyrolysekokses zum Versuchsstart. Die entsprechende Versuchsübersicht ist zum besseren Verständnis in Tabelle 1 dargestellt

Tabelle 1 Versuchsübersicht Festbett-Laborvergaser

Brennstoff					Versuche	
Art	Aufbereitung	Stückigkeit Art	Stückigkeit Größe	Materialnr.	Pyrolyse m. Brennstoff	CO_2-Vergasung m. Pyrolysekoks
Landschaftspflegematerial	roh	Pellets	6 mm	BR-09801; BR-09802	2024-00007	-
					2024-00028	-
					2024-00030	2024-00059
					2024-00031	2024-00062
Landschaftspflegematerial	torrefiziert 230°C	Pellets	6 mm	BR-09800	2024-00032	2024-00053
					2024-00033	2024-00056
Stroh	roh	Pellets	6 mm	BR-08989	2023-00018	2023-00030
					2023-00038	-
					2023-00059	2023-00107
					2023-00064	-
					2023-00070	2023-00103
					2023-00071	2023-00105
					2024-00009	-
					2024-00011	-
					2024-00023	2024-00027
					2024-00047	2024-00060
Stroh	gewaschen	Pellets	6 mm	BR-09807	2024-00040	2024-00061
					2024-00041	2024-00064
Stroh	4% Kaolin	Pellets	6 mm	BR-09806	2024-00047	2024-00060
					2024-00048	2024-00065

Als primäres Versuchsergebnis konnten die jeweiligen Reaktormassenbilanzen aufgestellt werden. Diese sind für die Pyrolyse und CO_2-Vergasung in Tabelle 2 dargestellt

Tabelle 2 Massenbilanzen (Messwerte) Festbett-Laborvergaser-Versuche (Auszug) für die Projektbrennstoffe Landschaftspflegematerial roh (LPMr), Landschaftpflegematerial torrefiziert (LPMt), Stoh roh (Sr), Stroh gewaschen (Sg), Stroh additiviert (Sa)

Pyrolyse (Aufheizrate: 11 – 13 K/min, Reaktordruck: 1,1 – 1,5 bar)								
	Bilanzeingang		Bilanzausgang					
	Brennstoff (Bst)	Gas	Koks		Gas		Kondensat (Differenzrechnung!)	
	Menge [g]	Menge [g]	Menge [g]	Anteil v. Bst [%]	Menge [g]	Anteil v. Bst [%]	Menge [g]	Anteil v. Bst [%]
LPMr (202400031)	1015,50	2455,08 -	262,23	25,8	2736,00 280,92	- 27,7	472,35	46,5
LPMt (202400033)	991,78	2473,05	461,53	46,5	2742,32 269,27	- 27,2	260,98	26,3
Sr (202300070)	1101,70	3264,00 -	289,38	26,3	3557,70 293,70	- 26,7	518,62	47,1
Sg (202400041)	1007,19	2360,28	248,64	24,7	2641,64 281,36	- 27,9	477,19	47,4
Sa (202400048)	1008,17	1790,32	285,53	28,3	2138,81 348,49	- 34,6	374,25	37,1

CO_2-Vergasung (Aufheizrate: 29 – 32 K/min, Reaktordruck: < 1 bar)								
	Bilanzeingang		Bilanzausgang				Differenzberechnung)	
	Pyrolyse-koks (Pk)	Gas	Koks		Gas			
	Menge [g]	Menge [g]	Menge [g]	Anteil v. Pk [%]	Menge [g]	Anteil v. Pk [%]	abs. [g]	rel. [%]
LPMr (202400059)	273,83	2816,97 75,58	222,54	81,3	2898,95 175,56	-	-30,69	1,0 8,8
LPMt (202400053)	431,04	2919,69 174,16	346,20	80,3	2999,39 253,86	-	5,14	0,2 0,9
Sr (202300105)	316,12	2737,12 105,16	242,12	76,6	2854,73 222,77	-	-43,60	1,4 10,4
Sg (202400061)	240,75	2863,82 211,81	211,81	87,9	2968,96 122,23	-	-76,19	2,5 29,5
Sa (202400060)	289,00	3044,85 30,02	257,04	88,9	3108,68 93,85	-	31,88 31,88	0,9 9,9

Um aufgrund der verschiedenen Ausgangsgewicht für die jeweiligen Versuche (Pyrolyse und CO_2-Vergasung) einen Einfluß feststellen zu können wurden die im Versuch erzielten Massen für Koks (fester Rückstand im Reaktor) und Produktgase sowie Kondensate auf die Masse des jeweils zu Versuchsbeginn eingesetzten Materials bezogen (siehe in Tabelle 2 die Spalten „Anteil von Bst“ und „Anteil von Pk“). Anhand dieser Anteile lassen sich die Brennstoffe und Pyrolysekokse gut vergleichen und die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche gut abschätzen. Insbesondere das torrefizierte Landschaftspflegematerial zeigt ein anderes, aber erwartbares, Verhalten im Vergleich zum unbehandelten Landschaftspflegematerial. Durch die Vorbehandlung mittels Torrefizierung sind aus dem Material schon flüchtige Bestandteile ausgetrieben, die im Vergleich zur Pyrolyse mit unbehandeltem Landschaftspflegematerial dann „fehlen“. Somit verschieben sich automatisch die Produktanteile des torrefizieren Landschaftspflegematerials. Es beliebn hier nach der Pyrolyse ca. 46% des ursprünglichen Brennstoffs als Koks zurück, was im Vergleich zum nicht torrefizierten Material mit ca. 26 % erheblich mehr ist. Im Gegensatz dazu ist der Anteil an Kondensaten (Wasser und Teere) bei torrefizierten Landschaftspflegematerial erheblich niedriger mit ca. 26 % des ursprünglichen Brennstoff. Auch anhand der Betriebserfahrung bei den Versuche mit torefiziertenm Material kann dies durch verringerte Teerbildung (weiniger Versuchsnachbereitung durch weniger Reinigungsaufwand) bestätigt werden. Im Vergleich verhelten sich die Brennstoff Landschaftspflegematerial roh, Stroh roh und Stroh gewaschen in der Pyrolyse recht ähnlich mit Blick auf die anteilige Produktzusammensetzung mit ca. 26 % Pyrolysekoks, ca. 27 % Pyrolysegas und ca. 47 % Kondensate. Lediglich das additivierte Stroh hat eine andere Produktzusammensetzung mit ca. 28% Pyrolysekoks, ca. 35 % Pyrolysegas und ca. 37 % Kondensate gezeigt. Daraus läßt sich aufgrund des wesentlich geringen Kondensatanteils in den Pyrolyseprodukten ebenso eine verringerte Teerbildung vermuten, da für alle unterschiedlich vorbehandelten Strohbrennstoffe, das gleich Ausgangsmaterial / -stroh verwendet wurde und der Wasseranteil dabei nicht so signifikant unterschiedlich sein kann.

Bei der CO_2-Vergasung ist der Verlgeich der Versuchsergebnisse nicht ganz so leicht und eindeutig, da die Bilanzen nicht immer geschlossen werden konnten und somit höhere Unsicherheit mit den Versuchsergebnissen einhergehen. Grundsätzlich läßt sich sagen, dass sich trotz der unterschiedlichen Materialarten und deren Vorberhandlungen das Vergasungsverhalten mit CO_2 als Vergasungsmittel recht

ähnlich ist mit Blick auf die Zusammenstzung der Produkte in Tabelle 2. Diese hohe Unsicherheit der Ergebnisse ist durch die Abhängigkeit von einer sehr genauen Analytik des Produktgases abhängig. Diese konnte im Projektverlauf nicht immer im notwendigen Maße sichergestellt werden. Durch den hohen Aufwand von ca. 2 Tagen zur Versuchsdurchführung mit Vor- und Nachbereitung waren Versuchswiederholungen nur im eingeschränkten Maße möglich.

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich mit Blick auf das Projektziel „Ermittlung von Kennzahlen zur Beschreibung des Vergasungsprozeses“ aber Erkenntnisse ableiten, die auch zum Teil auf die schon vorhandenen Erfahrungen des Projektes OpToKNuS beruhen. Im Vergasungsreaktor ist die Pyrolysezone eine der wichtigsten, da dort ein möglichst vollständiges auspyrolysieren der Brennstoffs erreicht werden soll. Passiert dies nicht kommt es zu Problemen in den nachfolgenden Reaktionszonen. Somit ist die Verweilzeit des Brennstoff zur vollständigen „Auspyrolyse“ und die damit verbundene Pyrolysegasmenge entscheidend. Diese lassen sich anhand der mit dem Festbett-Laborvergaser durchgeführten Versuchen durchaus beschreiben. So ist die Länge des Pyrolyseversuchs bis zum Abbruchkriterium eine aussagefähige Kennzahl für die notwendige Pyrolysedauer. Die festgestellte Menge an Pyrolysegas im Verhältnis zur Brennstoffmenge stellt ebenso eine aussagefähige Kennzahl für die jeweiligen Brennstoffe dar. Im Bereich der CO_2-Vergasung ist der Grad an Kohlenstoffumsatz eine mögliche Kennzahl, diese lässt sich anhand der Versuchsergebnisse berechnen, jedoch macht diese voraussichtlich nur in Kombination mit Kohlenstoffumsatzraten anderer Vergasungsmittel richtig Sinn bzw. der Kohlenstoffumsatz durch das auch später in der Praxis eingesetzte Vergasungsmittel z. B. Luft oder Wasserdampf. Durch die gewählte Analogie zum ProjektOpToKNuS ist bei den durchgeführten KeVergAv-Versuchen lediglich CO_2 zum Einsatz gekommen.

Tabelle 3 KerVergAv-Kennzahlen Festbett-Laborvergaser für die Projektbrennstoffe am Beispiel von Einzelversuchen

	Pyrolysedauer [h/kg]	Pyrolysekoksumsatz [%/h]		Vergaserkoksumsatz [%/h]
LPMr (202400031)	4,00	18,24	LPMr (202400059)	9,35
LPMt (202400033)	4,77	11,30	LPMt (202400053)	9,69
Sr (202300070)	5,73	11,67	Sr (202300105)	12,00
Sg (202400041)	4,44	16,86	Sg (202400061)	6,05
Sa (202400048)	3,37	21,09	Sa (202400060)	5,20

Ob diese Kennzahlen praktikabel und wirlich nutzbar sind kann erst bei einem größeren und repräsentativen sowie reproduzierbaren Datensatz mit mehreren Brennstoffen und einem entsprechenden Praxisbezug gezeigt werden. Dies war in diesem Projekt so nicht geplant und auch durch die Unsicherheiten bei der Gasanalytik nicht möglich. Die gewonnenen reproduzierbaren und repäsentativen Versuchsergebnisse des Projektes ergeben nicht das erhoffte vollständige Bild, das nur durch vollständige Datensätze geschlossen werden kann. Einen wichtigen Anknüpfungspunkt biete hier das Projekt BioH2 (FKZ: 03EI5472D), bei dem die Anlage Festbett-Laborvergaser des DBFZ und die hier im Projekt verwendete Methode zum Einsatz kommt.

2.1.3 Arbeitspaket 3: Untersuchungen zum Ascheverhalten

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde der Einfluss verschiedener Brennstoffarten sowie der Vorbehandlungsprozesse (darunter Waschen, Additivieren und Torrefizierung) auf bedeutende Aschetransformationsprozesse sowohl theoretisch mittels thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen als auch experimentell durch Laboruntersuchungen analysiert. Die Resultate dieser Simulationen sowie Experimente dienen als Grundlage zur Ableitung relevanter Kennzahlen bezüglich des Ascheverhaltens von vorbehandelten holzartigen und strohartigen Reststoffen während des Vergasungsprozesses. Die Berechnungen basieren auf der Methode zur Minimierung der freien Gibbs-Energie, welche es ermöglicht den Einfluss unterschiedlicher Vorbehandlungsmethoden auf das Verschlackungsverhalten bei der Festbettvergasung zu untersuchen; hierfür wurde das Softwarepaket FactsageVersion 8.2 eingesetzt. Als Simulationseingaben wurden die Gehalte der organischen und der wichtigsten aschebildenden Elemente (C, H, O, N, Al, Ca, K, Mg, P, S, Si, Cl) des Brennstoffs verwendet. Neben den Elementen der Brennstoffe wurde ein Gasgemisch (55 % CO und 45 % CO_2) als zusätzlicher Input hinzugefügt. Diese Atmosphäre wurde festgelegt, um die Reduktionsbedingungen bei der Festbettvergasung zu simulieren. Der Druck des Verbrennungsprozesses wurde auf 1 atm eingestellt. Die Temperatur wurde zwischen 700 °C und 1000 °C eingestellt. Zur Simulation der thermodynamischen Berechnung wurde das Modul „Equilib“ der Software FactSage 8.2 verwendet. Die Datenbanken FactPS, FToxid und FTsalt lieferten die thermodynamischen Daten der Reinstoffe, Oxide bzw. Salze. Die Daten der Lösungsphasen wurden aus der FToxid-SlagA-Datenbank bezogen. Im Falle ähnlicher chemischer Spezies in diesen Datenbanken wurde die Priorität in der Reihenfolge von FToxid, FTsalts und FactPS vergeben und Duplikate wurden unterdrückt.

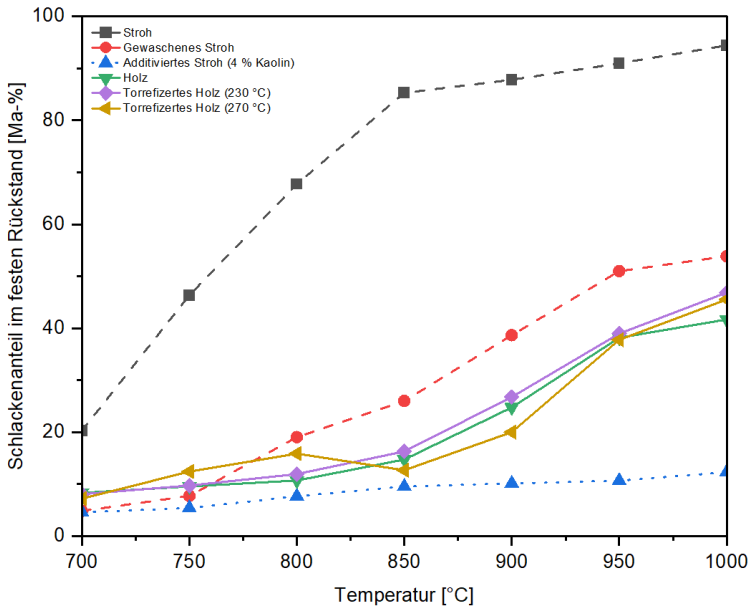


Abbildung 10 Schlackenanteil im festen Rückstand aus dem Vergasungsprozess simuliert mittels Factsage

Wie in Abbildung 10 dargestellt, spielt die Veraschungstemperatur spielt eine große Rolle beim Verschlackungsverhalten. Höhere Temperaturen produziert Asche mit einem größeren Schlackenanteil. Im Vergleich zu anderen Brennstoffchargen zeigt Stroh die schlechteste Verschlackungsneigung, da ihr Schlackenanteil bei 1000 °C 90 Ma-% erreicht. Eine signifikante Reduzierung der Versinterung bei Strohaschen ist möglich durch Vorbehandlungen. Durch Waschen reduziert sich der Schlackenanteil bei

1000 °C auf 40 Ma.%, da sich der Anteil von K durch Waschen deutlich verringern lässt. Die Schlackenbildung kann durch Das Additivieren von Kaolin noch deutlicher gehemmt werden. Bei den thermochemischen Prozessen reagiert Kaolin mit kritischen aschebildenden Elementen wie K und Na zu hochschmelzenden kristallinen Verbindungen, wie z. B. Kalsilit ($KAlSiO_4$) und Leuzit ($KAlSi_2O_6$), und verhindert so die Schlackenbildung. Bei den holzartigen Brennstoffen hat die Torrefizierung keinen Einfluss auf die Verschlackungsneigung. Bei 1000 °C liegt der Schlackenanteil von der holzartigen Proben bei etwa 40 Ma.-%, der mit jenem von den gewaschenen Strohpellets vergleichbar ist.

Die Veraschungsversuche im Labormaßstab wurden ursprünglich eingeplant, um die Ergebnisse der Simulation zu validieren. Die Versuche erfolgten in einem inertisierenden Muffelofen (Abbildung 11) . Im Muffelofen wurden die Pelletsproben von der Umgebungstemperatur mit der Heizrate von 10 K/min auf den verschiedenen finalen Temperaturen aufgeheizt. Die finalen Temperaturen von 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C wurden ausgewählt, um den Einfluss der Prozesstemperatur auf die Aschetransformationsprozesse zu erkennen. Zwei verschiedene Atmosphäre Bedingungen, 0 %-O_2 bzw. 10 %-O_2, wurden eingestellt, um respektiv das Pyrolyse- und Vergasungsprozess zu modellieren. Argon (Ar) wurde als Inertgas benutzt. Nach den Veraschungsversuchen wurden die Koks- (0 %-O_2) und Ascheproben (10 %-O_2) gesiebt, um ihren Schlackenanteil zu bestimmen. Der Teil der Asche, welcher die 3,15 mm-Maschen nicht durchdringen kann, wird als Schlacke klassifiziert. Zudem wurden die Koks- und Aschefraktionen durch spezifische Analysen charakterisiert, deren Ergebnisse im Arbeitspaket 4 diskutiert werden.

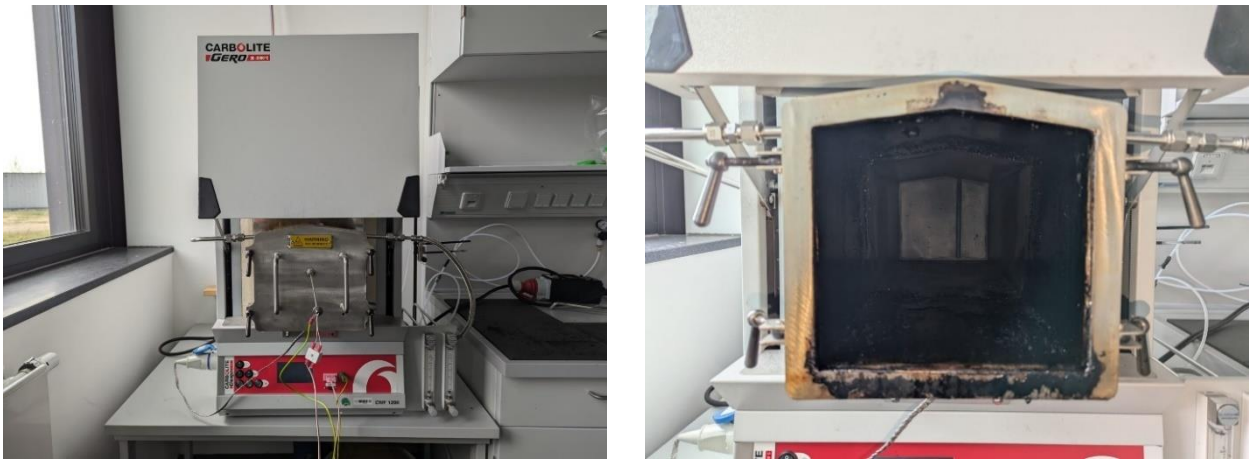


Abbildung 11 Der inertisierbare Muffelofen für die Versuche im Labormaßstab. (a) Frontanschit, (b) innerer Raum der Retorte

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Siebanalyse von den verschiedenen Koks- und Ascheproben. Die Sauerstoffkonzentration hat einen bedeutenden Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung. Bei den Versuchen mit 0 %-O_2 wurde der unverbrannte organische Kohlenstoff (Koks) erhalten, der ein hartes Material ist und durch Sieben nicht zerkleinert wurde. Somit kann festgestellt werden, dass die Herkunft der Proben sowie die Prozesstemperatur für die vorliegende Untersuchung irrelevant sind. Dies begründet sich daraus, dass nahezu alle Proben die 3,15 mm-Maschen nicht passieren können. Im Unterschied dazu ist beim Rückstand aus den Versuchen mit 0 %-O_2 der Einfluss der Herkunft und Temperatur auf der Partikelgröße der Rückstände zu erkennen. Bei den Rückständen von Strohproben dominiert der Feinanteil mit einer Größe kleiner als 0,5 mm. Dieser Feinanteil ist die Asche, die durch die Oxidation von Kohlenstoff hergestellt wird. Deswegen steigt dieser Feinanteil bei höheren Temperaturen, weil der Oxidationsprozess bei hohen Temperaturen vollständiger ist.

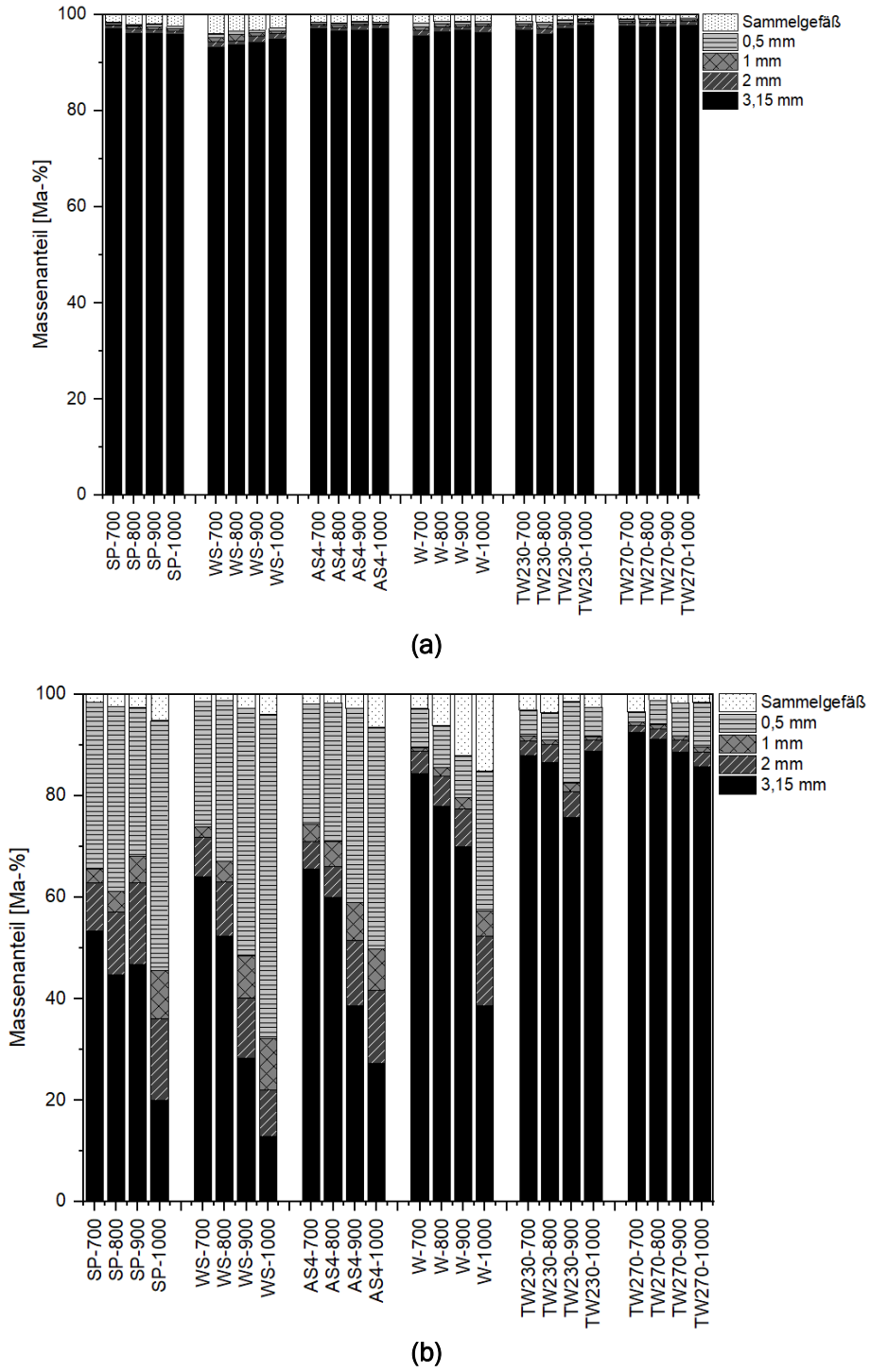


Abbildung 12 Ergebnisse der Siebanalyse der festen Rückstände aus den Muffelofenversuchen unter **(a)** 0 %-O_2 und **(b)** 10 %-O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 1 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS1), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270). Die Nummer nach dem Strich im Probenahme bezeichnet die Prozesstemperatur

Die Durchführung einer Siebanalyse hat ergeben, dass die Partikel, welche auf dem 3,15 mm-Maschen zurückgehalten werden, Koks darstellen und nicht Schlacke (Abbildung 13). Die Ergebnisse aus den Muffelofenversuchen zeigen zudem, dass der Koks seine Pelletform beibehält und folglich durch die Siebanalyse nicht klassifiziert werden kann. Aus diesem Grund erweist sich die Siebmethode als

ungeeignet zur Bestimmung des Verschlackungsverhaltens während des Pyrolyse- sowie Vergasungsprozesses. Für die Bewertung des Verschlackungsverhaltens wurden daher die Resultate der FactSage-Simulation herangezogen.

(a) (b)

Abbildung 13 Proben auf dem 3,15 mm-Maschen nach der Siebung vom festen Rücksand aus Veraschung von Stroh bei 1000 °C unter Atmosphäre (a) 0 %-O2, (b) 10 %-O2

Eine Korrelation zwischen dem simulierten Schlackenanteil und den wichtigen Aschenelementen, sowie der Prozesstemperatur wurde durch die multivariate Analysenmethode, nämlich die Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis (PCA))) hergestellt. Wie in Tabelle 4 sichtbar, besteht ein Problem mit der Multikollinearität. Multikollinearität tritt auf, wenn unabhängige Variablen in einem Regressionsmodell korreliert sind. Daher ist die einfache multiple lineare Regression nicht geeignet.

Tabelle 4 Korrelationsfaktor zwischen den Variablen bei der multivariaten Analyse

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Si	Cl	Temperatur
Al	1.00	-0.38	-0.07	0.53	-0.22	0.38	-0.21	0.51	0.63	0.50	0.00
Ca	-0.38	1.00	0.87	-0.67	0.92	-0.66	0.94	-0.89	-0.90	-0.77	0.00
Fe	-0.07	0.87	1.00	-0.48	0.83	-0.49	0.90	-0.77	-0.74	-0.58	0.00
K	0.53	-0.67	-0.48	1.00	-0.37	0.91	-0.41	0.89	0.75	0.97	0.00
Mg	-0.22	0.92	0.83	-0.37	1.00	-0.34	0.95	-0.71	-.71	-0.54	0.00
Na	0.38	-0.66	-0.49	0.91	-0.34	1.00	-0.46	0.75	0.76	0.87	0.00
P	-0.21	0.94	0.90	-0.41	0.95	-0.46	1.00	-0.71	-0.81	-0.53	0.00
S	0.51	-0.89	-0.77	0.89	-0.71	0.75	-0.71	1.00	0.85	0.95	0.00
Si	0.63	-0.90	-0.74	0.75	-0.71	0.76	-0.81	0.85	1.00	0.76	0.00
Cl	0.50	-0.77	-0.58	0.97	-0.54	0.87	-0.53	0.95	0.76	1.00	0.00
Temperatur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Das Hauptziel der PCA besteht darin, die Größe großer Datensätze zu reduzieren, um verborgene Beziehungen zwischen Objekten und gemessenen Variablen aufzudecken. Normalerweise werden erfasste Daten in einer Matri X zusammengestellt, wobei die Zeilen n Objekte (hier Brennstoffe und Prozess-

bedingungen) entsprechen, die durch p Variablen (hier Brennstoffascheanalysen und Prozesstemperaturen, sowie berechnete Brennstoffindizes) in den Spalten beschrieben werden. Die PCA wandelt den Satz von Objekten durch eine orthogonale Transformation in einen Satz von Werten linear unkorrelierter Variablen um, die als Hauptkomponenten (engl. Principal components (PCs)) bezeichnet werden. Auf diese Weise wird die größtmögliche Varianz beschrieben, die der größtmöglichen Variabilität im Datensatz Rechnung trägt. Die PCA wurde in Matlab durchgeführt. Da die PCA empfindlich auf die relative Skalierung der ursprünglichen Variablen reagiert, wurden alle Datensätze vor der Analyse normalisiert. Für die PCA-Analyse wurden Datensätze von Variablen (Tabelle 5) als Eingabe verwendet. Der Datensatz von Variablen, der für die PCA verwendet wurde, umfasste die Brennstoffascheanalyse (Variablen 1 - 10), die Prozesstemperatur (Variable 11), und den Verschlackungsindex (Variabel 12). Der Verschlackungsindex ist das Produkt aus Aschegehalt und simuliertem Schlackenanteil.

Tabelle 5 Liste der eingesetzten Variabeln in der PCA

Id.	Variabeln	Einheit
1	Al aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
2	Ca aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
3	Fe aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
4	K aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
5	Mg aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
6	Na aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
7	P aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
8	S aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
9	Si aus Brennstoffascheanalyse	g/kg-TS
10	Cl aus Brennstoffanalyse	g/kg-TS
11	Temperatur	°C
12	Verschlackungsindex	Ma.%-TS

Beim PCA wurden 6 PCs beibehalten. Allerdings erklärten die ersten 3 PCs bereits mehr als 80 % der gesamten Datenvarianz (Abbildung 14). Daher wurden für die weitere Analyse nur die ersten 3 PCs berücksichtigt. Abbildung 15 zeigt die Beiträge jeder Variablen zu jedem PC. Die rote gestrichelte Linie zeigt den Cut-off-wert (7,5 %), der sich aus dem Durchschnitt der Beiträge der einzelnen Variablen ergibt. Einige Hauptascheelemente, wie Ca, Fe, Mg, Mn, Na, P, Si, und Cl geben signifikante Beiträge zum PC 1. PC 2 zeigt die Variablen, die enge Korrelation mit dem Verschlackungsindex haben. Diese Variablen sind Al, K, Na, S, Cl und die Prozesstemperatur. Interessanterweise bleibt der Beitrag von Si, das für seine Rolle im Schlackenbildungsprozess bekannt ist, unter dem Cut-off-Wert.

Die Korrelation zwischen dem Verschlackungsindex und den anderen Variablen kann man besser durch die Loading- und Score-Plots, wie in Abbildung 16 gezeigt, erkennen. Der Loading-Plot veranschaulicht den Beitrag der Variablen zu jedem PC, während der Score-Plot Gruppen von Objekten zeigt. Beim Loading-Plot tragen die Variablen, die den Aschen des entsprechenden PC am nächsten liegen und den längsten Vektor besitzen, am meisten zu diesem PC bei. Durch den Score-Plot lassen sich zwei Hauptgruppen unterscheiden: holzartige- und strohartige Proben. Holzproben, die reich an Elementen wie Ca, Fe, Mg, Mn, Na und P sind, haben einen negativen Wert in PC 1. Im Unterschied dazu liegen die strohartigen Proben wegen ihres hohen Anteils an Si, K und Cl auf der rechten Seite des PC 1. Die Verteilung der Objekte entlang der y-Achse des Score-Plot wird hauptsächlich durch die Prozesstemperatur und den Verschlackungsindex beeinflusst. Die Kennzahlen zur Schlackenbildung können von

der y-Achse des Loading-Plots abgeleitet werden. Der Verschlackungsindex hat einen positiven Wert im PC 2. Daher tragen die Variablen, die im PC 2 einen positiven Wert haben, zur Schlackenbildung bei, diese Variablen sind K, Na, Cl, S und die Temperatur. Im Unterschied dazu verhindert Al den Schlackebildungsprozess, da Al einen negativen Wert im PC 2 zeigt.

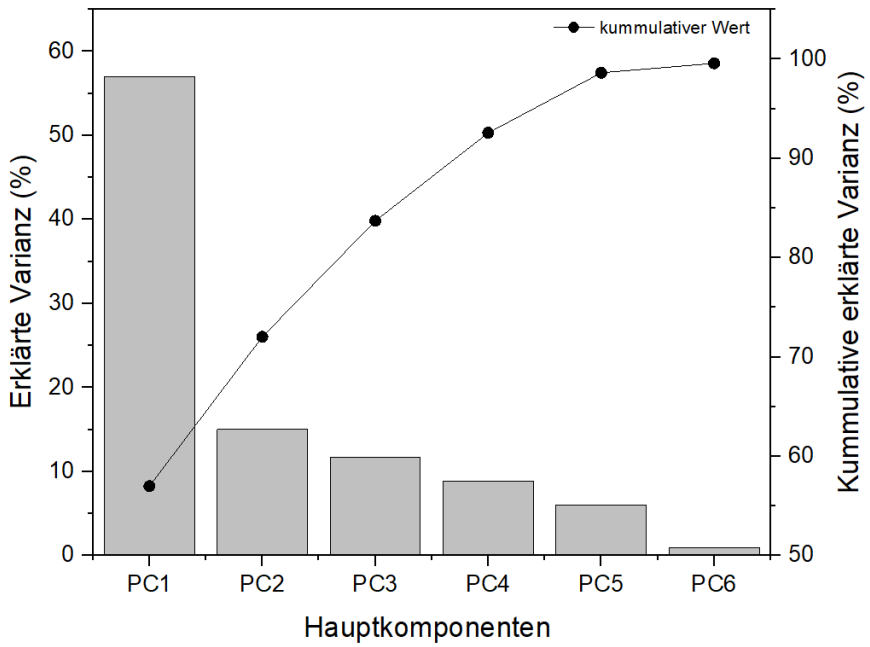


Abbildung 14 Erklärte Varianz per Haupkomponent und der entsprechende kummulative Wert

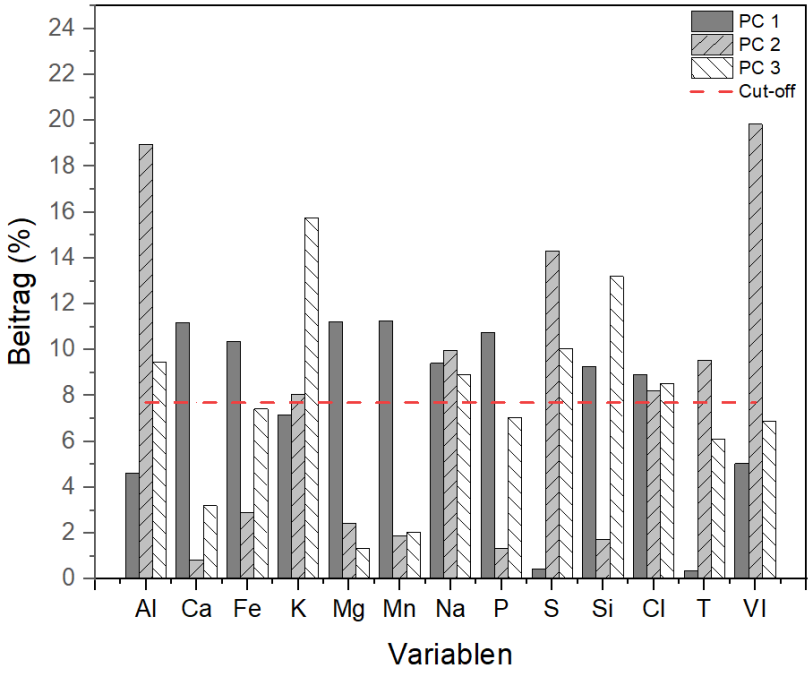


Abbildung 15 Beiträge der Variablen zu jeder Hauptkomponente innerhalb des PC 1

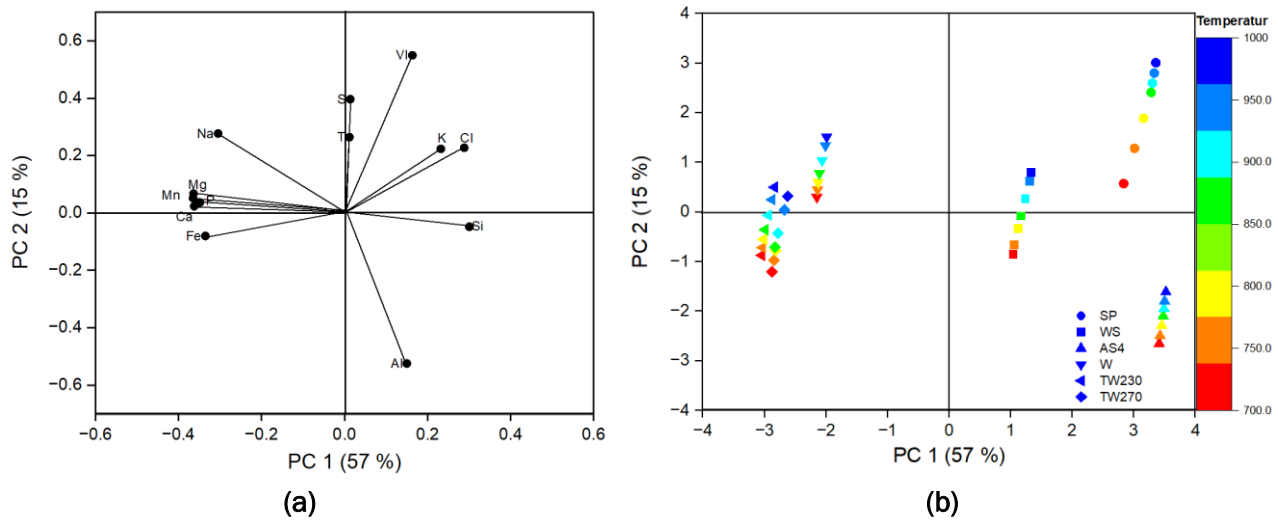


Abbildung 16 Interpration der PCA-Ergebnisse durch (a) Loading-Plot und (b) Score-Plot. Abkürzung: Prozesstemperatur (T), Verschlackungsindex (VI), Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 1 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS1), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270)

2.1.4 Arbeitspaket 4: Analytik

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Charakterisierung der hergestellten Pelletschargen, sowie der gewonnenen Koks- und Aschefraktion aus den Veraschungsversuche durchgeführt, um die Auswertung im AP 2 und AP 3 zu unterstützen. Am Anfang des Projekts wurde ein Analysenplan abgestimmt. Beim Analysenplan wurden die erforderlichen Analysen und die entsprechenden Methoden beschrieben. Bei der Brennstoffanalyse wurden die chemischen und energieträgerspezifischen Eigenschaften der im AP 1 hergestellten Brennstoffpellets bestimmt. Die chemische Fraktionierung wurde zudem durchgeführt, um die aschebildende Elemente hinsichtlich der Löslichkeit zu klassifizieren. Die Haupt- und Nebenelemente der Asche- und Koksfraktion wurde durch Vollaufschluss (ICP-OES) bestimmt. Zudem wurde der Kohlenstoffanteil nach totaler organischen Kohlenstoffe (TOC), totaler anorganischen Kohlenstoff (TIC), und restlicher organischen Kohlenstoffe (ROC) klassifiziert.

Brennstoffanalyse

Tabelle 6 präsentiert die Ergebnisse der Brennstoffanalyse verschiedener Pelletschargen. Im Vergleich zu den holzartigen Pellets zeigen die strohartigen Proben einen relativ höheren Aschegehalt und einen geringen fixen Kohlenstoffgehalt. Dies könnte dazu führen, dass Stroh einen geringeren Heizwert als Holzbrennstoffe hat. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Vorbehandlungsprozesse, wie Waschen, Additivieren und Torrefizerung, die Eigenschaften der Brennstoffe verändern. Durch Waschen reduziert sich der Aschegehalt von Stroh, während er sich durch das Additivieren mit Kaolin erhöht. Waschen kann auch den Chlorgehalt von Stroh deutlich senken. Die unbehandelten Strohproben haben einen Chlorgehalt von 0,2 Ma.-%, während sich der Chlorgehalt von gewaschenem Stroh auf 0,03 Ma.-% reduziert. Im Fall von Holzproben werden die Flüchtige während des Torrefizierungsprozesses anteilig ausgetrieben, was zu einer Erhöhung des Anteils an festem Kohlenstoff führt. Bei der Torrefizierung von Holzpellets steigt der Gehalt an festem Kohlenstoff von 19 Ma.-% auf Werte von 25,1 Ma.-% bei einer Temperatur von 230 °C und erreicht sogar bis zu 35,6 Ma.-% bei einer Temperatur von 270 °C.

Neben den energieträgerspezifischen Eigenschaften zeigt Tabelle 6 die Zusammensetzung von Brennstoffasche. Der Gehalt an aschebildenden Elementen wurde in die Oxidform umgerechnet. Die vorherrschenden Ascheelemente in der Probe sind K und Si, die zusammen über 82 % der Gesamtmasse ausmachen. Im Unterschied dazu ist Ca das dominierende Element in den Holzproben. Der Waschprozess führt zu einer Verringerung mehrerer Elemente in WS, einschließlich K und P. Die Zugabe von Kaolin erhöht den Anteil von Al, Si, und Fe in AS4, da Kaolin hauptsächlich aus diesen Elementen besteht. Im Unterschied zu den anderen untersuchten Vorbehandlungsmethoden hat der Torrefizierungsprozess keinen signifikanten Einfluss auf die Aschezusammensetzung der Holzproben.

Tabelle 6: Ergebnisse der Brennstoff- und Brennstoffascheanalyse. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 1 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS1), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefiziertes Holz bei 270 °C (TW 270)

Brennstoffanalyse	Einheit	SP	WS	AS4	W	TW230	TW270
Wassergehalt	Ma-%, TS	6,51	10,50	9,27	9,9	0,85	1,21
Aschegehalt	Ma-%, TS	6,50	5,10	9,40	3,7	4,40	5,60
Flüchtige	Ma-%, TS	74,30	78,90	72,30	78,1	71,50	59,20
Fixer Kohlenstoff	Ma-%, TS	19,70	16,30	18,70	19,0	25,10	35,60
Heizwert	MJ/kg TS	17,38	17,72	16,78	18,73	20,41	23,26
C	Ma-%, TS	46,60	46,80	44,20	49,9	54,60	62,10
H	Ma-%, TS	5,36	5,34	5,13	5,81	5,81	5,42
N	Ma-%, TS	0,61	0,48	0,62	0,65	0,71	0,84
S	Ma-%, TS	0,90	0,06	0,09	0,06	0,04	0,04
Cl	Ma-%, TS	0,21	0,03	0,20	0,05	0,02	0,01
O	Ma-%, TS	46,32	47,29	49,76	43,53	38,82	31,59
Brennstoffascheanalyse	Einheit	S	WS	AS4	W	TW230	TW270
Al_2O_3	Ma-%, TS	0,15	0,32	12,47	2,22	2,46	2,11
CaO	Ma-%, TS	8,40	12,12	5,52	44,50	45,06	49,29
Fe_2O_3	Ma-%, TS	0,18	0,19	0,36	1,41	2,38	1,68
K_2O	Ma-%, TS	28,64	9,31	19,45	15,04	15,55	15,98
MgO	Ma-%, TS	2,04	2,23	1,41	4,60	4,67	5,01
MnO	Ma-%, TS	0,07	0,07	0,05	0,17	0,18	0,19
Na_2O	Ma-%, TS	0,67	0,67	0,46	0,86	0,89	0,81
P_2O_5	Ma-%, TS	1,46	0,92	1,03	4,78	4,86	5,16
SO_3	Ma-%, TS	3,79	3,18	2,65	5,28	3,01	2,50
SiO_2	Ma-%, TS	54,48	70,83	56,22	20,59	20,35	16,68

Die chemische Fraktionierung ist eine Methode zur Beurteilung wie aschebildende Elemente im Brennstoff gebunden sind, die auf der selektiven Auslaugung durch Wasser (H_2O), Ammoniumacetat (NH_4Ac), und Salzsäure (HCl) beruht [13]. Typische aschebildende Elemente, die durch Wasser ausgelaugt werden, sind Alkalisulfate, Karbonate und Chloride. Organisch gebundene Elemente, wie Ca, K, Mg, Na werden durch Ammonimumacetat ausgelaugt. Salzsäure laugt normalerweise Karbonate und Sulfate von Erdalkalimetallen und anderen Metallen aus, während Silizium und andere Mineralien unlöslich bleiben.

Abbildung 17 zeigt die wasserlöslichen, mit Ammoniumacetat und Salzsäure auslaugbaren aschebildenden Elemente, sowie die nicht löslichen Anteile. In S (Abbildung 17(a)) ist K im Allgemeinen wasserlöslich, und nur ca. 10 Ma.% verbleibt als unlöslicher Anteil im festen Rückstand. Na, P, und S sind auch sehr stark wasserlöslich. NH_4Ac kann auch Mg und Mn auslaugen, während HCl für die Auslaugung von Fe und Zn effektiv ist. Eine signifikante Menge von Ca wird durch NH_4Ac und HCl ausgelaugt. Al, Si, und Ti sind in allen Testflüssigkeiten unlöslich. In WS (Abbildung 17(b)) reduziert sich der wasserlösliche Anteil, da die wasserlöslichen Ascheelemente durch das Waschen schon aus dem Brennstoff entfernt wurden. In

AS4 erhöht sich der unlösliche Anteil von Al. Dieser Anteil kommt wahrscheinlich aus der Zugabe von Kaolin.

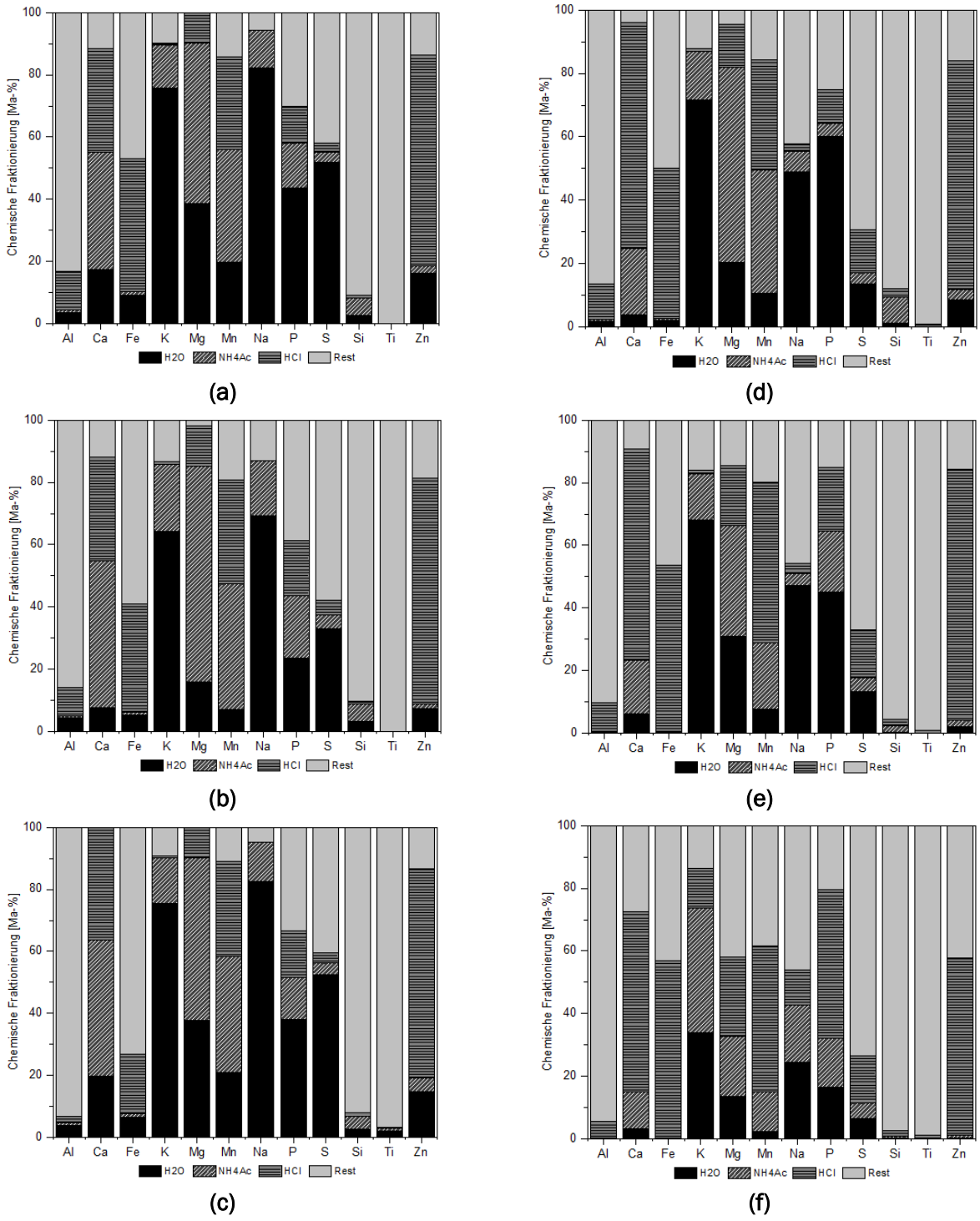


Abbildung 17 Ergebnisse der chemischen Fraktionierung von **(a)** Stroh (SP), **(b)** gewaschenem Stroh (WS), und **(c)** mit 4 Ma-% Kaolin additiviertem Stroh (AS4), **(d)** Holz (W), **(e)** bei 230 °C torrefiziertem Holz (TW230), und **(f)** bei 270 °C torrefiziertem Holz (TW270)

In WS sind die Elemente, wie K, Na, und P, im Allgemeinen wasserlöslich und nur eine sehr begrenzte Menge an K verbleibt als unlöslicher Anteil. Durch die Auslaugung in NH_4Ac können Mg und Mn gelöst werden. Ca und Zn können mit HCl ausgelaugt werden, nur eine sehr begrenzte Menge an Ca bleibt im

festen Rückstand. Al, S, Si, und Ti sind unlöslich. Bei der Ergebnisse von TW230 (Abbildung 17(e)) lässt sich feststellen, dass sich der mit NH_4Ac auslaugbare Anteil von Mg und Mn durch Torrefizierung verringert. Beim Torrefizierungsprozess werden organische Verbindungen zersetzt und in Form von Gas freigesetzt. Deswegen reduziert sich der Anteil von organisch gebundenem Mg und Mn. In TW270 reduzieren sich der wasserlösliche Anteil bzw. die mit NH_4Ac auslaugbaren Elemente weiter. Ca, Fe, und P sind hauptsächlich mit HCl auslaugbar. Insgesamt erhöhen sich der unlösliche Anteil im festen Rückstand in TW270 im Vergleich zu WS.

Auf Grundlage der elementaren Aschezusammensetzung wurde gemäß Vassilev et al[14] ein ternäres Diagramm erstellt, welches in Abbildung 18 veranschaulicht ist. Bei der Konstruktion eines solchen Diagramms wird Biomasseasche grundsätzlich als ternäres System ihrer dominierenden anorganischen Oxide – namentlich CaO, SiO_2 und K_2O – betrachtet, ergänzt durch weitere positive und negative Korrelationen mit anderen Oxiden, die definierte Assoziationen bilden. Diese Assoziationen reflektieren zudem den Gehalt sowie die Herkunft der Elemente. Die drei systematischen Assoziationen sind in Abbildung 18 illustriert, wobei die Oxide CaO + MgO + MnO auf der linken Achse, SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + Na_2O + TiO_2 auf der rechten Achse, und K_2O + P_2O_5 + SO_3 + Cl_2O auf der unteren Achse dargestellt sind. Auf dieser Weise wurde ein chemisches Klassifizierungssystem für Biomasseaschen erstellt: (i) „Siliziumecke“, d. h. Si-Type, (ii) „Kaliumecke“, d. h. K-Type, und (iii) „Kalziumecke“, d.h. Ca-Type, und (iv) zwischen der „Kaliumecke“ und „Kalziumecke“, d. h. Ca-K-Type. Die weiteren Untertypen wurden basierend auf dem Säurecharakter definiert: hohe Säure (HS), mittlere Säure (MS), und niedrige Säure (NS). Empirische Erkenntnisse über das Ascheschmelzverhalten führten zur Definition von drei Gruppen mit (i) niedrigen Fließtemperatur (FT), (ii) mittlerem FT, und (iii) hohem FT. Innerhalb der ternären Diagramm wurden die Gruppen dann auf der Grundlage empirischer Ergebnisse verschiedenen Bereichen zugeordnet, wie von Vassilev et al. vorgeschlagen [14].

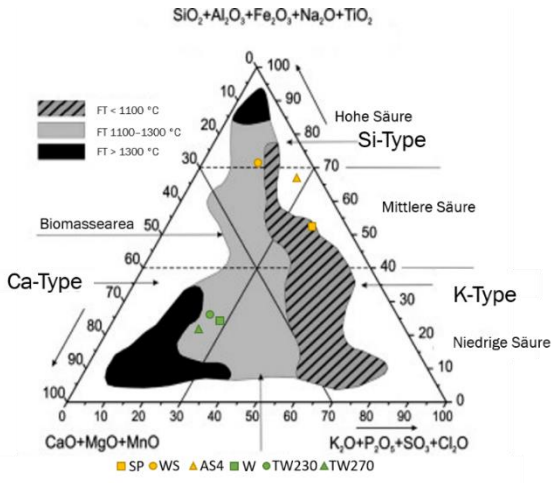


Abbildung 18 Aschezusammensetzung der untersuchten Brennstoffen im Form vom ternären Diagramm von Vassilev et.al [14]. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270)

Wie in Abbildung 18 dargestellt, liegen alle holzartigen Proben auf dem Ca-NS-Gebiet. Ein mittleres Risiko der Schlackenbildung spiegelt sich in ihrer Position im Diagramm wider. Hier wäre es nochmal zu betonen, dass die Torrefizierung keinen Einfluss auf der Aschezusammensetzung der holzartigen Proben hat. Im Gegensatz dazu spielt die Vorbehandlung bei den Strohproben eine große Rolle. SP befindet sich im

Si-HS-Bereich, der eine niedrige FT von unter 1100 °C aufweist. Durch das Waschen verschiebt sich SP in Richtung der Siliziumecke, weil durch das Waschen K_2O und Cl_2O enfernt werden. Daher liegt WS in der Region mit mittlerem Schlackekenbildungsrisiko. Das Additivieren verschiebt SP vom Bereich K-MS in den Bereich Si-MS, da durch Das Additivieren sich der Anteil von SiO_2, Al_2O_3, und Fe_2O_3 in AS4 erhöht. Ungünstigerweise liegt AS4 außerhalb des Untersuchungsgebiets von Vassilev et. al, sodass ihr Verschlackungsrisiko anhand dieser Grafik nicht direkt ermittelt und verglichen werden kann. Da AS4 jedoch mehr in Richtung der Siliziumecke liegt, sollte das Verschlackungsverhalten verbessert sein.

Die Vorhersage der Schlackenbildung mithilfe von Brennstoffindizes wird schon seit Jahrzehnten angewandt [15]. In den letzten Jahren wurden in zahlreichen Studien Brennstoffindizes für die Verbrennung im kleinen Maßstab eingesetzt, ohne dass die Anwendbarkeit weder für bestimmte Brennstoffarten noch für bestimmte Umwandlungstechnologien infrage gestellt wurde. Hier wurde erst einmal das Verschlackungsverhalten der untersuchten Brennstoffe mit der für den Verbrennungsprozess entwickelten Brennstoffindizes prognostiziert. Fünf Brennstoffindizes wurden ausgewählt, um das Verschlackungsverhalten der Ca-reichen (holzartig) und Si-reichen Brennstoffe (strohartig) vorherzusagen [15].

Tabelle 7 Ergebnisse aus der Berechnung der Brennstoffindizes. Abkürzung: Stroh (S), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270)

Indizes	Einheit	S	WS	AS4	W	TW230	TW270
Si/(Ca+Mg) [16]	mol/mol	4,5	4,3	7,0	0,4	0,4	0,3
(Na+K+Si)/(Ca+P+Mg)[17]	g/g	6,9	4,1	8,9	0.66	0.66	0,66
(Si + P + K)/(Ca + Mg) [18]	mol/mol	7,66	5,12	10,2	0,8	0,8	0,69
$SiO_2/(SiO_2+Fe_2O_3+CaO+MgO)*100$[19]	%/%	84	83	83	29	28	23
Si/Al [20]	g/g	412	238	3,4	57	44	42,5
Si in Asche [21]	Ma.-%	0,4	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1

Die in Tabelle 7 dargestellten Brennstoffindizes setzen sich aus den im Zähler aufgeführten schlackenbildenden Elementen und den im Nenner aufgeführten Elementen, welche die Schlackenbildung reduzieren, zusammen. Zudem zeigt der Si-Gehalt in der Brennstoffasche den Anteil der schlackenbildenden Brennstoffasche. Daher verschlechtert sich das Verschlackungsverhalten mit dem höheren Wert dieser Brennstoffindizes. In der Regel zeigen die Strohproben einen höheren Wert der Brennstoffindizes als die holzigen Proben, was darauf hindeutet, dass das Stroh ein höheres Verschlackungsrisiko aufweist. Mit Ausnahme des Brennstoffindexes, der sich auf den Siliziumgehalt in der Asche bezieht, weisen die untersuchten Strohproben niedrige Werte der Brennstoffindizes auf. Dies lässt den Schluss zu, dass das Waschen die Schlackenbildung reduzieren kann. Im Unterschied dazu neigt die Zugabe von Kaolin dazu, den Wert der Brennstoffindizes zu erhöhen, mit Ausnahme des Wertes von Si/Al. Dies könnte bedeuten, dass die anderen Brennstoffkennzahlen nicht geeignet sind, das Verschlackungsverhalten der mit Kaolinit additivierten Biomasse vorherzusagen. In Bezug auf die holzigen Proben lässt sich feststellen, dass die Torrefizierung nur einen geringen Einfluss auf die Werte der Brennstoffindizes ausübt.

Analyse der hergestellten Kokse- und Aschen

Die anhand der Veraschungsversuche gewonnenen Aschen und Kokse wurden beprobt und im DBFZ-Analytiklabor analysiert, um ihre Bestandteile zu ermitteln. Die Analyse der Hauptelemente (Al, Ca, Cl, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Si, Ti) erfolgte mittels optischer Emissionsspektrometrie unter Verwendung eines

induktiv gekoppelten Plasma (*engl. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)*) nach dem Flusssäureaufschluss gemäß DIN-EN-ISO 16967:2015-07 [22]. Bei den Vergasungsbedingungen wurden kohlenstoffhaltige festen Rückstände produziert. Um die Anwendungs- und Entsorgungsmöglichkeiten dieser Rückstände besser zu beurteilen, wurde die Typen des Kohlenstoffs charakterisiert. Mit dem festgelegten Temperaturgradienten-Verfahren gemäß DIN 19539:2016-12 lassen sich unterschiedliche Bindungsformen des Kohlenstoffs differenzieren [23]. Diese Methode kann den Gesamtkohlenstoff in Feststoffen in folgende Kategorien einteilen: organischen Kohlenstoff, der bis 400 °C freigesetzt wird (TOC_{400}), restlichen oxidierbaren Kohlenstoff (ROC) und anorganischen Kohlenstoff, der bis 900 °C freigesetzt wird (TIC).

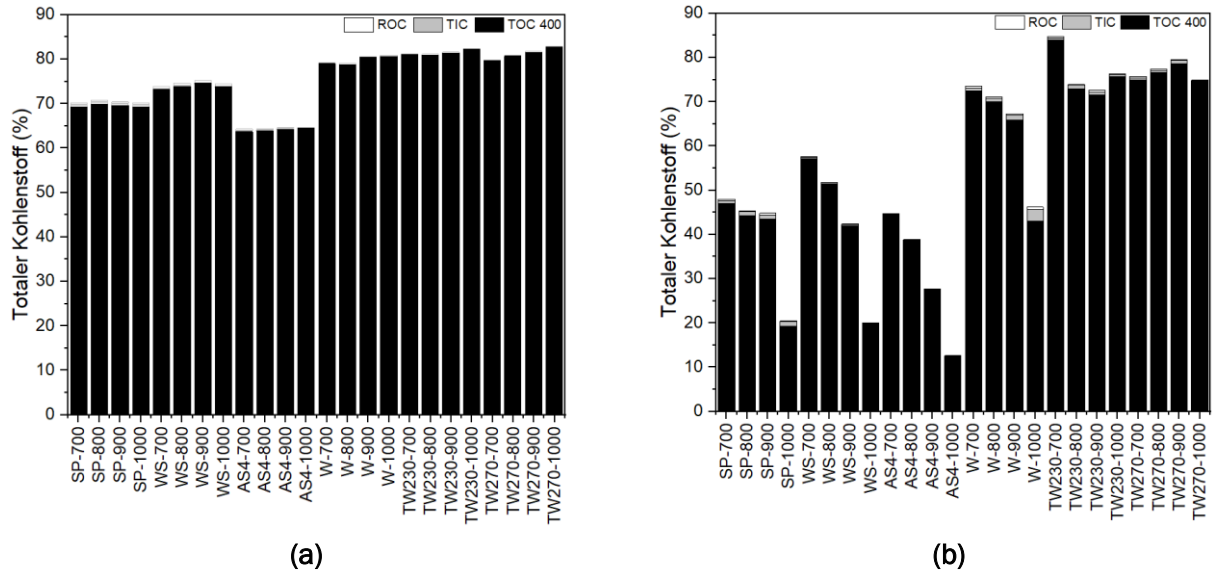


Abbildung 19 Die Differenzierung des Kohlenstoffs in den festen Rückständen aus der Veraschungsversuche mit (a) 0 %-O2 und (b) 10 %-O2. Abkürzung: organische Kohlenstoffe (TOC_{400}), restliche oxidierbare Kohlenstoffe (ROC), anorganische Kohlenstoffe (TIC). Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270)

Abbildung 19 stellt die Ergebnisse aus der Differenzierung des Kohlenstoffs in den aus den Veraschungsversuchen gewonnen festen Rückständen dar. Unter Sauerstoffabschluss (Abbildung 19(a)) spielt die Prozesstemperatur fast keine Rolle auf dem Gesamtkohlenstoffgehalt. Der Gesamtkohlenstoffgehalt in den festen Rückständen wird lediglich durch den Aschegehalt beeinflust. Bei den strohigen Proben weisen die gewaschenen Strohproben mit ca. 75 % den höchsten Gesamtkohlenstoffgehalt auf. Dieser ist jedoch noch niedriger als der Gesamtkohlenstoff in den holzartigen Proben, die ca. 80 % erreichen können. Wie Abbildung 19 zeigt, besteht der Gesamtkohlenstoff in allen Proben aus TOC_{400}.

Ein anderer Trend lässt sich beim Gesamtkohlenstoffgehalt in den festen Rückständen aus den Veraschungsversuchen mit 10 %-O_2 erkennen. Hier wird der Einfluss der Prozesstemperatur auf den Gesamtkohlenstoffgehalt in fast allen Proben deutlich. Die Veraschung bei höheren Temperaturen produziert Rückstände mit dem geringeren Gesamtkohlenstoffgehalt. Beispielsweise beträgt der Gesamtkohlenstoffgehalt von S-700 47 % und sinkt bei der Veraschung bei 1000 °C auf 20 %. Eine signifikante Verringerung des Gesamtkohlenstoffs lässt sich auch in anderen Proben erkennen, wie WS, AS4 und W. Nur bei den torrefizierten Proben, besonders bei TW270, hat die Prozesstemperatur einen geringen Einfluss auf den Gesamtkohlenstoffgehalt. Mit 80 % bleibt der Kohlenstoffgehalt von TW270-1000 hoch. Die Torrefizierung könnte zu stabileren Kohlenstoffverbindungen führen.

2.1.5 Arbeitspaket 5: Wissenstransfer

Für den Wissenstransfer bezüglich der Homogenisierung von heterogenen Biomassesortimenten wurde eine Homogenisierungsvorschrift für Stroh (M5.1.) entwickelt, die in die Best-Practise-Sammlung einfloss, die ebenfalls im Rahmen des Projektes erarbeitet wurde. Dabei konnten namenhafte Experten vom TFZ Straubing, der HAWK Göttingen, der Hochschule für Forstwirtshaft Rottenburg, dem BEA Institut für Bioenergie GmbH, der Universität Kassel und von Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik UMSICHT eingebunden werden. Diese steht kurz vor der Finalisierung und wird im Format der Schriftenreihe im Rahmen des 7. Energierahmenforschungsprogramms interessierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Nach der Veröffentlichung ist die Präsentation auf der Statuskonferenz und im Rahmen eines Workshops vorgesehen.

2.2 Meilensteine und Maßnahmen

Tabelle 8 zeigt den Stand der Umsezung der Meilsteinen im diesen Projekt.

Tabelle 8 Meilensteine und Maßnahme

Meilstein / Maßnahme	Stand der Umsetzung	Erläuterung
M 1.1: Alle Brennstoffe liegen in Pelletform vor	Vollständig erfüllt	-
M 2.1: Versuchsplan erstellt (	Vollständing erfüllt	-
M 2.2: STA-Versuche abgeschlossen und Versuchsergebnisse publikationsfähig aufbereitet	Vollständing erfüllt	STA-Versuche erfolgten unter zwei Atmosphäre: 0%-O_2 und 10%O_2. Die Gasentwicklung während der Versuche konnten durch den Massenspektrometer detektiert. Die Quantifizierung der Gasentwicklung konnte im Projekt aus Sicherheitsgründe und aufgrund von Platzmangel nicht durchgeführt.
M 2.3: Vergasungsversuche abgeschlossen und Versuchsergebnisse publikationsfähig aufbereitet	Vollständig erfüllt	Versuche wurden zur Pyrolyse und CO_2-Vergasung entsprechend der im Projekt OpToKNuS entwickleten Methodik durchgeführt
M 2.4: Kennzahlen abgeleitet	Erfüllt	Soweit aus den Ergebnissen möglich wurden Kennzahlen abgeleitet
M 3.1: Alle Asche und Koksfraktionen analysiert und die Analysenergebnisse publikationsfähig aufbereitet	Vollständig erfüllt	Koks und Asche wurden in einem inertisierten Muffelofen unter zwei Atmosphäre: 0 %-O_2 und 10 %O_2 hergestellt. Die Siebanalyse wurde durchgeführt, um die Koks und Asche nach Siebgröße zu klassifizieren
M 3.2: Kennzahlen bzgl. Ascheverhalten abgeleitet	Vollständig erfüllt	Die Ableitung der Kennzahlen bezüglich Aschеschmelzverhalten erfolgte durch thermodyna-

Meilstein / Maßnahme	Stand der Umsetzung	Erläuterung
		mische Gleichgewichtsberechnungen. Die Ableitung der Kennzahlen aus den Ergebnissen der Siebananalyse der festen Rückstände aus Muffelofenversuche ist nicht möglich, da die Siebanalyse nicht zur Klassifizierung der Asche führt
M 4.1: Proben- und Analysenplan erstellt	Vollständig erfüllt	-
M 4.2: Analysen abgeschlossen und publikationsfähig aufbereitet	Teilweise erfüllt	Ursprünglich waren XRD-, SEM- und Ascheschmelzanalyse vorgesehen. Im Rahmen der Diskussionen, die im Verlauf des Projekts stattgefunden haben, wurde ersichtlich, dass die genannten Analysen für die Charakterisierung der Asche aus den Vergasungsversuchen von Relevanz sein könnten. Bezüglich der Ableitung von Kennzahlen erwiesen sie sich jedoch als weniger hilfreich. Daher wurden diese Analyse nicht durchgeführt.
M 5.1: Homogenisierungsvorschrift erstellt	Vollständig erfüllt	-
M 5.2: Konferenzteilnahme (Präsentation) zu den Kennzahlen	offen	Eine Konferenzteilnahme der EUBCE 2025 in Form eines Posters und Präsentation geplant
M 5.3: Veröffentlichung in einer Fachzeitschrifft eingereicht	offen	Einreichung der Veröffentlichung in einem *peer-reviewed* Journal ist für Ende 2024 geplant
M 5.4: Workshop durchgeführt	Teilweise erfüllt	Homogenisierungsworkshop wurde bei der Statuskonferenz 2021 durchgeführt. Weiterhin soll die Ergebnisse auch mit in die Statuskonferenz 2025 fließen

2.3 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen zum zahlenmäßigen Nachweis ist mit dem separat zugegangenen Verwendungsnachweis zu entnehmen.

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Trotz eines signifikanten Interesses an der Verwendung von Holzreststoffen minderen Qualitätsgrades sowie nicht-holzartigen Reststoffen wie Stroh im Rahmen der Biomassevergasung waren zu Beginn des Projekts konkrete praktische Anwendungen rar. Aufgrund kritischer Inhaltsstoffe manifestieren sich im praktischen Betrieb kleintechnischer Vergasungsanlagen mit den genannten anspruchsvollen Brennstoffen Probleme wie Verschlackung und Ablagerungen durch Störstoffe beim Aschenaustrag. Darüber

hinaus führt die Inhomogenität in den Brennstoffchargen zu einem instabilen Betrieb der Vergasungsanlage. Um eine Anpassung der Vergasungstechnik vorzunehmen, ist es notwendig, zunächst das Verhalten dieser Reststoffe während des Vergasungsprozesses eingehend zu analysieren.

Vor diesem Hintergrund ist die Bearbeitung der im Antrag aufgeführten Arbeitspakete sowohl für Betreiber und Hersteller von Vergasungsanlagen zur Anpassung und Optimierung des Anlageneinsatzes als auch für Lieferanten von Brennstoffen zur homogenen Herstellung aus holzartigen sowie nicht-holzartigen Reststoffen von erheblichem Interesse gewesen. Basierend auf der Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens wurden kritische Elemente identifiziert, welche zur Bildung von Schlacken beitragen können; hierzu zählen K, Cl, Na und S. Im Gegensatz dazu wird festgestellt, dass Al in den verwendeten Brennstoffen eine Reduktion der Schlackenbildung fördert. Dies validiert die Annahme, dass das Ascheschmelzverhalten nicht-holzartiger Reststoffe wie Stroh durch Waschprozesse sowie durch Additivieren mit aluminumbasierten Mineralien optimiert werden kann. Somit sind diese Erkenntnise im weiteren Sinne auch für die Anlagenbetreiber hilfreich, weil das Ascheschmelzverhalten der verwendeten Brennstoffe auf Basis der Brennstoffanalyse besser vorhergesagt wird. Die Erstellung eines Methodenhandbuchs zur Homogenisierung definiert zudem den erforderlichen Ablauf des Homogenisierungsprozesses. Dies hat weitreichende Implikationen für notwendige Anpassungen im Produktionsprozess oder bei der Aufbereitung von Brennstoffmaterialien und könnte zudem einen wirtschaftlichen Nutzen aus gegenwärtig ungenutzten nicht-holzartigen Reststoffen generieren. Weiterhin bieten die im Projekt festgestellten kennzahlen zum Vergasungsverhalten eine gute Grundlage für Anlagenbetreiber, um eine Umstellung auf andere Brennstoffe sicherer herbeiführen zu können, da das Verhalten der brennstoffe insbesondere im Bereich der Pyrolyse besser vestanden werden kann.

2.5 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Projektergebnisse sollen auf dem Gebiet der energetischen Nutzung der biogenen Rest- und Abfallstoffen in Feuerungs- und Vergasungsanlagen genutzt und verwertet werden sowie der weiteren Forschung und Entwicklung Impulse zu geben, um eine Übertragung in den Markt zu gewährleisten. Im Projekt „OpToKNuS“ (FKZ: 03KB163A) wurde ein detailliertes Simulationsmodell zur Vorhersage das Vergasungsverhalten von verschiedenen Brennstoffen an verschiedenen Vergasungsanlagen entwickelt und durch die Feldmessungen im Technikumsmaßstab validiert. Weiterhin fokussierte das Projekt „OpToKNuS“ auf die Holzbrennstoffe mit unterschiedlichen Qualitäten. Die im Projekt „KeVergAv“ abgeleitete Kennzahlen zum Vergasungs- und Ascheschmelzverhalten dienen der Ergänzung des im Projekt „OpToKNuS“ entwickelten Simulationsmodells, um den Brennstoff für dessen optimale Nutzung in der Vergasungsanlage besser zu beschreiben. Zudem wurde das Vergasungsverhalten der strohartigen Reststoffe nach unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden durch die Kennzahlen beschrieben.

Im Rahmen des Projektes „MobiFuels“ (FKZ: 03KB136) erfolgte die Untersuchung von der Nutzung der unterschiedlich aufbereiteten biogenen Brennstoffe für den Einsatz im kleinen und mittleren Leistungsbereich (< 1 MW_{th}). Als Teil des Projektes wird eine Datenbank zu biogenen Brennstoffen erstellt, die nicht nur der Brennstoffzusammensetzung als auch Daten zum Konversionsverhalten beinhaltet. Bislang fokussiert die Datenbank jedoch nur auf die Verbrennungsbedingung. Die im Projekt „KeVergAv“ entwickelten Kennzahlen und generierten Daten werden mit in die Datenbank einbezogen, wodurch die Datenbank des Projektes „MobiFuels“ um Daten zum Vergasungsverhalten und Ascheschmelzverhalten bei der Vergasungsbedingung erweitert wird und die Daten aus dem Projekt „KeVergAv“ leicht zugänglich verbreitet werden.

Mitarbeiter des DBFZ sind im nationalen DIN-Gremium NA 062-05-82 AA „Biogene Festbrennstoffe“, in die Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Gremium NA 134-04-03-13 UA „Emissionsüberwachung von Kleinfeuerungsanlagen“) sowie im internationalen Normungsgremium ISO/TC 238 „Solid Biofuels“ aktiv und können dort die im Projekt erzielten Ergebnisse sehr gut einbringen. Zudem liefern die Projektergebnisse für aktuell diskutierte Fragestellungen zur Nutzbarkeit und Qualitätssicherung von biogenen holzartigen und strohartigen Reststoffen wichtige Informationen.

2.6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens von anderen Stellen

Parallel zum Projekt wurden auch an anderen Stellen wichtige Fortschritte erzielt. Eine Analyse der aktuellen Publikationen verdeutlicht, dass Stroh nach wie vor als bedeutende Alternative zu fossilen Brennstoffen und Holz betrachtet wird. Gleichwohl besteht aufgrund der problematischen Inhaltsstoffe ein erheblicher Forschungsbedarf, um die daraus resultierenden Herausforderungen anzugehen. Lebendig et.al untersuchten den Einfluss der Vorbehandlungen von Stroh (Waschen, Torrefizierung, und Additvierung) auf die Stickoxidemissionen [24], wobei ihr Effekt auf das Verschlackungsverhalten jedoch nicht näher analysiert wurde. Weitere Literatur weist darauf hin, dass die Verschlackung den durch die Einschließung der Kohlenstoffpartikel den Vergasungsprozess verzögern kann [25,26]. Die Fortschritte der thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen zur Beschreibung des Vergasungsprozesses können von ein paar Publikationen gezeigt werden. Die beiden Studien fokussierten sich auf die Charakterisierung des Ascheschmelzverhaltens [27,28]. Die Anwendung thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen zur Ableitung von Kennzahlen bezüglich des Ascheschmelzverhaltens unter Vergasungsbedingungen in diesem Projekt stellt einen wesentlichen Beitrag zu weiteren Fortschritten in diesem Bereich dar.

2.7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Projektzeitraum wurden folgende Veröffentlichungen in Form von Vorträgen, Posterpräsentationen, Tagungsbänden, und wissenschaftlichen Veröffentlichungen realisiert:

- 10. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung: Projektvorstellung
- 10. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung: Homogenisierungsworkshop

Die Ergebnisse bezüglich der brennstoffspezifischen Kennzahlen zum Vergasungs- und Ascheschmelzverhalten werden in folgender Form veröffentlicht:

- 33. European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE 2025) → Konferenzteilnahme in Form von Poster und Präsentation
- Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift in Q4 2024

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht Arbeitspakete / Arbeitsschwerpunkte 10
Abbildung 2 Fließbild der Brennstoffaufbereitung 11
Abbildung 3 Visuelle Darstellung der hergestellten Pelletsproben 11
Abbildung 4 Thermogravimetrische Analyse (TGA) der thermischen Behandlung von verschiedener Brennstoffchargen unter **(a)** 0 Ma-% O_2 und **(b)** 10 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270) 13
Abbildung 5 Ableitung TGA-Kurve (DTG) der thermischen Behandlung von verschiedener Brennstoffchargen unter **(a)** 0 Ma-% O_2 und **(b)** 10 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270) 13
Abbildung 6 Vergleich des einzelnen Gasaustoß aus der thermischen Behandlung verschiedener Brennstoffchargen unter 0 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270). 14
Abbildung 7 Vergleich des einzelnen Gasaustoß aus der thermischen Behandlung verschiedener Brennstoffchargen unter 10 Ma-% O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270). 15
Abbildung 8: Ablauf Pyrolyseversuch Festbett-Laborvergaser 202400030 - 9 Uhr Start Pyrolyse bei 850°C Reaktortemperatur nach vorheriger Anlagenaufheizung mit Reaktor im Bypass, 11 Uhr Erhöhung der Reaktortemperatur auf 900°C, 13:40 Uhr Versuchsende (*links:* Temperaturverlauf im Reaktor; *rechts:* Produktgas-Konzentrationsverlauf) 17
Abbildung 9: Ablauf CO_2-Vergasungsversuch Festbett-Laborvergaser 202400059 - 9:10 Uhr Start Aufheizung des Reaktors (Pyrolysekoks) mit Stcikstoff nach vorheriger Aufheizung der Anlage, 10:35 Uhr bei konstanter Reaktortemperatur Umstellung des Vergasungsmittels auf Stickstoff/Kohlendioxidmischung, 12:35 Uhr Versuchsende (links: Temperaturverlauf im Reaktor; rechts Produktgas-Konzentrationsverlauf) 18
Abbildung 10 Schlackenanteil im festen Rückstand aus dem Vergasungsprozess simuliert mittels Factsage 22
Abbildung 11 Der inertisierbare Muffelofen für die Versuche im Labormaßstab. (a) Frontanschit, (b) innerer Raum der Retorte 23
Abbildung 12 Ergebnisse der Siebanalyse der festen Rückstände aus den Muffelofenversuchen unter **(a)** 0 %-O_2 und **(b)** 10 %-O_2. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 1 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS1), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270). Die Nummer nach dem Strich im Probenahme bezeichnet die Prozesstemperatur 24
Abbildung 13 Proben auf dem 3,15 mm-Maschen nach der Siebung vom festen Rücksand aus Veraschung von Stroh bei 1000 °C unter Atmosphäre (a) 0 %-02, (b) 10 %-02 25
Abbildung 14 Erklärte Varianz per Haupkomponent und der entsprechende kummulative Wert 27

Abbildung 15 Beiträge der Variablen zu jeder Hauptkomponente innerhalb des PC 1 27
Abbildung 16 Interpration der PCA-Ergebnisse durch (a) Loading-Plot und (b) Score-Plot. Abkürzung: Prozesstemperatur (T), Verschlackungsindex (VI), Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 1 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS1), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270)..... 28
Abbildung 17 Ergebnisse der chemischen Fraktionierung von **(a)** Stroh (SP), **(b)** gewaschenem Stroh (WS), und **(c)** mit 4 Ma-% Kaolin additiviertem Stroh (AS4), **(d)** Holz (W), **(e)** bei 230 °C torrefiziertem Holz (TW230), und **(f)** bei 270 °C torrefiziertem Holz (TW270)..... 30
Abbildung 18 Aschezusammensetzung der untersuchten Brennstoffen im Form vom ternären Diagramm von Vassilev et.al [14]. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270) 31
Abbildung 19 Die Differenzierung des Kohlenstoffs in den festen Rückständen aus der Veraschungsversuche mit (a) 0 %-O2 und (b) 10 %-O2. Abkürzung: organische Kohlenstoffe (TOC_{400}), restliche oxidierbare Kohlenstoffe (ROC), anorganische Kohlenstoffe (TIC). Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270) 33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Versuchsübersicht Festbett-Laborvergaser 19
Tabelle 2 Massenbilanzen (Messwerte) Festbett-Laborvergaser-Versuche (Auszug) für die Projektbrennstoffe Landschaftspflegematerial roh (LPMr), Landschaftpflegematerial torrefiziert (LPMt), Stoh roh (Sr), Stroh gewaschen (Sg), Stroh additiviert (Sa) 19
Tabelle 3 KerVergAv-Kennzahlen Festbett-Laborvergaser für die Projektbrennstoffe am Beispiel von Einzelversuchen 21
Tabelle 4 Korrelationsfaktor zwischen den Variablen bei der multivariaten Analyse 25
Tabelle 5 Liste der eingesetzten Variabeln in der PCA 26
Tabelle 6: Ergebnisse der Brennstoff- und Brennstoffascheanalyse. Abkürzung: Stroh (SP), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 1 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS1), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefiziertes Holz bei 270 °C (TW 270) 29
Tabelle 7 Ergebnisse aus der Berechnung der Brennstoffindizes. Abkürzung: Stroh (S), gewaschenes Stroh (WS), Stroh mit 4 Ma-% Kaolin-Zusatz (AS4), Holz (W), torrefiziertes Holz bei 230 °C (TW 230), torrefizertes Holz bei 270 °C (TW 270) 32
Tabelle 8 Meilensteine und Maßnahme 34

Literatur- und Referenzverzeichnis

[1] M.R. Heinrich, A. Herrmann, A. Gradel, M. Klemm, T. Plessing, Extensive Experimental Characterization with Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels, Energies 16 (2023) 2888. https://doi.org/10.3390/en16062888.

[2] A. Molino, S. Chianese, D. Musmarra, Biomass gasification technology: The state of the art overview, Journal of Energy Chemistry 25 (2016) 10–25. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005.

[3] S. Farzad, M.A. Mandegari, J.F. Görgens, A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments, Biofuel Res. J. 3 (2016) 483–495. https://doi.org/10.18331/BRJ2016.3.4.3.

[4] L. Wang, S. Wang, J. Zhou, L. Xie, H. Qin, H. Ma, A Scientometric Review: Biomass Gasification Study from 2006 to 2020, ACS Omega 7 (2022) 38246–38253. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05527.

[5] R. Jonsson, F. Rinaldi, R. Pilli, G. Fiorese, E. Hurmekoski, N. Cazzaniga, N. Robert, A. Camia, Boosting the EU forest-based bioeconomy: Market, climate, and employment impacts, Technological Forecasting and Social Change 163 (2021) 120478. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120478.

[6] C.A.R.M.E.N. e.V., Kleine Holzvergasungsanlagen - Handlungsempfehlungen für Investoren, 2011. https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2021/12/Kleine-Holzvergasungsanlagen.pdf (accessed 8 March 2024).

[7] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., tatistiken über Holzgas-KWK-Anlagen, die von Herstellern im DACH-Raum ausgeliefert wurden. https://holzgas-branche.de/zahlen-fakten/ (accessed 16 September 2024).

[8] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer, Energie aus Biomasse, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.

[9] J. Koppejan, S. van Loo, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Routledge, 2012.

[10] D. Boström, A. Grimm, C. Boman, E. Björnbom, M. Öhman, Influence of Kaolin and Calcite Additives on Ash Transformations in Small-Scale Combustion of Oat, Energy Fuels 23 (2009) 5184–5190. https://doi.org/10.1021/ef900429f.

[11] R. Mack, D. Kuptz, C. Schön, H. Hartmann, Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler, Biomass and Bioenergy 125 (2019) 50–62. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.003.

[12] B.-M. Steenari, O. Lindqvist, High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite, Biomass and Bioenergy 14 (1998) 67–76. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00035-4.

[13] M. Zevenhoven-Onderwater, Ash-forming matter in biomass fuels, Department of Chemical Engineering, Process Chemistry Group, Åbo Akademi University, Åbo, 2001.

[14] S.V. Vassilev, D. Baxter, C.G. Vassileva, An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types, Fuel 117 (2014) 152–183. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.024.

[15] S. Feldmeier, E. Wopienka, M. Schwarz, C. Schön, C. Pfeifer, Applicability of Fuel Indexes for Small-Scale Biomass Combustion Technologies, Part 1: Slag Formation, Energy Fuels 33 (2019) 10969–10977. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02409.

[16] E. Lindström, M. Öhman, R. Backman, D. Boström, Influence of Sand Contamination on Slag Formation during Combustion of Wood Derived Fuels, Energy Fuels 22 (2008) 2216–2220. https://doi.org/10.1021/ef700772q.

[17] H. Visser, The Influence of Fuel Composition on Agglomeration Behaviour in Fluidised-Bed Combustion, ECN Publicaties, 2004.

[18] P. Sommersacher, T. Brunner, I. Obernberger, Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels, Energy Fuels 26 (2012) 380–390. https://doi.org/10.1021/ef201282y.

[19] T. Rizvi, P. Xing, M. Pourkashanian, L.I. Darvell, J.M. Jones, W. Nimmo, Prediction of biomass ash fusion behaviour by the use of detailed characterisation methods coupled with thermodynamic analysis, Fuel 141 (2015) 275–284. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.021.

[20] E.C. Winegartner, Coal Fouling and Slagging Parameters, 1994.

[21] M. Öhman, C. Boman, H. Hedman, A. Nordin, D. Boström, Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners, Biomass and Bioenergy 27 (2004) 585–596. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.016.

[22] DIN EN ISO 16967:2015-07, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung von Hauptelementen_- Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO_16967:2015); Deutsche Fassung EN_ISO_16967:2015, DIN Media GmbH, Berlin.

[23] DIN 19539:2016-12, Untersuchung von Feststoffen_- Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC<(Index)400>, ROC, TIC<(Index)900>), Beuth Verlag GmbH, Berlin.

[24] F. Lebendig, D. Schmid, O. Karlström, P. Yrjas, M. Müller, Influence of pre-treatment of straw biomass and additives on the release of nitrogen species during combustion and gasification, Renewable and Sustainable Energy Reviews 189 (2024) 114033. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114033.

[25] T. Zhou, W. Zhang, S. Luo, Z. Zuo, D. Ren, The effect of ash fusion characteristic on the structure characteristics of carbon and the migration of potassium during rice straw high-temperature gasification process, Energy 284 (2023) 129352. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129352.

[26] T. Zhou, W. Zhang, Y. Shen, S. Luo, D. Ren, Progress in the change of ash melting behavior and slagging characteristics of co-gasification of biomass and coal: A review, Journal of the Energy Institute 111 (2023) 101414. https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101414.

[27] W. Zhang, Y. Wu, S. Huang, X. Wei, X. Li, S. Wu, Comparative study on the effects of wood dust and rice husk on wheat straw gasification process: Ash fusion characteristics and gasification reactivity, Fuel 326 (2022) 124942. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124942.

[28] C. He, Y. Du, X. Cai, J. Wang, Y. Qin, Z. Zhao, H. Li, S.V. Vassilev, C.G. Vassileva, In-situ analysis of the sintering behavior of coal ash and a phosphorus-rich biomass ash under gasification condition, Biomass and Bioenergy 168 (2023) 106671. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106671.

A 1 Haupt- und Nebenelemente der festen Rückstände aus der Ascheuntersuchung im Muffelofen

Probenbezeichnung*	Elemente (mg/kg)												
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	S	Si	Ti
SP-700-0%-O2	187	11200	275	41800	2370	103	1080	11	1190	0	1290	47900	10,8
SP-800-0%-O2	217	11400	403	46900	2820	109	1250	15,5	1410	0	1610	49300	11,8
SP-900-0%-O2	200	10200	446	43400	2660	102	1270	22	1360	0	1600	44200	13,3
SP-1000-0%-O2	181	10300	478	43100	2710	104	1330	25,2	1390	0	1610	45700	12,2
WS-700-0%-O2	222	13600	227	12600	2300	98,1	970	3,43	667	0	793	53100	17,1
WS-800-0%-O2	227	12900	310	13200	2440	97,4	979	9,52	724	0	933	50500	14,7
WS-900-0%-O2	269	12900	343	12900	2590	100	982	11,1	790	0	1090	48500	14,8
WS-1000-0%-O2	234	12700	440	12400	2520	105	976	22,1	782	0	1080	50200	13,9
AS4-700-0%-O2	18500	10100	762	39500	2390	97,1	1090	7,95	1240	0	1290	68600	328
AS4-800-0%-O2	18600	9470	855	40100	2460	95,2	1080	13	1300	0	1420	66500	320
AS4-900-0%-O2	18700	9230	933	39300	2490	100	1190	18,6	1330	0	1440	64500	310
AS4-1000-0%-O2	21900	11500	852	37900	2660	110	1210	20,4	1340	0	1460	75400	383
TW230-700-0%-O2	1020	24500	689	6610	2850	118	287	6,19	1920	0	1340	5060	62,8
TW230-800-0%-O2	1270	26500	1320	10900	2880	128	631	26	2060	0	1020	4290	78
TW230-900-0%-O2	1060	25900	1330	10500	2870	128	604	46,4	2120	0	1050	3450	57,2
TW230-1000-0%-O2	1370	28500	1080	8580	2990	135	377	44,6	2040	0	1470	7410	81
TW270-700-0%-O2	1030	26200	1110	10700	2680	138	617	14,2	1890	0	865	4020	69,2
TW270-800-0%-O2	1160	26700	1330	10400	2960	135	576	31,6	2110	0	1060	4540	63,7
TW270-900-0%-O2	1180	37500	1500	9990	3090	133	340	43	2100	0	1200	5970	77,8
TW270-1000-0%-O2	1020	24900	1040	6920	3020	136	282	50,8	2060	0	1150	5820	66,5
W-700-0%-O2	1000	27500	1030	11000	2840	129	621	12,1	2020	0	941	4460	56,3
W-800-0%-O2	998	27200	1310	10500	2990	130	582	37,1	2170	0	1070	2920	56,7
W-900-0%-O2	1010	26200	1390	10000	2920	130	611	45,8	2150	0	1050	2840	57,5
W-1000-0%-O2	1190	27400	1050	7550	3140	136	318	47,8	2140	0	1480	5890	67,2
SP-700-10%-O2	260	19800	251	76600	4060	191	1590	0	1940	0	2810	90400	16,7
SP-800-10%-O2	400	24500	465	98000	5120	214	2240	7,36	2640	0	3620	103000	32

Probenbezeichnung*	Elemente (mg/kg)												
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	S	Si	Ti
SP-900-10%-O2	404	26400	550	101000	5500	230	2360	9,99	2880	0	3820	117000	35,8
SP-1000-10%-O2	612	38500	732	149000	8250	344	3850	7,69	4390	0	5500	175000	61,9
WS-700-10%-O2	327	23200	234	22000	3570	174	1420	0	1000	0	1670	94600	25,5
WS-800-10%-O2	513	29600	474	27100	4720	207	1820	6,65	1420	0	2260	104000	39,6
WS-900-10%-O2	619	35500	560	35100	5740	250	2360	5,51	1770	0	2670	160000	48,2
WS-1000-10%-O2	996	64300	874	58200	9920	434	3650	6,67	2800	0	4400	254000	82,5
AS4-700-10%-O2	26400	16400	1020	59400	3470	165	1280	0	1720	77,5	2450	113000	520
AS4-800-10%-O2	35200	20100	1300	76500	4310	184	1820	14,5	2290	89,9	2940	127000	688
AS4-900-10%-O2	43600	24700	1630	94100	5380	231	2380	8,45	2900	88,1	3600	168000	849
AS4-1000-10%-O2	55700	30600	1920	112000	6420	299	3060	6,78	3290	55,2	3910	194000	1040
TW230-700-10%-O2	1210	39600	1140	12700	3410	186	471	0	2260	0	943	6860	103
TW230-800-10%-O2	22210	48000	1760	16300	4300	205	801	16	3030	0	1510	10600	143
TW230-900-10%-O2	2130	57100	1940	19900	5120	248	773	15,8	3780	0	1900	12600	149
TW230-1000-10%-O2	1890	59300	1850	20400	4870	257	823	34,7	3440	0	2050	12100	137
TW270-700-10%-O2	1210	35600	1330	9790	3120	174	452	0	2070	0	912	6650	70
TW270-800-10%-O2	1600	42600	1660	14000	3760	186	609	17,6	2690	0	1350	8640	108
TW270-900-10%-O2	1570	44000	1550	14800	3960	191	587	25,3	2880	0	1480	9150	105
TW270-1000-10%-O2	1680	52200	1770	18100	4380	225	729	38	3090	0	1780	10400	124
W-700-10%-O2	1670	43200	1150	15300	3540	207	1050	11,3	2980	0	1770	6210	89,3
W-800-10%-O2	2130	59800	1840	20000	5280	248	872	13,4	3800	18,7	1970	12200	146
W-900-10%-O2	2610	71800	2220	24700	6490	309	1060	17,3	4780	0	2460	15200	162
W-1000-10%-O2	3700	124000	3430	44400	10700	560	1740	13,4	7380	0	3390	24200	323

*Probenbezeichnung: Biomasse-Temperatur-Atmosphäre(O_2-Gehalt)

A 2 Vortrag zum Statuskonferenz

Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Projektträger: PtJ Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich
Begleitforschung: DBFZ; BIOENERGIE Forschungsnetzwerke Energie; Energetische Biomassenutzung

Brennstoffspezifische Kennzahlen zum Vergasungs- und Ascheverhalten unterschiedlich aufbereiteter Holz- und Strohbrennstoffe

Dr. Annett Pollex
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Die Kernfragen

BIOENERGIE Forschungsnetzwerke Energie; Energetische Biomassenutzung

WAS sind die wesentlichen Forschungsfragen?

- Welchen Einfluss hat die Brennstoffaufbereitung von Stroh (waschen, torrefizieren, additivieren) auf dessen Vergasungsverhalten?
- Inwieweit lässt sich durch Einsatz von torrefizierten Holzpellets der Betrieb von Vergasungsanlagen flexibilisieren?
- **Was sind die brennstoffspezifischen Kennzahlen des Vergasungsprozesses für Stroh und Holz?**
- Was sind die optimalen Werte von Einflussparametern bei der Vergasung der untersuchten Materialien?
- Inwieweit sind die Ergebnisse von STA auf Muffelofentests und Vergasertests übertragbar?
- Wie soll die Schlackenbildung bei der Vergasung kontrolliert werden?

Das Projektteam

BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE

Energetische Biomassenutzung

WER ist beteiligt?

- DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützig GmbH
  - Bereich TK: Brennstoffaufbereitung / STA-Messung / Muffelofenversuche
  - Bereich BR: Festbett-Laborvergaser-Versuche

Die Maßnahmen und Methoden

BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE

Energetische Biomassenutzung

Wie setze ich die Ziele um?

29.11.2021 | 03EI5416 KeVergAv

Dr. Annett Pollex

Die „Vision“

WOHIN soll es gehen? Was soll im Markt umgesetzt werden?

- Optimierung von Vergasungsanlagen zur Realisierung eines flexiblen und bedarfsgerechten Anlagenbetriebes unter Verwendung der im Projekt abgeleiteten Kennzahlen
- Höhere Brennstoffflexibilität von Vergasungsanlagen
- Erzeugung anforderungsgerechter Strohpellets vor dem Hintergrund des Zielkonfliktes:

  hohe Vergasungstemperatur = geringer Teergehalt im Produktgas

  niedrige Temperatur = geringeres Verschlackungsrisiko

Moment/Geschichte des Anstoßes

Wie ist die Projektidee entstanden?

- Zunehmende Rolle kleiner und mittlere Biomassevergasungsanlagen zur Stabilisierung der zukünftigen, von fluktuierenden Energiequellen geprägten Stromversorgung
- Notwendigkeit der vermehrten Nutzung biogene Reststoffe mit kritischerer Brennstoffzusammensetzung statt der bisher überwiegend eingesetzten hochwertigen Holzbrennstoffe
- Der Vergasungsprozess ist noch nicht vollständig verstanden, insbesondere mit Blick auf wechselnde Brennstoffe und verschiedenen Reaktorgeometrien.
- Die vergleichbare Beschreibung des Vergasungsprozesses über Kennzahlen unterstützt sowohl die Bereitstellung geeigneter Brennstoffe für die Vergasung als auch die Optimierung des Vergasungsprozesses und der dafür notwendigen Anlagen.

Wunschkonzert

BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE

Energetische Biomassenutzung

Wenn Sie 3 Wünsche frei hätten, WEN und WAS bräuchten Sie noch?

- Mehr Zeit und Geld für ausführlichere Analysen bzw. zur Durchführung von mehr Versuchen zur Kennzahlenbildung
- Allgemeingültige und einfach anwendbare Verfahren zur Homogenisierung von heterogenen Brennstoffen
- Standardisierte Methoden zur Analyse des realen Ascheschmelzverhaltens unter Vergasungsbedingungen

29.11.2021 | 03EI5416 KeVergAv

Dr. Annett Pollex

A 3 Homogenisierungsworkshop

Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Projektträger: PtJ Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich
Begleitforschung: DBFZ; BIOENERGIE Forschungsnetzwerke Energie
Energetische Biomassenutzung

Homogenisierungsworkshop

Dr. Annett Pollex
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Statuskonferenz 2021

Homogenisierungsworkshop

BIOENERGIE Forschungsnetzwerke Energie; Energetische Biomassenutzung

Fragen für den Erfahrungsaustausch

- Gab es ein initiales Ereignis, durch das das Bewusstsein für die Heterogenität von Brennstoffen und die Notwendigkeit der Homogenisierung geweckt wurde? Wenn ja, erzählen Sie bitte davon.
- Welche Verfahren haben Sie für die Homogenisierung getestet? Bitte schildern Sie vor allem Erfahrungen, die nicht zum gewünschten Ergebnis geführt hatten.

→Für diese Fragen haben wir auch ein Lime-Survey vorbereitet:
https://survey.dbfz.de/limesurvey/index.php/465774?lang=de

Homogenisierungsworkshop

BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE | Energetische Biomassenutzung

Fragen zur Diskussion (I)

Welche Verfahren haben sich für welche Brennstoffe bzw. Aufbereitungsformen bewährt?

- DBFZ:
  - Holzhackschnitzel → Umschaufeln;
  - Pellets → Paddelmischer;
  - Körner + Additiv → Granulierung;
  - Stroh → zweistufige Pelletierung mit sequentieller Abfüllung

30.11.2021 | Homogenisierungsworkshop

Dr. Annett Pollex

Homogenisierungsworkshop

BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE | Energetische Biomassenutzung

Fragen zur Diskussion (I)

Welche Verfahren haben sich für welche Brennstoffe bzw. Aufbereitungsformen bewährt?

- Teilnehmer:
  - Beispiele

30.11.2021 | Homogenisierungsworkshop

Dr. Annett Pollex

Homogenisierungsworkshop

BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE | Energetische Biomassenutzung

Fragen zur Diskussion (II)

Haben Sie schon interne Handlungsanweisungen zur Homogenisierung entwickelt? In welcher Form sollte ein allgemein zugängliche Handlungsempfehlung erstellt werden?

- DBFZ:
  - für Strohpellets >1-2 t,
  - für Holzpellets,
  - für Holzhackschnitzel (ca. 200 kg),
  - für Analyseproben

Homogenisierungsworkshop

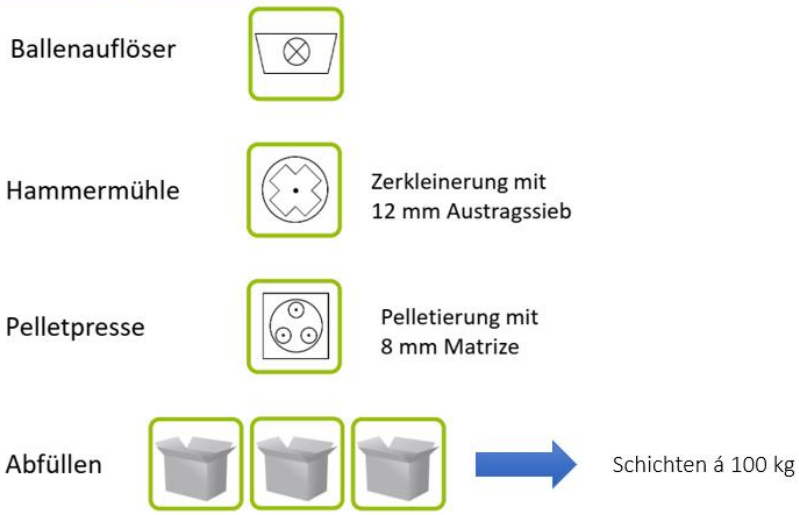
BIOENERGIE FORSCHUNGSNETZWERKE ENERGIE | Energetische Biomassenutzung

Fragen zur Diskussion (II)

Haben Sie schon interne Handlungsanweisungen zur Homogenisierung entwickelt? In welcher Form sollte ein allgemein zugängliche Handlungsempfehlung erstellt werden?

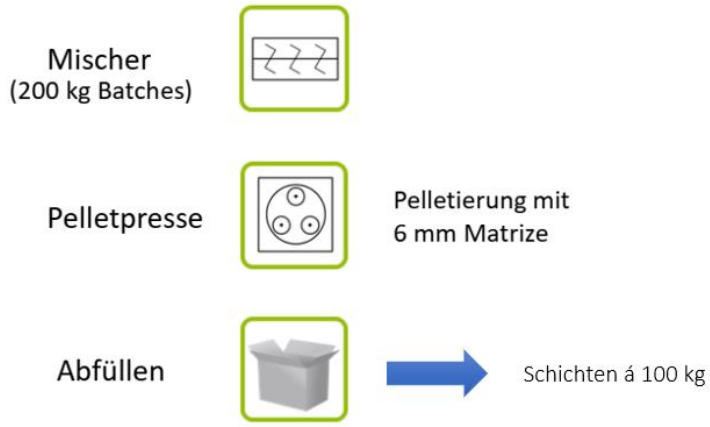
- Teilnehmer:
  - Beispiel

1. Schritt Großchargenpelletierung



11

2. Schritt Großchargenpelletierung



12

Homogenisierung von Kleinchargen <100 kg

Chargengröße <20 kg

- Homogenisierung mittels Riffelteiler
- Mindestens drei Durchläufe

Chargengröße ~20 kg

- Homogenisierung mittels Paddelmischer
- Mischzeit rund 10 min

Chargengröße >20 kg

- Manuelles Homogenisieren auf Plane
- Dreimaliges Teilen und Umschaufeln

13

Schlussbemerkung

Homogenisierung ist aufwendig und mit Kosten verbunden.

Aber nur bei Verwendung homogener Versuchschargen können unsere Versuche zum Verbrennungsverhalten sinnvoll ausgewertet werden.

14