Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

stROhgas: Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von asche- und chlorhaltiger Biomasse am Beispiel Stroh

Schlussbericht

Pollex, Annett

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133

www.dbfz.de
info@dbfz.de

Datum: 11.07.2019

Auftraggeber oder Zuwendungsgeber (bei Forschungsförderung)	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH Geschäftsbereich Umwelt Zimmerstraße 26 – 27 10969 Berlin
Ansprechpartner:	DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Torgauer Straße 116 04347 Leipzig Tel.: +49 (0)341 2434-112 Fax: +49 (0)341 2434-133 E-Mail: info@dbfz.de Internet: www.dbfz.de **Dr. Annett Pollex** Tel.: +49 (0)341 2434-484 E-Mail: annett.pollex@dbfz.de
Erstelldatum:	11.07.2019
Projektnummer DBFZ:	3130021
Projektnummer Auftraggeber oder Zuwendungsgeber:	03KB085B
Gesamtseitenzahl + Anlagen	43 + 18

i.A. Annett Pollex

Inhaltsverzeichnis

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

1 Kurzfassung **5**

1.1 Aufgabenstellung 5

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 5

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 6

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 6

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8

2 Eingehende Darstellung **9**

2.1 Ergebnisdarstellung bis zur Neukonzeptionierung 9

2.2 Ergebnisdarstellung nach der Neukonzeptionierung 16

2.2.1 Arbeitspaket 1 Brennstoffaufbereitung und Analytik 16

2.2.2 Arbeitspaket 2 Untersuchung zur Verbrennung mit Vorvergaser 24

2.2.3 Arbeitspaket 3 Untersuchungen zur Vergasung am Kleinvergaser des DBFZ 26

2.2.4 Arbeitspaket 4 Untersuchungen zur Vergasung an der Versuchsanlage von Entrade 27

2.2.5 Arbeitspaket 5 Konzeptentwicklung 27

2.3 Meilensteine und Maßnahmen 27

2.4 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 32

2.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 32

2.6 Verwertbarkeit der Ergebnisse 33

2.7 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens von anderen Stellen 33

2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 34

Abbildungsverzeichnis **35**

Tabellenverzeichnis **36**

Literatur- und Referenzverzeichnis **37**

Anhang 42

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
BAFS	Bottom Ash Fraction that forms Slag
CEN/TS	European Committee for Standardization/Technical Specification
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EN	Europäische Norm
FKZ	Förderkennzeichen
IDT	Inititial defludization temperature
ISO	Internationale Organisation für Normung
PtJ	Projektträger Jülich
SFS	Sucseptibility to form slag
SST	Start Shrinking Temperatur (Schrumpfungstemperatur)
SUB	Service- und Begleitvorhaben zum Förderprogramm Energetische Biomassenutzung
SWRO	Stadtwerke Rosenheim
TEC	Thermodynamic Equilibrium Calculation
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung

1 Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung

Mit dem Projekt sollte ursprünglich die Verfahrens- und Anlagentechnik zur Vergasung von Stroh auf Grundlage des zweistufigen Vergasungskonzepts (Pyrolyse-/Wirbelbett-Vergaser) der Stadtwerke Rosenheim (SWRO) in einer Anlage mit ca. 50 kW Brennstoffwärmeleistung entwickelt werden. Dabei sollten Strohpellets als alternative und leicht handhabbare Brennstoffe für die Energieerzeugung erschlossen werden. Durch die Änderung des Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG), insbesondere des Wegfalls der Einsatzstoffklassen, mussten die Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG (SWRO) aus dem Projekt „stROhgas“ aussteigen. Es erfolgte eine stärkere Fokussierung auf die Umsetzung der Strohvergasung in Kleinanlagen unter Einbeziehung des neuen Projektpartners Entrade Energiesysteme AG. Damit sollten die Voraussetzungen geschaffen werden, um den Wandel im Energiesystem hin zu kleinen flexiblen Wärme-Kraft-Kopplungs-Systemen (WKK) auf eine möglichst breite Brennstoffbasis zu stellen.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das DBFZ arbeitete in diesem Projekt zunächst mit den Stadtwerken Rosenheim zusammen. Dabei zeichnen sich die Stadtwerke Rosenheim durch ein beständiges Interesse an der Weiterentwicklung der Biomassevergasungstechnologie und hohe Innovationskraft in diesem Bereich aus. Durch die Stadtwerke Rosenheim wurde eine eigene 50-kW-Holzvergasungsanlage entwickelt, die im Rahmen des Projektes am Beispiel Stroh für weitere biogene Reststoffe weiterentwickelt werden sollte. Die Stadtwerke Rosenheim haben sich insbesondere bei der Verbesserung der Produktgasqualität hin zu einer Minimierung des Teergehalts verdient gemacht.

Nach dem Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim aus dem Projektkonsortium erfolgte eine Neuausrichtung des Projektes. Dafür konnte die Firma Entrade gewonnen werden. Bei Entrade handelte es sich um einen international tätigen, innovativen Vergasungsanlagenhersteller im Leistungsbereich bis 100 kW_{el}. Aus Holzpellets und ausgewählten, biogenen Reststoffen kann in einem Hochtemperaturreaktor ein Synthesegas erzeugt werden, das einen Verbrennungsmotor antreibt, um damit Strom und Wärme bereitzustellen. Mit diesen vollautomatischen, seriengefertigten Anlagen, die in sehr kleinen Leistungsgrößen von 50 kW_{el} (E4) und 25 kW_{el} (E3) zur netzgebundenen und netzunabhängigen Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden können, gelang ein schneller und breiter Markteintritt der international große Anerkennung fand. Ende 2018 musste Entrade jedoch Insolvenz anmelden.

Neben den personellen Kompetenzen stehen am DBFZ gut ausgebaute Labor- und Technikumskapazitäten zur Charakterisierung und Aufbereitung von biogenen Festbrennstoffen zur Verfügung. 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 zur Zusammensetzung solcher Brennstoffe. Aufbauend auf einer großen Expertise im Bereich der Biomasseverbrennung werden in den letzten Jahren sowohl die technischen Möglichkeiten als auch die praktische Erfahrung im Bereich die Biomassevergasung systematisch ausgebaut.

Zu den Stadtwerken Rosenheim bestand durch die gemeinsame Arbeit im Projekt *Bundesmessprogramm* (FKZ 03KB017) ein intensives, vertrauensvolles Verhältnis und eine gute, produktive Zusammenarbeit. Mit den Kollegen des Vergasungsanlagenherstellers Entrade (vor der Übernahme durch Entrade: Agnion Highterm Research) hat das DBFZ schon im Projekt IbeKET (FKZ: 03KB088) im Rahmen des Förderprogramms erfolgreich zusammengearbeitet.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens unterlag zunächst den Stadtwerken Rosenheim und wurde in einem Arbeits- und Zeitplan festgehalten. Mit dem Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim aus dem Projektkonsortium ging die Projektleitung an das DBFZ über. Im Rahmen des Projektes fanden nach Übernahme der Projektleitung durch das DBFZ drei Projekttreffen statt, in denen der aktuelle Stand der Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse vorgestellt und diskutiert wurden. Des Weiteren wurde während dieser Treffen das weitere Vorgehen beschlossen. Das Vorgehen und die Projektzwischenergebnisse wurden darüber hinaus auch bilateral telefonisch besprochen und diskutiert.

Ursprünglich war eine Laufzeit von 31 Monaten und der Abschluss der Projektarbeiten im März 2016 vorgesehen. Der Projektausstieg der Stadtwerke Rosenheim zum Februar 2015 machte eine Neuausrichtung erforderlich. Für die Weiterführung mit überarbeiteter Zielrichtung konnte die Fa. Entrade Energiesysteme AG gewonnen werden. Auf der Basis der Neukonzeptionierung konnte das Projekt stROhgas weitergeführt werden. Das Projektende verschob sich durch die Neukonzeptionierung auf April 2018. Allerdings kam es aus verschiedenen technischen Gründen zu erheblichen Verzögerungen in der Projektbearbeitung. Unvorhergesehene, zeitaufwändige Zusatzaufgaben führten dazu, dass Teilaufgaben nicht wie geplant durchgeführt werden konnten. Die Projektlaufzeit wurde um insgesamt acht Monate bis zum 31.12.2018 verlängert. Aufgrund der Insolvenz von Entrade wurden ab Ende Oktober 2018 alle Arbeiten am Projekt eingestellt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ausgangspunkt für die Arbeiten im Projekt war der bei den Stadtwerken Rosenheim installierte Pyrolyse- / Wirbelbett-Vergaser mit einer Brennstoffwärmeleistung von 50 kW, der so optimiert werden sollte, dass eine Vergasung von Strohpellets möglich wird. Zu lösen war dabei der Zielkonflikt, dass hohe Gasqualitäten mit teerfreiem Gas hohe Vergasungstemperaturen erfordern. Im Gegensatz dazu setzt die Vermeidung der Ascheverschlackung jedoch möglichst niedrige Temperaturen voraus. Dies sollte durch konstruktive, verfahrenstechnische Maßnahmen am Vergaser inklusive geeigneter Beschichtungen zur Minimierung der Korrosionsprozesse sowie durch Optimierung des Ascheschmelzpunktes durch Beimischung von Additiven erreicht werden. Dabei sollten die von Sommersacher beschriebenen Indizes zur Beurteilung des Verschlackungsrisikos [1] den Ausgangspunkt zur Bewertung der Brennstoffe und zur Entwicklung eines Berechnungstools bilden.

Um den Stand von Wissenschaft und Technik auf den vom Vorhaben berührten Arbeitsgebieten zu ermitteln, sowie eine Abgrenzung zu anderen Förderprojekten sicherzustellen, wurde in folgenden Portalen bezüglich der Projektidee recherchiert.

- Förderkatalog der Bundesregierung, herausgegeben vom Bundesministerium für Bildung und Forschung http://foerderportal.bund.de
- Projektdatenbank der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) http://www.nachwachsenderohstoffe.de/projekte-foerderung/
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) http://www.energetische-biomassenutzung.de/de/vorhaben/liste-aller-vorhaben.html
- Deutsches Patent- und Markenamt www.dpma.de
- Technologie- und Förderzentrum Bayern (TFZ) www.tfz.bayern.de

Es wurden 18 Projekte identifiziert, die eine thematische Ähnlichkeit (Verfahrensoptimierung Vergasung, Verwendung von Stroh) aufwiesen. Allerdings wurde in keinem dieser Projekte die Vergasung von Stroh in einer Wirbelschichtvergasung genauer untersucht und technisch hinsichtlich Aschetransport, Umgang mit Verschlackung und Korrosion sowie Additiveinsatz bei der Vergasung optimiert.

Der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Pelletierung und der Ascheverschlackung wurde im Projektvorfeld und im Rahmen des Projektes durch Recherchen in den folgenden Wissenschaftsportalen abgeglichen:

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

Stroh wurde bisher hauptsächlich in der Verbrennung [2–8] und in geringerem Umfang auch in der Vergasung [9, 10] eingesetzt. Die kritische elementare Zusammensetzung von Stroh und das daraus resultierende Verschlackungsrisiko kann dabei zu Problemen bei der Nutzung dieses Brennstoffes führen. Für Stroh liegen die Ascheerweichungstemperaturen (DT: deformation temperature) üblicherweise im Bereich 700 bis 990 °C [11]. Bei der Rostfeuerung führen diese niedrigen Ascheerweichungstemperaturen im Zusammenspiel mit im Vergleich mit Holz generell deutlich höheren Aschegehalten, zu Verschlackungen im Feuerraum und Problemen beim Ascheaustrag [8]. Bei der Wirbelschichtfeuerung bzw. Vergasung kann es durch die niedrigen Ascheerweichungstemperaturen zur Agglomeration der Bettpartikel und schließlich zum Zusammenbruch des Wirbelbetts kommen [2–4, 6, 7, 9]. Zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens wurden umfangreiche Studien durchgeführt und eine Vielzahl von Additiven getestet [12, 13] an die in diesem Projekt angeknüpft wird.

Durch den Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim mussten die inhaltlichen Schwerpunkte neu gesetzt werden. Ein stärkerer Fokus lag dann auf verschiedenen Aufbereitungsvarianten von Stroh (Pelletierung mit und ohne mineralische Additive, Torrefizierung, Waschen) zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften, mit dem Ziel, das Vergasungsverhalten zu optimieren und das Verschlackungsrisiko zu senken. Bei der Verwendung torrefizierter Pellets ist vor allem der literaturbekannte höhere Energiegehalt des Produktgases und die Verringerung des Teergehalts von Interesse [14]. Additivierung [12, 13] und Waschen [15] von Stroh sollen dagegen das Ascheverschlackungsrisiko mindern.

Für die Brennstoffaufbereitung sollte auf die Erkenntnisse und Erfahrungen von folgenden Vorgängerprojekten aufgebaut werden:

- Additivierung: Grünlandenergie Havelland (FKZ 03KB035)
- Torrefizierung: SECTOR (7. Europäisches Forschungsrahmenprogramm) und TORBIMA (FKZ: 03KB057)
- Waschen: IbeKET (PtJ, FKZ 03KB088)

Der Einfluss unterschiedlicher Aufbereitungsvarianten auf das Vergasungsverhalten von Biomassebrennstoffen ist unseres Wissens noch nicht systematisch untersucht worden.

Für die praktischen Versuche sollte im Technikumsmaßstab ein Pelletofen der Fa. Pyro-Man zur Verbrennung mit Vorvergasung genutzt werden. Für die Vergasungsversuche wurde im Rahme des Projektes ein Festbettvergaser am DBFZ errichtet. Bei der Fa. Entrade sollten die Versuche an den patentierten Hochtemperatur-Vergasungreaktoren erfolgen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Stadtwerke Rosenheim SWRO

Die SWRO strebt bis zum Jahr 2025 eine bilanziell CO_2-neutrale Energieversorgung in Rosenheim an, wobei durch den Einsatz von hocheffizienten Biomassevergasungsanlagen und Kraft-Wärme-Kopplung bedarfsgerecht Strom und Wärme erzeugt werden soll. Dazu wurde in Rosenheim in der Zeit von 2007 bis 2012 ein eigenes Verfahrenskonzept zur Biomassevergasung entwickelt. Die SWRO ist Mitglied in zahlreichen Fachverbänden und Arbeitskreisen der Kraftwerkstechnik und ist damit hervorragend vernetzt um Problemstellungen und Herausforderungen im Zusammenhang mit der thermochemischen Nutzung von biogen Reststoffen zu diskutieren und Lösungsansätze weitervermitteln zu können.

Entrade

Nach dem Ausstieg der SWRO aus dem Projektkonsortium konnte für die Neuausrichtung des Projektes hin zu Kleinanlagen und dezentralen Mikro-WKK-Anwendungen die Firma Entrade gewonnen werden. Deren vollautomatische Biomassevergasungsanlagen in der Leistungsklasse <100 kW_{el} müssen für die geplanten Einsatzfelder auch eine große Flexibilität hinsichtlich der Brennstoffzusammensetzung aufweisen. Daher bringt Entrade wichtige Expertise zu möglichen Herausforderungen bei der Nutzung von Brennstoffen mit kritischer Zusammensetzung mit.

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Mit dem IKTS arbeitet das DBFZ im Projekt STEP (PtJ, FKZ 03KB116) im Rahmen des Förderprogramms zusammen. In diesem Projekt sollen u.a. die Zusammensetzung von Gärresten der Biogaserzeugung aus Stroh und Geflügel durch geeignete Waschprozesse so verbessert werden, dass die Gärreste für die möglichst störungsfreie Verbrennung geeignet sind. Auf den Erfahrungen aus diesem Projekt konnte bei der Planung und Realisierung der Waschprozesse zur Herstellung gewaschener Strohpellets aufgebaut werden.

UGT 2000 GmbH Umwelt- und Gebäudetechnik und LMEngineering GmbH

Die Firma UGT hat in dem AiF-Projekt AgraSil (AiF, FKZ 2028019ST4) erfolgreich verschiedene halmgutartige Biomassen unter verschiedenen Bedingungen gewaschen und wurde für das Waschen der Großcharge in das Projekt eingebunden. Die Trocknung dieser Großcharge erfolgte bei LMEngineering.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisdarstellung bis zur Neukonzeptionierung

Bis zum Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim aus dem Projektkonsortium war das DBFZ nur in das Arbeitspaket 3 *Brennstoffbereitstellung* involviert. Die dabei erfolgten Arbeiten wurden zum Teil nach der Neukonzeptionierung fortgeführt. Die wesentlichen Arbeiten bzw. Ergebnisse für dieses Arbeitspaket sind im Folgenden dargestellt.

Rohmaterialbeschaffung und Beprobung

Für die Versuche bei den Stadtwerken Rosenheim wurde eine geeignete Strohcharge im Umfang von rund 30 t beschafft (DBFZ Chargennummer 1600) und zu einem Lohnpelletierer (ABW Bioenergie Apolda) transportiert. Eine weitere Charge Weizenstroh im Umfang von 110 t wurde beim Strohhandel SchköLand GmbH für die Vergasungsversuche bei den SWRO reserviert. Für die repräsentative Beprobung einer so großen Charge ist das am DBFZ verfügbare Probenahmewerkzeug (Ballenbohrer, siehe Abbildung 1) nur bedingt geeignet. Die Beprobung erfolgte daher händisch nach Ballenauflösung ausgewählter Ballen.

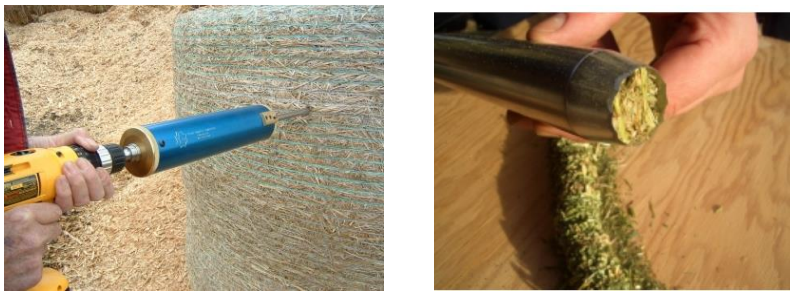

Abbildung 1: Ballenbohrer zur Entnahme von Teilmengen aus einem Strohballen[1]

Analyse

Die beim Lohnpelletierer hergestellten Strohpellets (Charge 1600) wurden am DBFZ entsprechend der Norm für biogene Festbrennstoffe ISO 17225-1 analysiert [16] und mit den Analyseergebnissen einer weiteren am DBFZ verfügbaren Strohcharge (DBFZ Chargennummer 1034) aus einem anderen Projekt verglichen (Tabelle 1). Beide Chargen repräsentieren handelsübliche Strohsortimente aus dem mitteldeutschen Raum. Die im Projekt beschaffte Charge 1600 eignet sich aufgrund der etwas schlechteren Eigenschaften gut als Ausgangsmaterial für die geplanten Versuche, da die vorgesehenen Optimie-

[1] http://www.starqualitysamplers.com/forage.php

rungen des Vergaserbetriebs an einem möglichst kritischen Brennstoff durchgeführt werden sollten. Dies verdeutlichen auch die nach Sommersacher et al. [1] berechneten Verschlackungsindizes, die auf ein höheres Verschlackungsrisiko hindeuten.

Tabelle 1: Analyse der beschafften Strohcharge (1600) im Vergleich zu einer weiteren am DBFZ verfügbaren Charge

Bezeichnung		WW-Strohpellet	WW-Strohpellet
Chargen-/Labornummer		1600 / BR-2014-0552	1034 / BR-2014-0473
Aschegehalt	Ma.-$\%_{TS}$	9,78	7,14
flüchtige Substanzen	Ma.-$\%_{TS}$	72,1	73,7
Wassergehalt	Ma.-$\%_{OS}$	8,72	11,5
Elementaranalyse			
Kohlenstoff	Ma.-$\%_{TS}$	43,3	45,2
Schwefel	Ma.-$\%_{TS}$	0,104	0,063
Stickstoff	Ma.-$\%_{TS}$	1,02	0,78
Wasserstoff	Ma.-$\%_{TS}$	5,43	5,64
Gesamtgehalt			
Brom	Ma.-$\%_{TS}$	0,005	n.n.
Chlor	Ma.-$\%_{TS}$	0,087	0,209
Schwefel	Ma.-$\%_{TS}$	0,119	0,074
Haupt- und Nebenbestandteile			
Aluminium	mg/kg_{TS}	1740	68,1
Blei	mg/kg_{TS}	4,55	3,59
Cadmium	mg/kg_{TS}	0,217	0,108
Calcium	mg/kg_{TS}	6250	4880
Chrom	mg/kg_{TS}	8,45	2,18
Eisen	mg/kg_{TS}	1240	101
Kalium	mg/kg_{TS}	17600	15100
Kupfer	mg/kg_{TS}	5,52	2,39
Magnesium	mg/kg_{TS}	1540	801
Mangan	mg/kg_{TS}	66,6	79,9
Natrium	mg/kg_{TS}	250	384
Nickel	mg/kg_{TS}	2,67	1,12
Phosphor	mg/kg_{TS}	1310	501
Schwefel	mg/kg_{TS}	1460	947
Silicum	mg/kg_{TS}	29300	22100
Titan	mg/kg_{TS}	143	7,5
Zink	mg/kg_{TS}	14,5	13,3
Heizwert			
Brennwert	kJ/kg_{TS}	17330	18180
unterer Heizwert	kJ/kg_{TS}	16170	16980
Hydridbildner			
Arsen	mg/kg_{TS}	0,222	n.n.

Quecksilber	mg/kg_{TS}	n.n.	n.n.
Verschlackungsindizes			
Si/(Ca+Mg)	mol/mol	4,76	3,65
(Si+P+K)/(Ca+Mg)	mol/mol	7,00	6,23

n.n. = nicht nachweisbar; WW = Winterweizen; TS = Trockensubstanz

Additive

Zur Eingrenzung und als Basis für die Auswahl der im Projekt einzusetzenden Additive wurde eine ausführliche Recherche durchgeführt. Additive die beim Einsatz von Biomassen mit kritischen Ascheerweichungsverhalten verwendet wurden sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Verwendete Additive zur Verringerung der Verschlackungsneigung

	Additiv	Formel	Untersuchte Biomassen
1	Klärschlamm	Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, CaO, Fe_2O_3	Weizenstroh, Holzabfall
2	Tonschlamm	SiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO	Weizenstroh, Holzabfall
3	Marmorschlamm	CaO	Weizenstroh, Holzabfall
4	Kaolin, Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, $Al_2Si_2O_5(OH)_4(H_2O)_2$	Maisstroh, Körner, Gerstenstroh, Rinde, Olivenkerne, Rapspresskuchen, Olivenschnitt, Zellstoffreste aus der Papierherstellung, Spelzen
5	Dolomit	$CaMg(CO_3)_2$, $CaCO_3$	Rapsstroh, Gerstenstroh, Distel, Äthiopischer Senf, Mandelschalen, Olivenpresskuchen
6	Zeolite 24A	$(Na_2O)(Al_2O_3)(SiO_2)_2 \cdot 2H_2O$	Weizenstroh, Gerstenstroh, Gerstenspelzen
7	Zeolite Y	12 $(SiO_2)\cdot(Al_2O_3)$	Weizenstroh, Gerstenstroh, Gerstenspelzen
8	Torf	Verschieden (Alumo)silikate	Waldrestholz, Weizenstroh, Weide
9	Magnesiumoxid	MgO	Weizenstroh, Maiskörner, Sonnenblumenpresskuchen
10	Calciumhydroxid	$Ca(OH)_2$	Zellstoffreste aus der Papierherstellung, Weizenstroh, Gerstenstroh
11	Kalkstein, Calcite, Kreide	$CaCO_3$	Maisstroh, Zellstoffreste aus der Papierherstellung, Körner, Spelzen, Gerstenstroh, Distel, Äthiopischer Senf, Mandelschalen, Olivenpresskuchen
12	Tonerde	Al_2O_3	Distel, Äthiopischer Senf, Mandelschalen, Olivenpresskuchen
13	Ophite	$(Ca,Na)_2(Mg,Fe,Al)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2$	Distel, Äthiopischer Senf, Mandelschalen, Olivenpresskuchen
14	Calcinated Dolomite	$CaMgO_2$	Distel, Äthiopischer Senf, Mandelschalen, Olivenpresskuchen

	Additiv	Formel	Untersuchte Biomassen
15	Wheat destillers dried grain with soluables		Weizenstroh, Waldrestholz,
16	Phosphorsäure	H_3PO_4	Weizenstroh, Waldrestholz
17	Rinde		Rapspresskuchen
18	Chlinochlore	$(Mg,Al,Fe)_6[(Si,Al)_4O_{10}](OH)_8$	Olivenkerne, Olivenschnitt
19	Ankerite	$Ca(Mg,Fe,Mn)(CO_3)_2$	Olivenkerne, Olivenschnitt
20	Kohle mit hohem Alumosilikatanteil		Knochenmehl
21	Additive auf Magnesiumbasis		Zellstoffreste aus der Papierherstellung
22	Natriumhydrogen-carbonat	$NaHCO_3$	Körner, Spelzen
23	Kalk	CaO	Distel, Äthiopischer Senf, Mandelschalen, Olivenpresskuchen

Mit einigen dieser Additive konnte das Verschlackungsverhalten bei der Verbrennung bzw. Vergasung von Getreidestroh deutlich verbessert werden. Im Anhang A1 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Auf Basis der Literaturrecherche wurden alle die Additive in Betracht gezogen, bei denen die Ascheerweichungstemperatur bzw. der Druckabfall der Wirbelschicht (IDT = initial defluidization temperature) durch die Additivzugabe auf über 1000 °C erhöht werden konnte.

Als eines der wirksamsten Additive zur Reduzierung aschebedingter Prozessprobleme bei der Biomasse-Verbrennung oder -Vergasung stellte sich das Tonmineral Kaolin heraus. Es ist ein effektiver Zusatzstoff für die Weizenstrohverbrennung, da es die Bildung von Ablagerungen im Reaktorraum verringert. [6] Außerdem kann es zur Minderung von Feinstaubemissionen und zur Reduktion des Hochtemperatur-Korrosions-Risikos eingesetzt werden. [17, 18] Hauptbestandteil von Kaolin ist das Mineral Kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), aus dem sich ab etwa 500 °C durch Wasser-Freisetzung das amorphe meta-Kaolinit ($Al_2O_3*2SiO_2$) bildet. [19–21] Kalium-Spezies können an die Oberfläche des meta-Kaolinits adsorbieren und zu Kalium-Aluminium-Silikaten hoher Schmelzpunkte reagieren. Dabei entstehen unter anderem die beiden kristallinen Hauptprodukte Kalsilit ($KAlSiO_4$) und Leucit ($KAlSi_2O_6$) mit Schmelzpunkten von ca. 1600 °C bzw. 1500 °C. [19, 22, 23] Im Vergleich dazu liegt der Schmelzpunkt von Kaliumchlorid, das in Weizenstrohasche zu einem hohen Anteil vorliegt, bei 776 °C. [23] Die Bildung der beiden K-Al-Silikate Kalsilit und Leucit kann durch folgende Gesamt-Reaktionsgleichungen beschrieben werden (Gleichungen 1 und 2): [24]

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2\ KCl \rightarrow 2\ KAlSiO_4 + H_2O + 2\ HCl \qquad \text{Gl. 1}$$

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2\ KCl + 2\ SiO_2 \rightarrow 2\ KAlSi_2O_6 + H_2O + 2\ HCl \qquad \text{Gl. 2}$$

Das Binden von Kalium in dieser Form verhindert die Bildung niedrig schmelzender Silikate und führt dadurch zu einem deutlichen Anstieg der Ascheschmelztemperatur. Dieser kann für Weizenstrohasche einige hundert Grad betragen. Damit wird auch bei hohen Temperaturen ein Sintern der entstehenden Asche vermieden. [21, 24, 25] Bei der Bestimmung charakteristischer Ascheschmelztemperaturen von Weizenstrohasche konnte ein Anstieg der IDT von 780 °C auf 1330 °C beim Zusatz von 4% Kaolin bezo-

gen auf die eingesetzte Brennstoffmasse erzielt werden. [26] Kaolin ist nicht nur bei der Verbrennung sondern auch bei der Biomassevergasung ein effektives Additiv. [27] Es kann Kalium sowohl unter oxidierenden als auch unter reduzierenden Bedingungen aus der Gasphase entfernen und thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen (TECs = thermodynamic equilibrium calculations) sagen vorher, dass die gebildeten K-Al-Silikate in beiden Atmosphären stabil sind. [20, 26]

Neben Kaolin kann auch Calciumcarbonat aschebedingte Probleme bei der thermochemischen Konversion problematischer Biomasse-Rohstoffe effektiv minimieren. Besonders bei Phosphor-haltigen Biomassen kann das Ascheschmelzverhalten deutlich verbessert werden, indem Ca-K-Phosphate mit hohem Ca/K-Verhältnis gebildet werden, die Schmelztemperaturen über 1100 °C aufweisen und zu geringeren Verschlackungen führen. [27] Auch hier treten als Nebeneffekt der Kalium-Bindung geringere Feinstaubemissionen auf. [18] Als Additiv für Weizenstroh konnte mit Hilfe von 4% $CaCO_3$ bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmasse eine Erhöhung der IDTs der erzeugten Aschen um 250-350 °C erzielt werden. [28] Neben der Bildung von Ca-haltigen Phosphaten können außerdem Ca-K-Silikate hoher Schmelztemperaturen gebildet werden, was unter anderem bei der Vergasung von Weizenstroh zu vermindertem Sintern der gebildeten Asche führte. [29, 30] Die dabei ablaufende Umsetzung wird in Gleichung 3 gezeigt. [31]

$$K_2O{\cdot}SiO_2 + 2\ CaCO_3 \rightarrow 2\ CaO{\cdot}K_2O{\cdot}SiO_2 + 2\ CO_2 \qquad \text{Gl. 3}$$

Ein weiterer Mechanismus, der das Auftreten von Schmelzen bei relativ geringen Temperaturen verhindert, ist der auftretende Verdünnungseffekt. Durch die Zugabe von Calciumcarbonat wird der Kontakt „klebriger“, niedrig schmelzender Partikel, z.B. Alkali-Silikate, miteinander gemindert, wodurch es zu höheren Ascheschmelztemperaturen kommt. [32] Durch Kalzinieren von Kalk, das eine günstige $CaCO_3$-Quelle darstellt, kann dessen Porosität erhöht werden, was die Wirksamkeit gegen das Sintern von Biomasseaschen erhöht. [23]

Für die weiteren Untersuchungen im Projekt wurden Kaolin und Calciumcarbonat ausgewählt. Klärschlamm, welcher unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ebenfalls sehr interessant ist und welches sehr gute Ergebnisse bei der Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur gezeigt hat, wurde nicht berücksichtigt, da keine gleichbleibende Zusammensetzung garantiert werden konnte und die Arbeit mit diesem Material im Technikumsmaßstab zu große hygienische und arbeitschutzrechtliche Herausforderungen mit sich gebracht hätte.

Bilanzierungsmodell

Um ein Berechnungstool zur Abschätzung des Verschlackungsrisikos zu entwickeln, wurden zunächst bekannte Brennstoffindizes herangezogen. Zu Beginn des Projektes waren für Biomassebrennstoffe lediglich das molare Verhältnis Si/(Ca+Mg) und für phosphorreiche Brennstoffe das adaptierte molare Verhältnis (Si+P+K)/(Ca+Mg) bekannt. [1] In beiden Fällen zeigen Werte <1 in der Regel Ascheschmelztemperaturen >1100 °C. Diese Indizes wurden für phosphorreiche Biomassebrennstoffe sowie solche Brennstoffe validiert, die zur Verringerung des Verschlackungsrisikos mit Aluminiumverbindungen additiviert worden waren. Dabei zeigte sich, dass für diese Brennstoffe ein adaptierter Index die besten Vorhersageergebnisse liefert: (Si+P+K)/(Ca+Mg+Al) [26]. Auf der Basis von Untersuchungen in mehreren Projekten, die unter Beteiligung des DBFZ durchgeführt wurden, erfolgte die Validierung und Weiterentwicklung dieser Indizes für halmgutartige Brennstoffe, Mischbrennstoffe und Waldrestholz [33, 34].

Da sich gezeigt hat, dass die Bestimmung der charakteristischen Ascheschmelztemperaturen in einem Ascheschmelzmikroskop nur bedingt geeignet ist, um das Verschlackungsverhalten unter realen Bedingungen abzuschätzen, wurden weitere Parameter wie z.B. die Sinterkategorie oder der durch Siebanalyse bestimmte Schlackeanteil der Rostasche (BAFS = bottom ash fraction that forms slag) entwickelt und vorgeschlagen [35, 36]. Die Auswertung von umfangreichen Versuchen zum Verbrennungs- und Verschlackungsverhalten einer Vielzahl verschiedener Biomassebrennstoffe hat dann gezeigt, dass ein kombinierter Parameter, der sogenannte SFS (SFS = susceptibility to form slag), welcher neben dem Aschegehalt auch die Sinterkategorie und BAFS > 16 mm berücksichtigt, sehr gut geeignet ist, um das Verschlackungsverhalten zu beschreiben [34]. Mithilfe der Bestimmung des Ascheschmelzverhalten nach DIN CEN/TS 15370-1 sowie des SFS sollte der angepasste Verschlackungsindex nach Abschluss der Verbrennungs- und Vergasungsversuche im Technikumsmaßstab für die im Projekt hergestellten Strohbrennstoffe validiert werden. Aufgrund des Projektabbruchs konnten diese Arbeiten nicht zu Ende geführt werden.

Pelletierung

Rund 10 t des beschafften Winterweizenstrohs wurden als Referenzcharge durch einen Lohnpelletierer pelletiert. Um den Einfluss der Additive auf das Ascheschmelzverhalten zu untersuchen, wurden Versuchschargen (~20 kg) hergestellt, wobei das Winterweizenstroh mit den Additiven in je zwei unterschiedlichen Mengen (2 und 4 Ma.-%) gemischt und pelletiert wurde.

Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens

Zur Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens bei den in der Wirbelschicht vorherrschenden Temperaturen wurden die additivierten Strohpellets unter Normbedingungen (DIN EN ISO 18122) bei 550 °C kontrolliert verascht. Die dabei gewonnenen Strohaschen wurden dann vier verschiedenen, vergasungstypischen Temperaturen zwischen 700 °C und 1000 °C ausgesetzt. Nach Abkühlen der Proben erfolgte die visuelle und haptische Beurteilung der Proben anhand folgender Skala [37], wobei Einstufungen zwischen den Kategorien zugelassen wurden, sofern eine eindeutige Zuordnung nicht möglich war:

- 1: kein oder nur geringer Einfluss, lediglich leichtes Sintern, brüchig bei leichten Berührungen
- 2: teilweises Sintern, immer noch brüchige, poröse Struktur, noch deutlich erkennbare Körnung der Asche
- 3: Asche ist deutlich versintert, teilweises Schmelzen
- 4: harte, versinterte Struktur, geschmolzene Anteile sind mechanisch nur schwer zu brechen, keine Körnung der Asche mehr erkennbar
- 5: vollständig aufgeschmolzen

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass Kaolin bei gleicher Additivmenge zu einer stärkeren Reduzierung der Verschlackung führt (Abbildung 2).

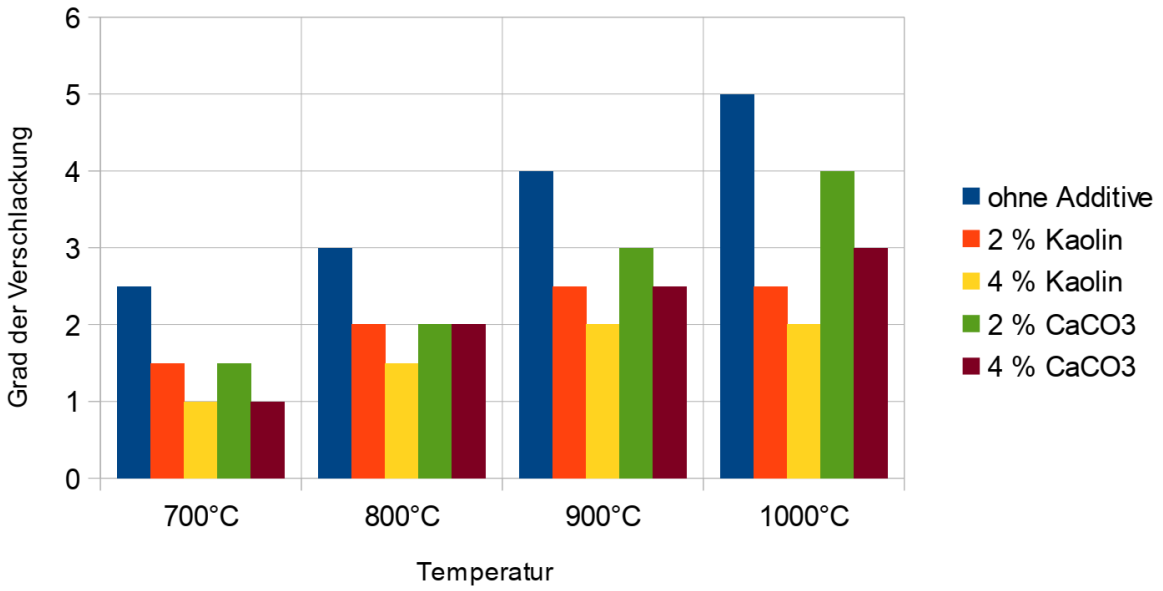

Abbildung 2: Ergebnisse der Ascheschmelzuntersuchungen die mit den Aschen der additivierten Pellets durchgeführt wurden

Anschließend wurden die Versuche mit einem in der Literatur beschriebenen, vereinfachten Verfahren wiederholt (Abbildung 3) [24]. Dabei wird die reine Biomasse ohne Additiv (Abbildung 3, links) nach Norm verascht [16] (Abbildung 3, Mitte) und das Additiv dann vor den Ascheschmelzversuchen zur Asche zugemischt. Die Asche-Additiv-Mischungen werden dann den ausgewählten Temperaturen ausgesetzt.

Abbildung 3: Vereinfachtes Verfahren

Mit Hilfe dieser Vergleichsversuche konnten dann Versuche mit schrittweise reduzierten Mengen an Additiv durchgeführt werden, um die für die gewünschte Vermeidung der Verschlackungsneigung notwendige Mindestmenge an Additiv abzuschätzen. Die Vergleichsversuche zum Ascheschmelzverhalten, die zum einen mit Aschen aus additivierten Strohpellets und zum anderen mit reinen Strohaschen, denen nach der Veraschung äquivalente Additivmengen zugemischt wurden, erbrachten zum Teil erheblich unterschiedliche Resultate. Ausgehend von den Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten kann die Additivmenge für die untersuchte Strohcharge nicht wesentlich unter den Wert von 4 % Kaolin abgesenkt werden. Für $CaCO_3$ wird sogar noch eine größere Menge benötigt, damit die Verschlackung bei 1000 °C sicher vermieden wird.

2.2 Ergebnisdarstellung nach der Neukonzeptionierung

Mit der Neukonzeptionierung des Projektes nach dem Ausstieg der SWRO aus dem Projektkonsortium waren ein Großteil der Arbeitspakete unter Federführung des DBFZ vorgesehen. Die wesentlichen Ergebnisse der erfolgten Arbeiten werden im Folgenden für die einzelnen Arbeitspakete dargestellt.

2.2.1 Arbeitspaket 1 Brennstoffaufbereitung und Analytik

Bestimmung der Brennstoffheterogenität

Durch die Insolvenz des Lohnpelletieres, bei dem die ursprünglich beschaffte Strohcharge eingelagert war, ging diese in die Insolvenzmasse ein. Daher musste für die weiteren Versuche eine alternative Strohcharge verwendet werden. Um den Aufwand und die Kosten so gering wie möglich zu halten, wurde auf die Bestände des DBFZ zurückgegriffen und für alle weiteren Versuche die Strohcharge mit der DBFZ-Chargennummer 1034 verwendet. Für die Auswertung der Vergasungsversuche und die Bewertung der Ergebnisse ist die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Rohmaterials notwendig. Um eine repräsentative Probenahme sicherzustellen, wurde die Heterogenität der Analyseparameter innerhalb der Gesamtcharge 1034 anhand der Analyse von Einzelproben aus der Gesamtmenge bestimmt. Dabei zeigte sich, dass bestimmte Parameter, wie z.B. der Siliziumgehalt, innerhalb einer Charge um bis zu 30% schwanken. Um den Einfluss verschiedener Aufbereitungsoptionen auf das Vergasungsverhalten zu ermitteln, war daher eine Homogenisierung der verwendeten Gesamtcharge vor der Anwendung der Aufbereitungsvarianten zwingend erforderlich.

Homogenisierung im Technikumsmaßstab

Die möglichst vollständige Homogenisierung einer kompletten Versuchscharge Stroh im Umfang von rund einer Tonne im Technikumsmaßstab stellte eine große Herausforderung dar. Da der Verlauf der Homogenisierung durch entsprechende Analysen begleitet und verifiziert werden sollte, musste eine aufwändige Beprobung in jedem der Schritte erfolgen. Es wurden eine große Menge an Teilproben erzeugt, die zum Teil einzeln analysiert und zum Teil zu Mischproben zusammengefasst wurden. Für jede der Teilproben wurden Rückstellproben erzeugt. Auch die Logistik und das Handling der bis zu 24 Teilmengen à etwa 50 kg (Fassungsvermögen des Paddelmischers) war aufwändig und führte im Projektverlauf zu erheblichen Verzögerungen. Das angewandte Verfahren und die erzeugten Proben sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Händische Ballenauflösung zu 24 Teilchargen á ca. 50 kg (Kapazität des Paddelmischers) inklusive Probenahme (26 Teilproben) und Erstellung von Analyseproben (10 Proben)
2. Grobzerkleinerung der 24 Teilchargen mittels Strohhäckse inklusive Probennahme (6 Proben) und Erstellung von Analyseproben (3 Proben)
3. Feinzerkleinerung mittels Hammermühle inklusive Probennahme (6 Proben) und Erstellung von Analyseproben (3 Proben)
4. Erste Homogenisierung der 24 Teilchargen mit Paddelmischer inklusive Probennahme (81 Teilproben) und Erstellung von Analyseproben (28 Proben)
5. Manuelles Verschneiden der Teilchargen
6. Homogenisierung der 20 verschnittenen Chargen mit Paddelmischer inklusive Probennahme (29 Teilproben) und Erstellung von Analyseproben (9 Proben)
7. Konditionierung und Pelletierung im Technikum des DBFZ inklusive Probennahme (10 Teilproben) und Erstellung der Analyseproben (5 Proben)

Die gesamte Homogenisierung wurde analytisch begleitet, um zum einen die erfolgreiche Homogenisierung zu verifizieren und zum anderen um das gewählte Homogenisierungsverfahren wissenschaftlich zu begleiten. Auf diese Weise sollen die gewonnenen Erkenntnisse für zukünftig Brennstoffe anwendbar werden und der Wissenschaftsgemeinschaft zugänglich gemacht werden. Es konnte gezeigt werden, dass die gewünschte Homogenität bezüglich der Eigenschaften und der inhaltsstofflichen Zusammensetzung durch den gewählten Ansatz in der Tat erreicht werden kann, wie in Abbildung 4 exemplarisch am Gehalt der wichtigsten Aschebildner in einer einzelnen Teilmenge veranschaulicht wird.

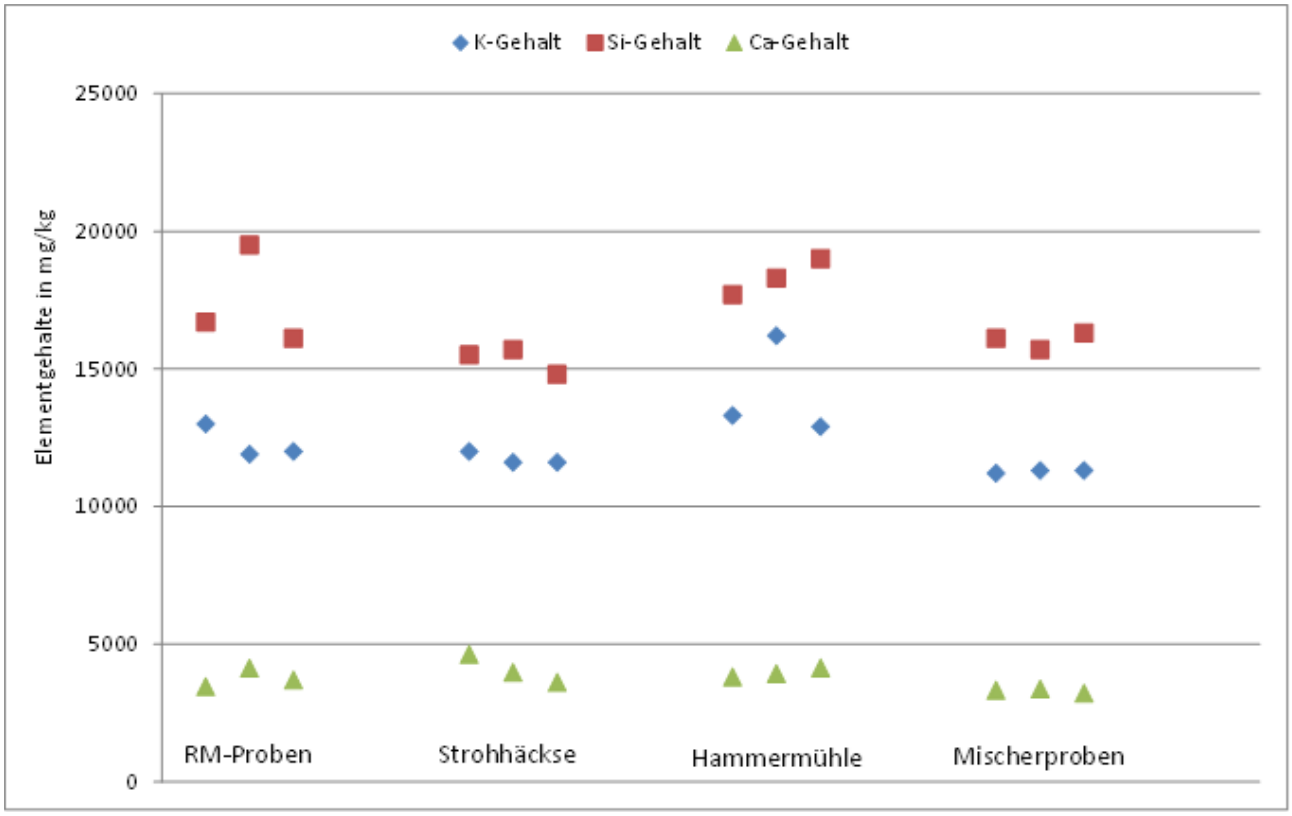

Abbildung 4: Gehalte der wichtigsten Aschebildner in den pro Prozessschritt genommenen drei Einzelproben exemplarisch für eine Teilmenge der Gesamtcharge (RM = Rohmaterial)

Da zwischen Ballenauflösung und Grobzerkleinerung mittels Strohhäcksel keine Homogenisierung erfolgt, ist davon auszugehen, dass die scheinbar höhere Homogenität der Brennstoffzusammensetzung der Proben aus diesem Schritt zufällig ist und nicht die tatsächliche Heterogenität widerspiegelt.

Insgesamt konnte durch den gewählten Ansatz die Heterogenität soweit herabgesetzt werden, dass in den Pellets eine Standardabweichung bezüglich der Gehalte der wichtigsten Aschebildner von kleiner als 10% erreicht wird (Abbildung 5). Bei den Rohmaterialproben dagegen ist noch eine starke Heterogenität erkennbar. Insbesondere bei Silizium und in geringerem Ausmaß auch bei Kalium und Calcium. Deutlich ist auch eine Reduzierung des Siliziumgehaltes zu erkennen. Insgesamt weisen halmgutartige Biomassen zwar von Natur aus einen höheren Siliziumgehalt auf, häufig kommt es aber durch die Ernte und im Rahmen der Ballenpressung zu Verunreinigung durch anhaftende Erde. Durch diese Verunreinigungen kommt es in der Regel zu höheren Gehalten insbesondere von Silizium und Aluminium. Gleichzeitig sind die Erdanhaftungen in der Regel sehr feinkörnig bzw. staubförmig, so dass es durchaus wahrscheinlich ist, dass gerade diese Anteile bei den einzelnen Homogenisierungsschritten, die aufgrund der Staubentwicklung immer mit Absaugung durchgeführt werden, verstärkt ausgetragen werden.

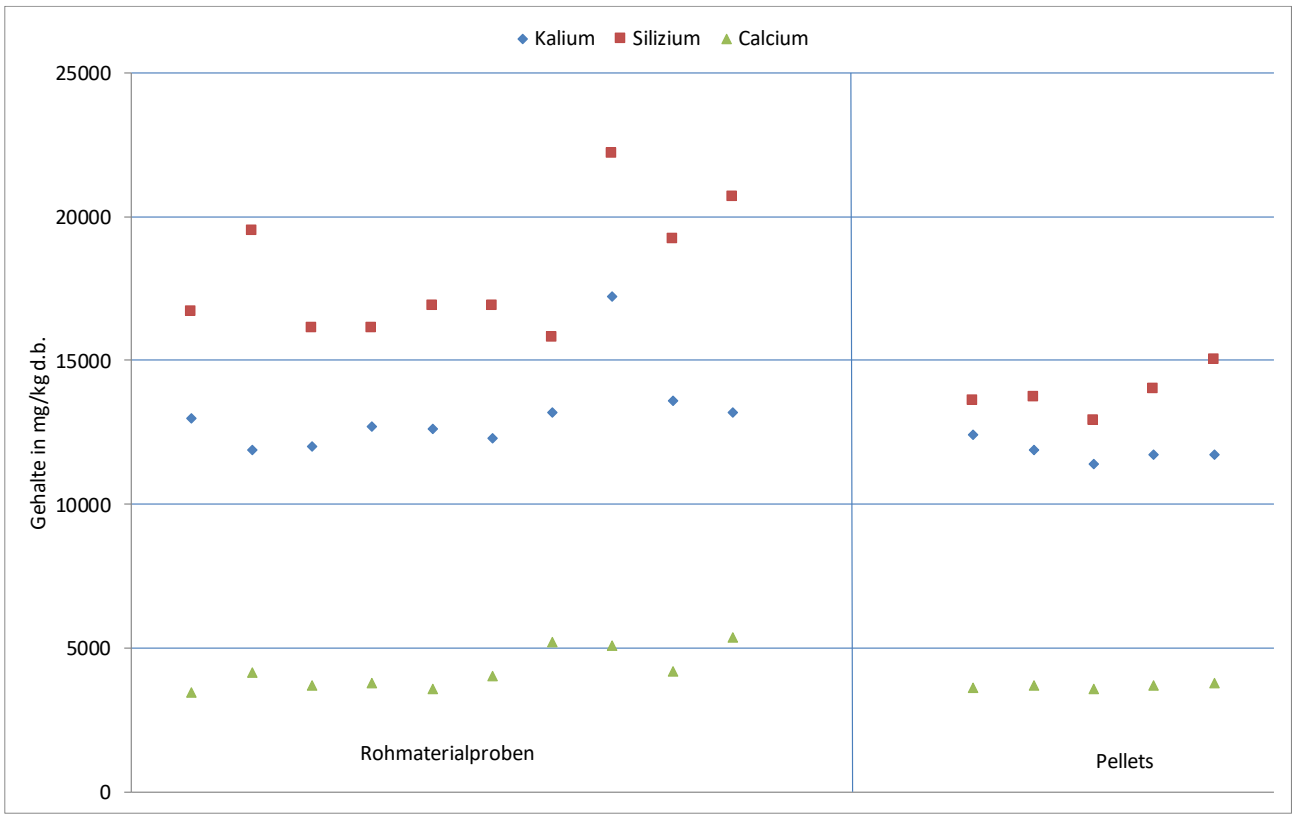

Abbildung 5: Heterogenität der wichtigsten Aschebildner in der verwendeten Strohcharge vor der Homogenisierung und nach der Homogenisierung

Homogenisierung und Pelletierung im industriellen Maßstab

Um die Homogenisierung der Großcharge für die Vergasungsversuche bei Entrade zu realisieren, wurden verschiedene Optionen geprüft und aber nicht angewendet. Die jeweiligen Gründe sind in der Tabelle 3 mit aufgeführt.

Tabelle 3: In Betracht gezogene aber verworfene Homogensierungsoptionen für die Großcharge

Homogenisierungsverfahren	Ausschlusskriterien
Mittels Radlader	Handling des grobzerkleinerten Materials notwendig, durch vergleichsweise geringe Mengen Gefahr der Kontamination mit Fremdstoffen
Mittels Mischerfahrzeug (z.B. Betonmischer)	Kein geeigneter Anbieter verfügbar
Futtermischwagen	Testversuche mit unterschiedlichen Materialien ergaben uneinheitliche Ergebnisse, zum Teil sogar Separierung nach Partikelgröße beim Austrag aus dem Mischer, ggf. aufwändige Vorversuche je Material nötig, um die erforderliche horizontale und vertikale Quervermischung zu gewährleisten

Letztendlich wurde eine Variante realisiert, bei der das Stroh in zwei Stufen bei der im Rahmen der Abfüllung homogenisiert wird. Das Vorgehen ist im Folgenden dargestellt (Abbildung 6).

1. Zunächst Grobpelletierung auf 8 mm (Krix) inklusive Homogenisierung durch schichtweise Abfüllung in verschiedenen BigBags
2. Dann Feinpelletierung auf 6 mm ebenfalls inklusive Homogenisierung durch schichtweise Abfüllung in verschiedene BigBags

Das Stroh wurde zunächst grob auf 12 mm zerkleinert und auf 8 mm lose pelletiert (Krix). Bei der Abpackung erfolgte die erste Homogenisierung, indem die Krix auf 13 BigBags verteilt und diese immer in Schichten á ca. 100 kg befüllt wurden (insgesamt sieben Schichten pro BigBag). Anschließend wurde die eine Hälfte der Charge gewaschen, getrocknet und auf 6 mm pelletiert. Die andere Hälfte wurde direkt auf 6 mm pelletiert. Wieder wurde eine Homogenisierung bei der Abpackung in BigBags durch schichtweise Abfüllung in 100 kg-Schichten realisiert.

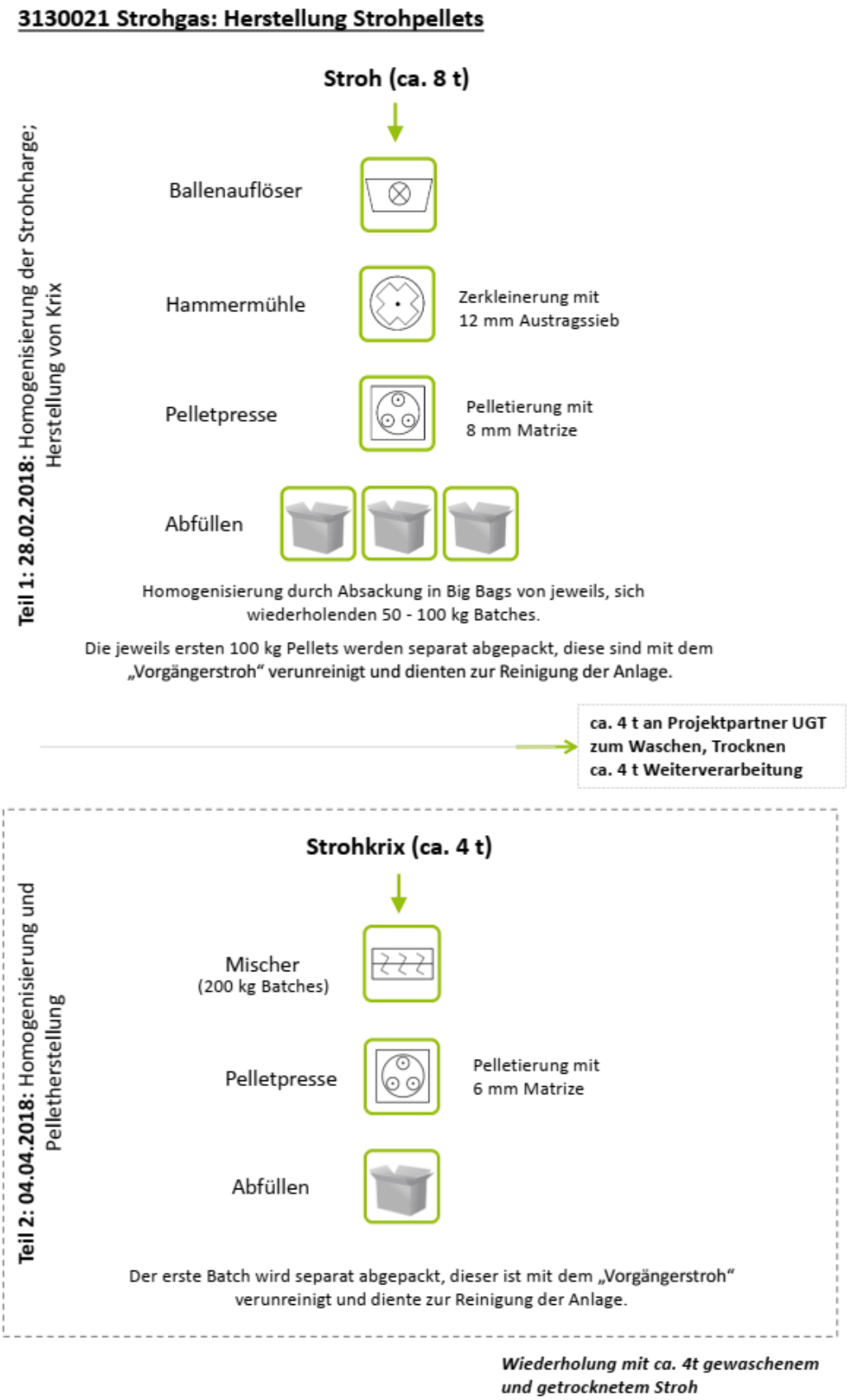

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Homogenisierung der Großcharge

Die Homogenität innerhalb der Chargen wird durch entsprechende Beprobung und Analyse bestätigt (Abbildung 4-6). Auch hier kann man gut die erfolgreiche Homogenisierung durch die zwei Homogenisierungsschritte anhand der Aschegehalte und der wichtigsten Inhaltsstoffe erkennen. Auch hier zeigt sich, dass vor allem bei Silizium trotz der Homogenisierung mit größeren Schwankungen als bei den anderen Inhaltsstoffen zu rechnen ist.

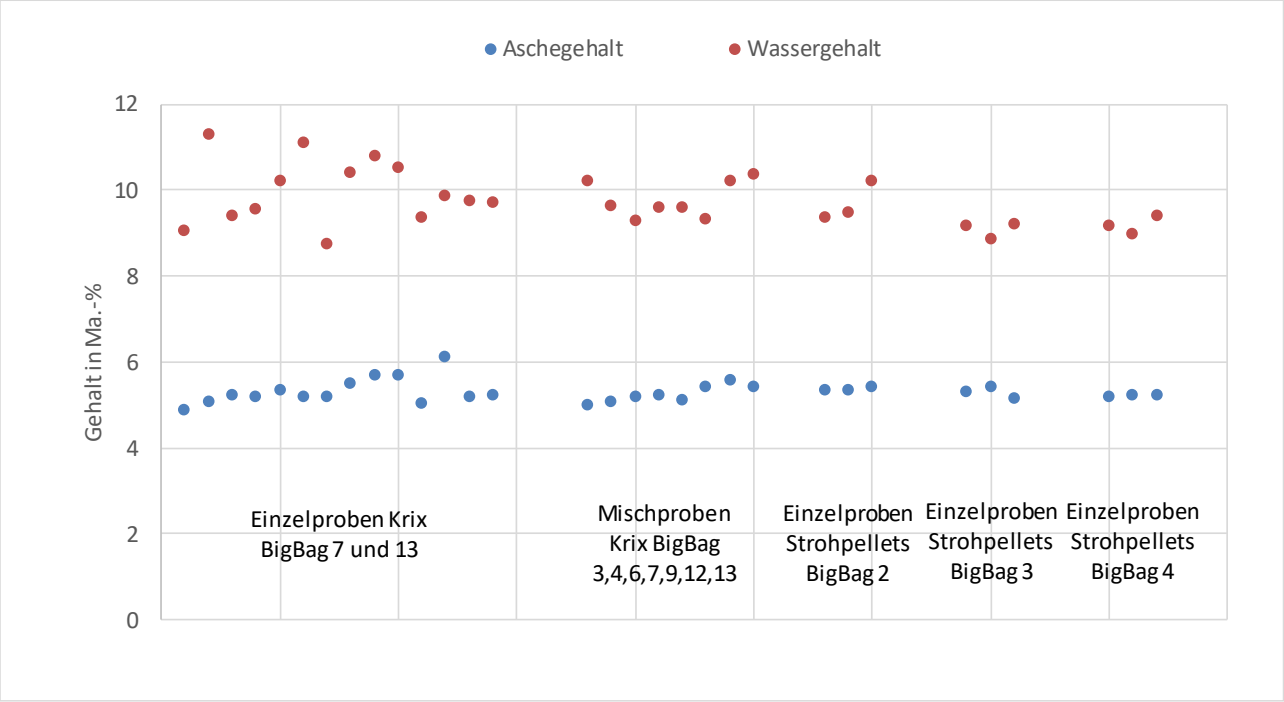

Abbildung 7: Asche- und Wassergehalt der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets)

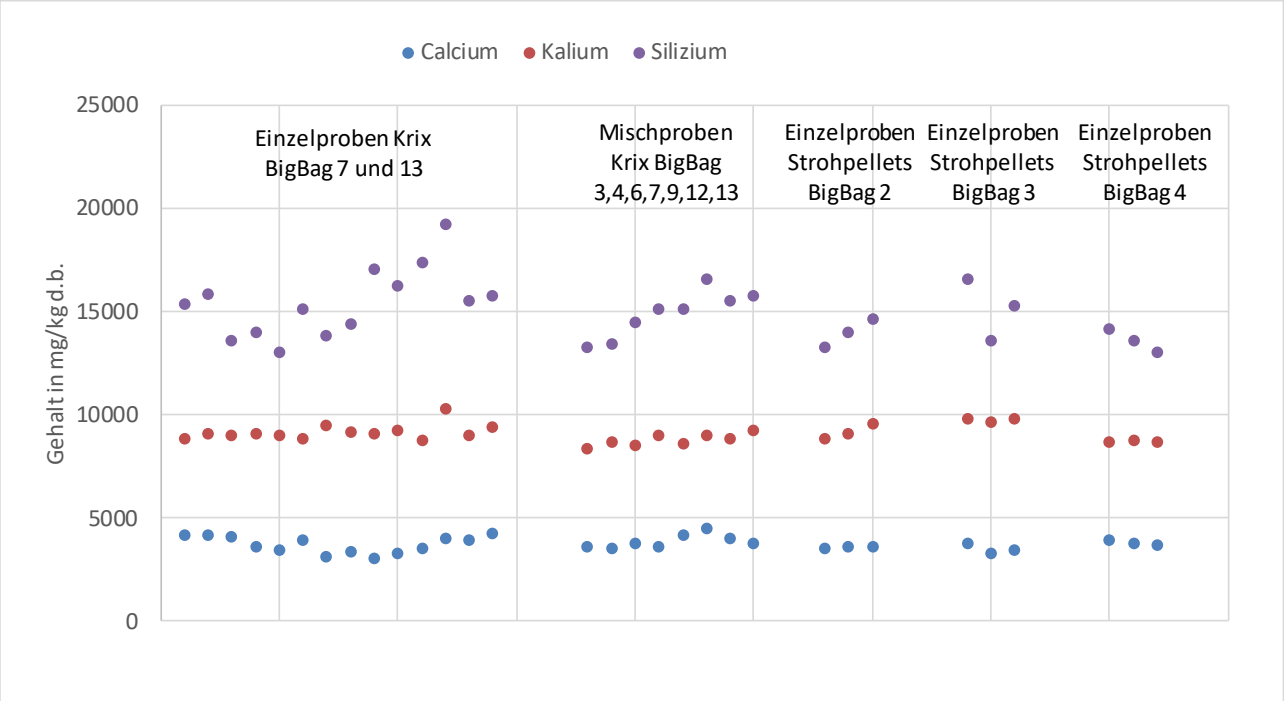

Abbildung 8: Gehalte der Hauptaschebildner Calcium, Kalium und Silizium der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets)

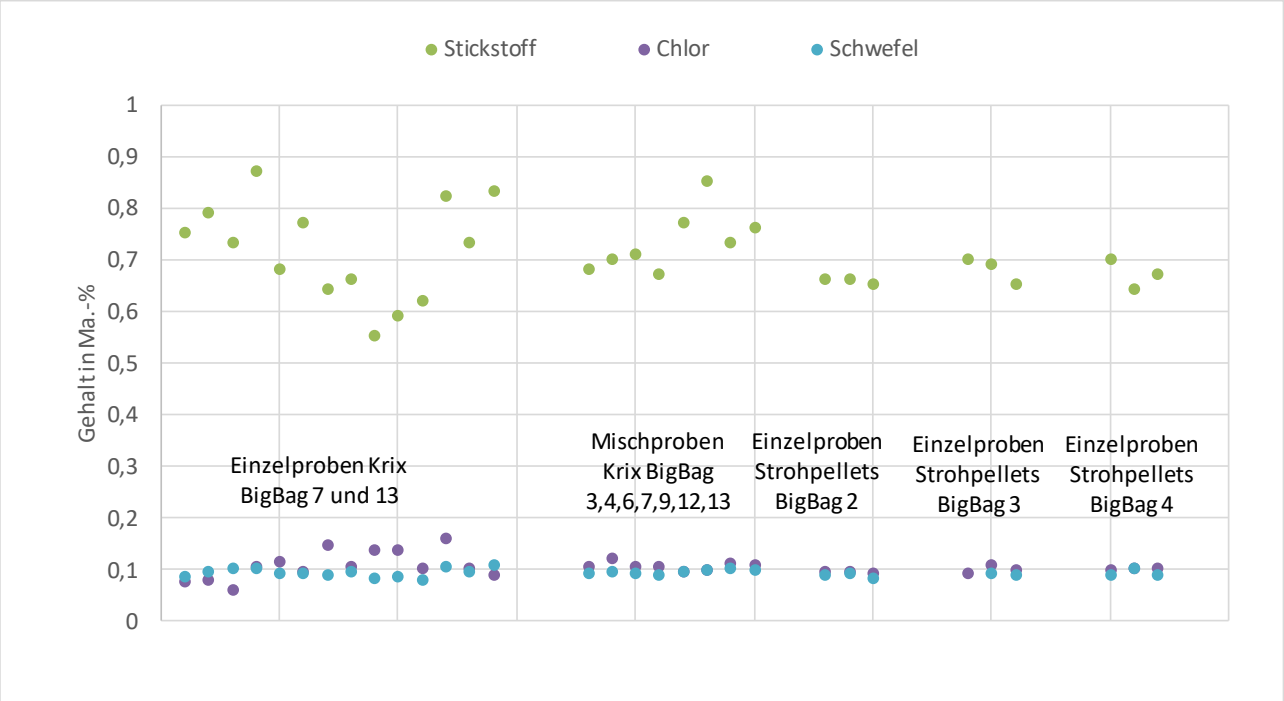

Abbildung 9: Gehalte an Stickstoff, Chlor und Schwefel der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets)

Waschen

Zur Herstellung der gewaschenen Strohpellets sollte das das für Gras und Laub erfolgreiche Wasch-Auspressverfahren (IbeKET, PtJ, FKZ 03KB088A-F) eingesetzt werden. Die Testversuche ergaben jedoch, dass sich das Material selbst nach dem Aufschlämmen mit Wasser aufgrund des zu hohen Trockenmassegehaltes nicht für den Wasch-Press-Prozess eignet, der für feuchte Biomassen wie z. B. Grünschnitt, Gras und Laub entwickelt wurde. Entsprechend musste ein alternatives Verfahren angewendet werden.

Bei der Auswahl des Verfahrens und der anzuwendenden Parameter wurde auf Erfahrungen aus einem anderen Projekt am DBFZ zurückgriffen (Agrasil, AiF, FKZ 2028019ST4), bei dem Reisspelzen und Reisstroh aufbereitet wurden. Dabei wurde eine Teilmenge des zerkleinerten, homogenisierten Materials im Unterauftrag bei 50 °C für 2 h gewaschen, anschließende mit kaltem Wasser gespült und dann getrocknet. Die folgende Tabelle zeigt die Analyseergebnisse der gewaschenen und ungewaschenen Pellets (jeweils als Mittelwert aus fünf Analysen). Der Aschegehalt sinkt durch das Waschen um mehr als 20%. Der Kaliumgehalt der gewaschenen Pellets entspricht nur noch ca. einem Drittel des Kaliumgehalts der ungewaschenen Strohpellets. Der Chlorgehalt sogar nur rund ein Zehntel. Anhand der Standardabweichung über jeweils fünf Proben kann man die gute Homogenisierung erkennen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Analyseergebnisse der gewaschenen und ungewaschenen Strohpellets für die Verbrennungs- und Vergasungsversuche im Technikumsmaßstab

Bezeichnung		Angewendetes Verfahren	*Normative Anforderungen nach DIN EN ISO 17225-6 Klasse A*		ungewaschene Strohpellets	Standardabweichung [n=5, %]	gewaschene Stohpellets	Standardabweichung [n=5, %]
Energieträgerspez. Eigenschaften								
Aschegehalt 550 °C	Ma.-$\%_{TS}$	DIN EN ISO 18122	≤	*6*	6,32	0,3	4,96	2,4
Wassergehalt	Ma.-$\%_{OS}$	DIN EN ISO 18134-1	≤	*12*	9,07	1,4	8,5	3,7
Gesamtgehalt								
Chlor	Ma.-$\%_{TS}$	DIN EN ISO 16994	≤	*0,1*	0,21	2,7	0,028	17
Schwefel	Ma.-$\%_{TS}$	DIN EN ISO 16994	≤	*0,2*	0,08	3,3	0,050	4,6
Haupt- und Nebenbestandteile								
Aluminium	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			44,8	4,6	66,52	8,8
Calcium	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			3674	2,1	4304	3,6
Kalium	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			11820	2,8	3450	9,8
Magnesium	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			676	1,4	664	3,6
Natrium	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			244	1,0	242	4,1
Phosphor	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			367	4,3	222	3,8
Schwefel	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			973	1,8	628	3,9
Silicium	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968			13840	4,9	14300	2,4
Zink	mg/kg_{TS}	DIN EN ISO 16967, DIN EN ISO 16968	≤	*100*	7,78	1,6	6,96	4,8
Phys.-Mech. Eigenschaften								
Schüttdichte	kg/m^3	DIN EN ISO 17828	≥	*600*	687	n.b.	605	n.b.
Abriebfestigkeit	Ma.-%	DIN EN ISO 17831-1	≥	*97,5*	99,2	n.b.	97,2	n.b.

Aus ökonomischer und ökologischer Sicht besteht noch erheblicher technischer Optimierungsbedarf bei dem angewandten Waschverfahren. Da das zerkleinerte Stroh nach dem Waschen nur abgetropft und nicht abgepresst wurde, war der Wassergehalt noch erheblich. Dadurch war der anschließende Trocknungsprozess zeit- und energieaufwändig und damit auch teuer.

Pelletierung im Technikumsmaßstab

Bei der Pelletierung am DBFZ konnte eine sehr gute physikalisch-mechanische Pelletqualität in Übereinstimmung mit den Anforderungen der ISO 17225-6 erreicht werden (Abbildung 10, Tabelle 5) [38].

Die Pelletierung von gewaschenen Stroh erforderte die Konditionierung auf einen höheren Wassergehalt als die des ungewaschenen Strohs und erwies sich darüber hinaus mit einem Energieverbrauch von 0,151 kWh/kg für die Pelletierung als energieaufwändiger als die des ungewaschenen Strohs (0,141 kWh/kg). Gleichzeitig wurden die sehr guten Schüttdichten und Abriebfestigkeiten, die für ungewaschenes Stroh erzielt wurden, für das gewaschene Stroh nicht erreicht.

Tabelle 5: Pellets für die Verbrennungs- und Vergasungsversuche im Technikumsmaßstab

Parameter	Einheit	Pellets aus ungewaschenem Stroh	Pellets aus gewaschenem Stroh
Schüttdichte	kg/m³	687	602
Abriebfestigkeit	Ma.-%	99,2	97,3

Abbildung 10: Pellets aus ungewaschenem (links) und aus gewaschenem Stroh (rechts)

Die torrefizierten Chargen wurden durch den Projektabbruch nicht mehr hergestellt.

2.2.2 Arbeitspaket 2 Untersuchung zur Verbrennung mit Vorvergaser

Für die Versuche zur Verbrennung mit Vorvergaser wurde ein Pelletbrenner der Firma Pyro-Man mit einer maximalen Brennerleistung von 15 kW installiert und in Betrieb genommen. Der schematische

Aufbau des Vergaseranlage mit Kessel ist in Abbildung 11 dargestellt. Er kann im Bereich von 30 – 100 % der maximalen Brennerleistung betrieben werden.

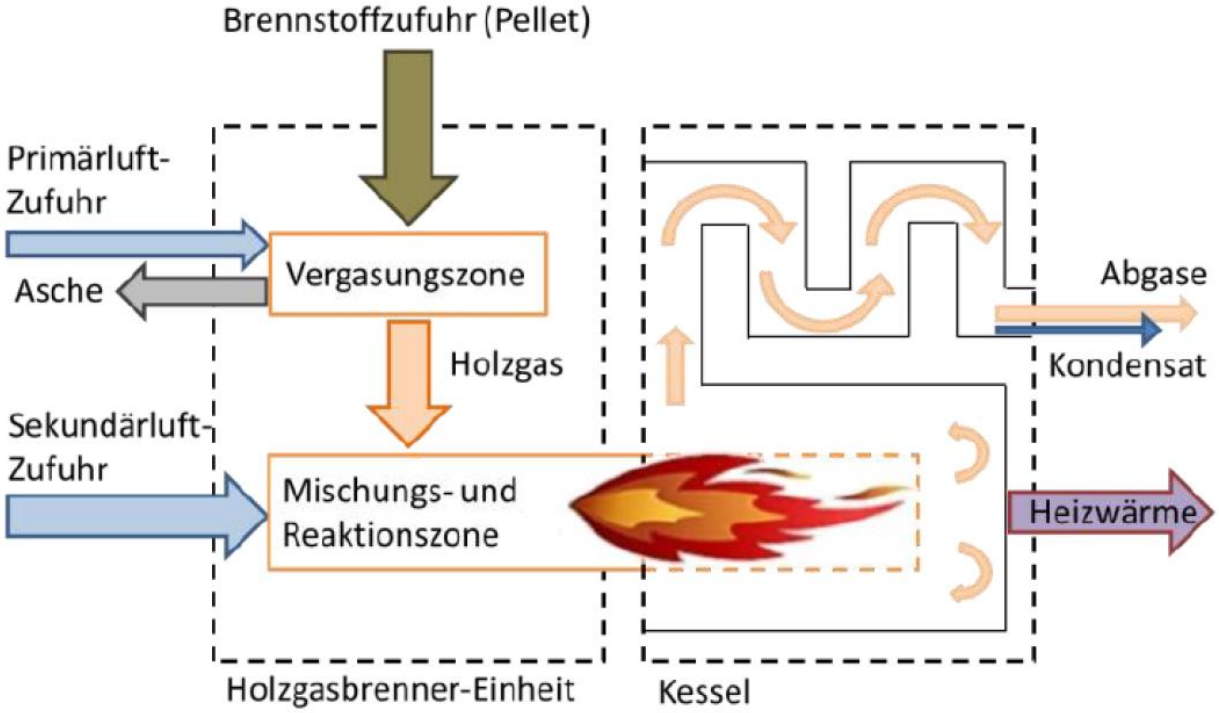

Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Pyro-Man 15 Retrofit mit Kessel

Anhand des Referenzbrennstoffes Holzpellets wurden Vorversuche durchgeführt und entsprechend die notwendigen technischen Anpassungen vorgenommen. So wurden zusätzliche Thermoelemente zur Erfassung der Glutbetttemperatur eingebaut und die Brennstoffzufuhr angepasst. Für den Referenzbrennstoff Holzpellets wurden die Verbrennungsdaten unter Variation verschiedener Kesselparameter wie z.B. Luftzufuhr erfasst und die Temperaturprofile aufgenommen.

Im Anschluss wurde ein erster Vorversuch mit Strohpellets durchgeführt, um zu prüfen, ob die Temperaturen ausreichend niedrig gehalten werden können, um die Verschlackung gering zu halten und um zu prüfen ob ggf. Anpassungen im Ascheaustragssystem erforderlich sind, um den Ascheaustrag auch bei aschereicheren Brennstoffen sicher gewährleisten zu können. Eine Anpassung der Brennstoffzufuhr war für Strohpellets nicht erforderlich. Für die Verbrennungsversuche mit Strohpellets wurden die Verbrennungsdaten erfasst. Dabei zeigte sich, dass trotz der räumlichen Trennung von Vergasung und Verbrennung so hohe Temperaturen im Glutbett auftraten, dass es zu starken Verschlackungen kam, die letztendlich zum Abbruch des Versuchs führten. Darüber hinaus zeigte sich, dass das Ascheaustragssystem zu klein dimensioniert ist, um größere Aschegehalte in Strohpellets bewältigen zu können. Es wurde geprüft, welche Anpassungsmöglichkeiten im Rahmen des Projektes realisierbar sein könnten. Die weitere Reduzierbarkeit der Primärluftzufuhr und die damit mögliche zusätzliche Temperaturverringerung im Glutbett sollte anhand von Holzpellets geprüft werden. Eine Behebung des unzureichenden Ascheaustrags am Pyro-Man-Kessel war im Rahmen des Projektes nicht realisierbar. Weitere Versuche zur Verbrennung von Strohpellets in dem Kessel mit Vorvergasung sollten daher nur anhand der gewaschenen Strohpellets erfolgen. Die Versuche zur Verbrennung mit Vorvergasung mit torrefizierten und additivierten Strohpellets als Brennstoff wurden im Rahmen des Projektes nicht

durchgeführt, da durch die Torrefizierung keine Verbesserung des Verschlackungsverhaltens erreicht wird und durch die Additivierung der ohnehin kritische Aschegehalt noch weiter erhöht wird.

Es wurden Optionen zur alternativen Versuchsdurchführung unter Verwendung der am DBFZ entwickelten Laborverbrennungsanlage bzw. eines Anflanschbrenners geprüft. Dabei stellte sich auf der Basis von Vorversuchen mit Holzpellets der Anflanschbrenner als am aussichtsreichsten heraus. Es konnte gezeigt werden, dass bei Holzpellets durch die weitere Reduzierung der Primärluftzufuhr eine zusätzliche Temperaturverringerung im Glutbett möglich ist. Aufgrund des Projektabbruchs wurden die Versuche zur Verbrennung der Strohpellets (gewaschen und ungewaschen) im Rahmen des Projektes nicht realisiert.

2.2.3 Arbeitspaket 3 Untersuchungen zur Vergasung am Kleinvergaser des DBFZ

Die Realisierung der Festbettvergasung im Technikumsmaßstab stellte eine große Herausforderung dar, da es keine marktverfügbaren Anlagen gibt. Bei der Planung, Realisierung, Installation und Inbetriebnahme des Reaktors kam es durch erhebliche Mängel von Seiten des beauftragen Anlagenbauers, durch schwierige Lösungsfindung zur Mängelbeseitigung und aufwändige Anpassungsarbeiten und technische Umsetzungen, die zum Teil erst für die geplante Anwendung entwickelt werden mussten, im gesamten Projektverlauf zu großen Verzögerung gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan. Die notwendigen Anpassungsarbeiten sind im Folgenden aufgeführt:

- Alternative Beheizung des Vergasungsmittels zur Realisierung der geforderten Zielparameter für die Vergasung im Laborvergaser (bis zu 950 °C und bis zu 20 bar)
- Entwicklung und Realisierung einer Beheizung des Luftkühlerkopfes und der Rohrleitung bis zum Wasserkühler in der Abgasstrecke des Laborvergasers zur Vermeidung von Teerkondensation bei der geplanten Fahrweise des Reaktors (Umschalten von Bypass aus Reaktor nach der Vorheizung des Gesamtsystems)
- Behebung der Probleme bei der Produktgaskühlung
- Erweiterung des Laborvergasers im Bereich Anlagensicherheit (automatische Sicherheitsabschaltung)

Nach der erfolgreichen Mängelbeseitigung, die zum Teil durch den Anlagenhersteller und zum Teil unter Einbeziehung Dritter realisiert wurde, konnten die Versuche mit dem Referenzbrennstoff Holzpellet erfolgreich durchgeführt werden. Bei den ersten Versuchen konnten die Versuchseinstellungen mit Holzpellets für 800 °C mit 400 Lh^{-1} Luft (Vergasungsmittel) und bis zu 1 kg Brennstoffschüttung im Reaktor identifiziert werden. Um den Einfluss der verschiedenen Versuchsparameter auf die unterschiedlichen Brennstoffe belastbar feststellen zu können, wurde mittels statistischer Methoden ein Versuchsplan für die notwendigen Versuche aufgestellt. Dieser ermöglicht es ein Maximum an Ergebnissen innerhalb des Versuchsparameterfeldes mit einer hohen statistischen Belastbarkeit zu ermitteln. Mit Hilfe dieses Versuchsplans können die Versuchsergebnisse ausgewertet und der Einfluss der Versuchsparameter genau bestimmt werden. Somit lassen sich sicher entsprechende Schlussfolgerungen für die einzelnen Brennstoffe ableiten. An den erfolgversprechendsten Punkten, welche nach Auswertung der ersten Versuche mit den gewaschenen Strohpellets lokalisiert werden, sollten dann die anderen Brennstoffe (ungewaschene, torrefizierte und additivierte Strohpellets) analysiert werden. Durch den Projektabbruch konnten die Versuche mit Strohpellets nicht umgesetzt werden.

2.2.4 Arbeitspaket 4 Untersuchungen zur Vergasung an der Versuchsanlage von Entrade

Bei einem Projekttreffen, das am 10.02.2016 am DBFZ stattfand, wurden Erfordernisse zur Brennstoffqualität sowie das Vorgehen bei der Abstimmung zwischen Technikumsversuchen am DBFZ und Versuchen an der Versuchsanlage bei Entrade diskutiert. Da ein zu hoher Aschegehalt kritisch ist und die Strohbrennstoffe ohnehin schon einen Aschegehalt aufweisen, der über dem maximal möglichen Gehalt für einsetzbare Brennstoffe liegt, sollen in der Anlage von Entrade keine additivierten Pellets zum Einsatz kommen. Auch torrefizierte Pellets erwiesen sich in Vorversuchen als nicht kompatibel mit dem aktuellen Reaktordesign und sollen daher in der Versuchsanlage von Entrade nicht zum Einsatz kommen. Entsprechend sollten nur reine Strohpellets und gewaschene Strohpellets untersucht werden. Erste Vorversuche zur Vergasung mit Strohpellets zeigten, dass die Anlage nur mit einer Mischung von Holzpellet und Strohpellets störungsfrei betrieben werden kann. Die maximale Zumischmenge an ungewaschenem Stroh, die bislang erreicht werden konnte, liegt bei 20%.

Die homogenisierten Strohpellet-Versuchschargen (gewaschen und ungewaschen) wurden für die Versuche bei Entrade bereitgestellt. Die Analyse dieser Chargen wurde abgeschlossen und die Analysedaten an Entrade übermittelt.

Aufgrund der Insolvenz von Entrade wurden die Vergasungsversuche mit diesen Chargen nicht realisiert. Die Chargen konnten trotz intensiver Bemühungen durch das DBFZ nicht mehr aus der Insolvenzmasse herausgelöst werden.

2.2.5 Arbeitspaket 5 Konzeptentwicklung

Da der umfassende Ansatz zur WKK bei der Strohnutzung auf der Basis der Vergasungsversuche im Technikum des DBFZ und der Versuche bei Entrade entwickelt werden sollte, konnten diese Arbeiten nicht realisiert werden.

2.3 Meilensteine und Maßnahmen

Im Folgenden sind die vorgesehenen Maßnahmen und Meilensteine zusammengefasst und der Stand der Umsetzung zum Projektende erläutert (Tabelle 6 und Tabelle 7).

Tabelle 6: Meilensteine / Maßnahmen bis zur Neukonzeptionierung

Meilenstein / Maßnahme	Stand der Umsetzung	Erläuterung
Meilenstein: Nachweis eines unterbrechungsfreien 48 Stunden Betriebes mit Strohpellets	nicht erreicht	Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim aus den Projektkonsortium aufgrund der Änderung des Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) insbesondere des Wegfalls der Einsatzstoffklassen und der damit einhergehenden erhöhten Vergütungssätze → Neukonzeptionierung mit stärkerer Fokussierung auf Kleinvergasungsanlagen und zukünftige Mikro-WKK-Anwendungen, Einbindung eines neuen Industriepartners für die Projektweiterführung
Maßnahme: Ermittlung einer Minimaltemperatur in der Oxidationszone als erster Richtwert für das DBFZ zur Bestimmung der Zusammensetzung der Strohpellets (AP1)	vollständig erbracht	Festlegung des Richtwertes für die Ascheerweichungstemperatur mit >1000 °C
Maßnahmen: Bereitstellung der Strohchargen für die Vergasungsversuche basierend auf Analysen zum Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe, den Möglichkeiten der Additivbeimischung, der Erstellung eines Vorhersage- und Qualitätskonzeptes für den Brennstoff Strohpellets (AP 3)	teilweise erbracht	Eine geeignete Strohcharge wurde beschafft und 10 t des Materials wurden als Referenz pelletiert. Mögliche Additive und die Auswirkungen auf das Ascheschmelzverhalten wurden recherchiert. Kaolin und Calciumcarbonat wurden als geeignete Additive ausgewählt und beschafft. Die Auswirkungen auf das Ascheschmelzverhalten von Strohpellets wurden im Muffelofen bei unterschiedlichen Zumischmengen zwischen 1 und 4 % und bei verschiedenen Temperaturen untersucht.
Maßnahme: Analyse der Korrosionsmechanismen für die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen (AP5)	entfallen	Durch den Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim aus dem Projektkonsortium wurden auch die Vergasungsversuche mit Strohpellets in deren Vergasungsanlage nicht durchgeführt. Damit konnten auch die Korrosionsmechanismen nicht untersucht werden.

Tabelle 7: Meilensteine / Maßnahmen nach der Neukonzeptionierung

Meilenstein / Maßnahme	Stand der Umsetzung	Erläuterung
Maßnahme: Weiterführende Analytik der Brennstoffe verschiedener Aufbereitungsstufen (ungewaschen, gewaschen, torrefiziert, additiviert) (AP1)	teilweise erbracht	Es wurden gewaschene, ungewaschene und additivierte Pellets im Technikumsmaßstab für die Versuche am DBFZ hergestellt und vollständig charakterisiert (energieträgerspezifische Eigenschaften, chemische Eigenschaften, Ascheschmelzverhalten). Auch die beiden Chargen (gewaschen und ungewaschen für die industrielle Anwendung wurden vollständig charakterisiert. Die torrefizierten Pellets wurden aufgrund des durch die Insolvenz von Entrade erfolgten Projektabbruchs nicht mehr hergestellt und konnten daher auch nicht analysiert werden. Durch den Wegfall der Vergasungsversuche fielen keine Aschen an und konnten entsprechend auch nicht analysiert werden.
Maßnahme: Brennstoffkonditionierung zur Anpassung der Eigenschaften (AP1)	teilweise erbracht	Erhebliche Verzögerungen für diese Maßnahme aufgrund der sehr aufwändigen Homogenisierung der Gesamtcharge. Entwicklung einer Verfahrensweise zur Homogenisierung im Technikumsmaßstab und Verifizierung der erfolgreichen Homogenisierung durch umfangreiche Analysen. Ableitung einer Verfahrensweise zur Homogenisierung größerer Versuchschargen und Verifizierung der Erfolgreichen Homogenisierung durch umfangreiche Analysen. Die vorgesehene Konditionierung durch das Wasch-Auspressverfahren war für Stroh nicht erfolgreich da die Trockensubstanz für die Pressen zu hoch ist. → Ein alternatives Waschverfahren konnte angewandt werden und führte zu einer deutlichen Verbesserung der Brennstoffeigenschaften. Bei der technischen Umsetzung dieses Verfahrens besteht jedoch noch Optimierungsbedarf. Die Vorversuche zur Bestimmung der Versuchsparameter zur Herstellung torrefizierter Strohpellets mittels Drehrohrofen sind erfolgt. Für die Versuche im Technikumsmaßstab wurden ungewaschene, gewaschene und additivierte Pellets aus der zuvor homogenisierten Charge hergestellt. Für die Versuche bei Entrade wurden die

		gewaschenen und ungewaschenen Pellets unter gleichzeitiger Homogenisierung hergestellt. Die torrefizierten Pellets wurden aufgrund des durch die Insolvenz von Entrade erfolgten Projektabbruchs nicht mehr hergestellt.
Maßnahme: Qualitätssicherung (AP1)	teilweise erbracht	Die Arbeiten zur Entwicklung eines Verfahrens zur Homogenisierung von kleinen und mittleren Strohchargen wurden realisiert und die erfolgreiche Homogenisierung wurde durch umfangreiche Analysen verifiziert. Das anzuwendende Verfahren für die Herstellung der für Kleinvergasungen am besten geeigneten Strohaufbereitungsvariante konnte aufgrund der nicht durchgeführten Vergasungsversuche noch nicht bestimmt werden. Damit konnte auch die anzuwendenden QS-Schritte noch nicht festgelegt werden.
Meilenstein 1: Festlegung eines zielführenden Brennstoffaufbereitungssystems (AP1)	begonnen	Durch den Projektabbruch fehlen die Ergebnisse aus den Vergasungsversuchen und damit die Datenbasis für die Festlegung des zielführendsten Brennstoffaufbereitungssystems.
Verbrennungsversuche mit den hergestellten Pellets an einer Kleinfeuerungsanlage mit integrierter Vorvergasung (AP2)	begonnen	Ein störungsfreier Betrieb konnte an der gewählten Anlage der Firma Pyro-Man aufgrund der unzureichenden Möglichkeiten der Luftsteuerung und des Ascheaustrags mit Strohpellets nicht erreicht werden. An einer alternativen Anlage (Eigenentwicklung) zur Verbrennung mit Vorvergasung konnte die Temperatur im Glutbett bei Vorversuchen mit Holzpellets soweit verringert werden, dass auch für Strohpellets gute Aussichten für die erfolgreiche, störungsfreie Verbrennung bestehen. Die entsprechenden Versuche wurden jedoch aufgrund des durch die Insolvenz von Entrade erfolgten Projektabbruchs nicht mehr durchgeführt.
Meilenstein 2: Nachweis der verbesserten Verbrennungseignung mit Vorvergasung durch gezielte Brennstoffaufbereitung (AP2)	nicht erbracht	Da die Verbrennungsversuche mit den aufbereiteten Strohchargen aufgrund des Projektabbruchs nicht durchgeführt wurden, konnte auch die Verbesserung der Verbrennungseignung durch die gezielte Brennstoffaufbereitung nicht nachgewiesen werden.
Maßnahme: Vergleich der Brennstoffe (Stroh mit unterschiedlichen Aufbereitungsgraden) im „Niedertemperaturbereich“	begonnen	Durch umfangreiche Verzögerungen bei der Installation und Inbetriebnahme des Laborvergasers sowie notwendige Mängelbeseitigungen

(Gas-/ Ascheanalysen) – Überprüfung des Einflusses der Brennstoff-aufbereitung auf die Vergasungseigenschaften (AP3)		konnten die Vorversuche mit Holzpellets erst deutlich später erfolgen als geplant. Durch die zeitaufwändige Homogenisierung konnten die aufbereiteten Brennstoffe auch erst zu einem erheblich späteren Zeitpunkt bereitgestellt werden. Durch den Projektabbruch konnten dann auch die vorgesehenen Vergasungsversuche nicht mehr durchgeführt werden.
Maßnahme: Versuche im „Niedertemperaturbereich“ 550 – 700 °C – Verbreiterung der Datenbasis zur Strohvergasung bei niedrigen Vergasungstemperaturen zur Lokalisierung optimaler Betriebspunkte (AP3)	begonnen	Siehe vorherige Erläuterungen
Überprüfung der Gasreinigungsmöglichkeiten (Reformierung, Adsorption) hinsichtlich der speziellen Brennstoffcharakteristik (Stroh) für die motorische Gasnutzung (Motortauglichkeit) – Gesamtkonzeptentwicklung für die motorische Nutzung von Produktgas der Strohvergasung (AP3)	nicht erbracht	Durch den Projektabbruch konnten die Vergasungsversuche nicht wie geplant durchgeführt werden und entsprechend konnten auch die Gasreinigungsmöglichkeiten nicht geprüft werden.
Meilenstein 3: Anpassungen der Vergasungsparameter an den Brennstoff sind erfolgt. (AP3)	nicht erbracht	Durch den Projektabbruch konnten die Vergasungsversuche nicht wie geplant durchgeführt werden und somit fehlte die Datenbasis zur Anpassung der Vergasungsparameter.
Meilenstein 4: Abschluss der Versuchsreihen zur Prüfung eines stabilen Betriebes und Ergebnisübertragbarkeit (AP4)	begonnen	Die Brennstoffe wurden an Entrade geliefert und Vorversuche wurden durchgeführt. Aufgrund der Insolvenz von Entrade wurden die Versuche jedoch nicht fortgeführt.
Meilenstein 5: Entwicklung eines grundlegenden Konzepts ist abgeschlossen (AP5)	nicht erbracht	Aufgrund der nicht erfolgten Vergasungsversuche im Laborvergaser sowie in der Vergasungsanlage der Fa. Entrade konnten kein Konzept für die Realisierung von WKK-Anwendungen mit Stroh abgeleitet werden.

2.4 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zusammenfassung des zahlenmäßigen Nachweises ist dem separat zugegangenen zahlenmäßigen Nachweis zu entnehmen.

2.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Trotz eines durch eine Vielzahl an Projekten belegten, großen Interesse an der Nutzung von Stroh zur Energiegewinnung waren zu Beginn des Vorhabens die konkreten Anwendungen selten. Ansätze zur Optimierung des Vergasers, zum Bilanzierungsmodell und zur Qualitätssicherung der Strohpellets waren in der geplanten Form in der Literatur bisher nicht beschrieben. Sowohl die systematische Anpassung der Brennstoffeigenschaften an das Verwertungsverfahren, wie auch die Optimierung des Verfahrens im Hinblick auf die niedrigen Schmelztemperaturen der Asche und einen geringen Gehalt an Teeren und Benzol im Produktgas waren in dieser Form noch nicht realisierte Entwicklungen. Weiterhin lagen kaum Ergebnisse zur Optimierung des Emissions- und Ascheverhaltens in Vergasungsanlagen von Strohpellets vor. Vor diesem Hintergrund war die Bearbeitung der im Antrag aufgeführten Arbeitspakete von hohem Interesse sowohl für Vergasungsanlagenbetreiber zum Nachweis eines stabilen, störungsfreien Betriebs mit dem Brennstoff Stroh als auch im Hinblick auf eine regionale Brennstoffbereitstellung und die Nutzung von biogenen Reststoffen für die Energieerzeugung.

Mit der Neukonzeptionierung nach dem Ausstieg der Stadtwerke Rosenheim aus dem Projektkonsortium rückten andere Ziele in den Mittelpunkt. Zum einen die Realisierung einer möglichst breiten Brennstoffbasis zur Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen und für eine größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der einsetzbaren Brennstoffe. Dabei sollten effiziente Aufbereitungsformen und angepasste Vergasungsparameter die Nutzbarkeit des regionalen Reststoffes Stroh für flexible Wärme-Kraft-Kopplungs-Systeme (WKK) sicherstellen. WKK dienen vorrangig der Wärmebereitstellung und tragen durch ergänzende Kraft-Wärmekopplung zur Stromnetzstabilisierung bei.

Bei allen Forschungsarbeiten zu biogenen Reststoffen und Agrarnebenprodukten, bei denen unterschiedliche Aufbereitungsverfahren zum Einsatz kommen, um das kritische Abbrand- und Emissionsverhalten dieser Brennstoffe zu verbessern, ist die Gewährleistung einer ausreichenden Homogenität innerhalb der eingesetzten Versuchscharge von immanenter Bedeutung. Nur bei Verwendung einer homogenen Gesamtcharge können sinnvolle Schlussfolgerungen gezogen werden, welche der angewandten Aufbereitungsstrategien zu den besten Ergebnissen führt. Auf der anderen Seite gibt es zwar Veröffentlichungen zur repräsentativen Beprobung heterogener Chargen aber kaum Ansätze, auf welche Weise eine Homogenisierung der Ausgangsmaterialien realisiert werden könnte. Entsprechend ist der hohe Aufwand berechtigt, der notwendig war, um die Strohcharge nicht nur zu homogenisieren, sondern diesen Prozess auch wissenschaftlich zu begleiten und die erfolgreiche Homogenisierung zu verifizieren, damit die Erkenntnisse veröffentlicht und damit der Wissenschaftsgemeinde zugänglich gemacht werden können. Die Ergebnisse sind für eine zuverlässige Beurteilung und Einschätzung von Handlungsnotwendigkeiten unerlässlich. Zu deren zielgerichteter Umsetzung ist eine Publikation in Arbeit. Gleichzeitig sollen die noch offenen Fragestellungen hinsichtlich des Vergasungsverhaltens der aufbereiteten Brennstoffe in einem Folgeprojekt bearbeitet werden, dass derzeit beantragt wird.

2.6 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Um aus Agrarnebenprodukten und biogenen Reststoffen Biomassebrennstoffe zu erzeugen, die für einen weitestgehend störungsfreien Betrieb in Feuerungs- und Vergasungsanlagen geeignet sind, ist in der Regel deren Aufbereitung zur Verbesserung der brennstofftechnischen Eigenschaften und zur Minderung des Gehalts an kritischen Inhaltsstoffen erforderlich. Um dabei verschiedenen Strategien sinnvoll vergleichen zu können, müssen diese Brennstoffe homogenisiert werden. In den nächsten Jahren ist sowohl mit einem zunehmenden Interesse an der Nutzung nicht-holzartiger Brennstoffe zu rechnen als auch an deren Aufbereitung. Die gewonnenen Erkenntnisse und die erarbeiteten Lösungsansätze tragen wesentlich dazu bei, diese Forschung zu ermöglichen und zu erleichtern. Für Versuche mit halmgutartigen Brennstoffen wurden Arbeitsvorschriften abgeleitet, die bei zukünftigen Projekten mit solchen Brennstoffen am DBFZ und im Rahmen des Förderprogramms zur Anwendung kommen.

Das Waschen/Leachen bzw. mechanische Auspressen von nicht-holzartigen Brennstoffen ist eines der aussichtsreichsten Verfahren zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuche zur Aufbereitung einer Strohcharge im Technikumsmaßstab und einer weiteren Charge für den Projektpartner Entrade habe wichtige Erkenntnisse zu den Herausforderungen und Optimierungsnotwendigkeiten geliefert, die in aktuell angelaufene Projekte und Folgeprojekte einfließen werden.

Die Brennstoff- und Versuchsdaten trugen zur Weiterentwicklung und Verifizierung von Brennstoffindizes bei. Eine aktuelle Veröffentlichung aus dem DBFZ verdeutlicht die Entwicklung auf diesem Gebiet [34]. Auf deren Berechnungsgrundlage kann die Modellierung und Prozessführung von Anlagen zur flexiblen Bioenergiebereitstellung erfolgen, was einen umwelt- und ressourcenschonenden Anlagenbetrieb ermöglicht. Mit den bisherigen Erkenntnissen des DBFZ und der gezielten Beschränkung auf Stroh als Ausgangsstoffe geht das DBFZ davon aus, dass die bezüglich Verschlackung und Heißgasentstehung auftretenden Herausforderungen in der Brennstoffkonditionierung lösbar sind.

Bei den Versuchen zur Verbrennung mit Vorvergasung konnte an Holzpellets gezeigt werden, dass durch gezielte Luftsteuerung die Temperatur im Glutbett so weit gesenkt werden kann, dass auch die Vermeidung von Schlackebildung bei der Nutzung von Strohpellets aussichtsreich erscheint. Damit konnte eine wesentliche Voraussetzung für weitere technische Entwicklungen im Bereich der Kleinfeuerungsanlagen zur Nutzung von Stroh geschaffen werden.

Im Laborvergaser konnten die Vergasungsversuche zur Parametrierung mit Holzpellets erfolgreich abgeschlossen werden. Damit wurde die Basis für weiterführende Vergasungsversuche mit einer Vielzahl verschiedener Biomassebrennstoffe geschaffen, aus denen wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden können, wie eine Flexibilisierung der Vergaser hinsichtlich der Brennstoffe erreicht werden kann.

2.7 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens von anderen Stellen

Die im Projekt vorgesehene Variante der Verringerung des Verschlackungsrisikos durch Zugabe eines geeigneten Additives wird weiterhin untersucht und unter anderem für Holz, Stroh und Mais eingesetzt [13, 39–47]. Die Verringerung von kritischen Inhaltsstoffen durch Waschen wurde in weiteren Projekten untersucht, z.B. AgraSIL (AiF, FKZ 2028019ST4) und STEP (PtJ, FKZ 03KB116). Erfahrungen aus diesen Projekten konnten für die Planung und Umsetzung der Waschversuche im StROhgas-Projekt und bei der

Herstellung der gewaschenen Pellets genutzt werden. In den letzten Jahren konnte ein zunehmendes Interesse an der Kohlenstoffsequestrierung beobachtet werden, wobei Kohlenstoff aus Biomasse erzeugt (Biochar) und dann z.B. in den Boden eingebracht wird. Damit wird der Atmosphäre Kohlenstoffdioxid entzogen. Neben der Pyrolyse eignet sich auch die Vergasung zur Erzeugung von Biochar. So wurde z.B. die Auswirkung von Biochar aus der Strohvergasung auf die Bodenfruchtbarkeit untersucht [48, 49]. Systematische Untersuchungen zur Strohvergasung (Wirbelschicht / Festbett) bzw. zur Anwendung von Stroh für Kleinvergasungsanlagen und Mikro-WKK-Anwendungen sind nicht bekannt geworden.

2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Homogenisierung von Versuchschargen werden im Rahmen eines Vortrages auf der Jahrestagung des Deutschen Biomasseforschungszentrums gemeinnützige GmbH veröffentlicht und für eine Veröffentlichung in einer begutachteten Zeitschrift (peer-reviewed) vorbereitet. Die Einreichung ist für das zweite Quartal 2020 geplant. Die Homogenisierungsstrategien werden weiter entwickelt mit dem Ziel, diese als Methodenhandbuch im Rahmen des SUB bereitzustellen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ballenbohrer zur Entnahme von Teilmengen aus einem Strohballen 9
Abbildung 2: Ergebnisse der Ascheschmelzuntersuchungen die mit den Aschen der additivierten Pellets durchgeführt wurden 15
Abbildung 3: Vereinfachtes Verfahren 15
Abbildung 4: Gehalte der wichtigsten Aschebildner in den pro Prozessschritt genommenen drei Einzelproben exemplarisch für eine Teilmenge der Gesamtcharge (RM = Rohmaterial) 17
Abbildung 5: Heterogenität der wichtigsten Aschebildner in der verwendeten Strohcharge vor der Homogenisierung und nach der Homogenisierung 18
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Homogenisierung der Großcharge 20
Abbildung 7: Asche- und Wassergehalt der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets) 21
Abbildung 8: Gehalte der Hauptaschebildner Calcium, Kalium und Silizium der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets) 22
Abbildung 9: Gehalte an Stickstoff, Chlor und Schwefel der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets) 22
Abbildung 10: Pellets aus ungewaschenem (links) und aus gewaschenem Stroh (rechts) 24
Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Pyro-Man 15 Retrofit mit Kessel 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Analyse der beschafften Strohcharge (1600) im Vergleich zu einer weiteren am DBFZ verfügbaren Charge 10
Tabelle 2: Verwendete Additive zur Verringerung der Verschlackungsneigung 11
Tabelle 3: In Betracht gezogene aber verworfene Homogensierungsoptionen für die Großcharge 19
Tabelle 4: Analyseergebnisse der gewaschenen und ungewaschenen Strohpellets für die Verbrennungs- und Vergasungsversuche im Technikumsmaßstab 23
Tabelle 5: Pellets für die Verbrennungs- und Vergasungsversuche im Technikumsmaßstab 24
Tabelle 6: Meilensteine / Maßnahmen bis zur Neukonzeptionierung 28
Tabelle 7: Meilensteine / Maßnahmen nach der Neukonzeptionierung 29

Literatur- und Referenzverzeichnis

1. Sommersacher P, Brunner T, Obernberger I (2012) Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. Energy & Fuels 26(1): 380–390. doi: 10.1021/ef201282y

2. Fernández Llorente MJ, Escalada Cuadrado R, Murillo Laplaza JM et al. (2006) Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering. Fuel 85(14): 2081–2092. doi: 10.1016/j.fuel.2006.03.018

3. Grimm A, Öhman M, Lindberg T et al. (2012) Bed Agglomeration Characteristics in Fluidized-Bed Combustion of Biomass Fuels Using Olivine as Bed Material. Energy & Fuels 26(7): 4550–4559. doi: 10.1021/ef300569n

4. Öhman M, Nordin A, Skrifvars B-J et al. (2000) Bed Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels. Energy & Fuels 14(1): 169–178. doi: 10.1021/ef990107b

5. Wu H, Glarborg P, Frandsen FJ et al. (2011) Dust-Firing of Straw and Additives: Ash Chemistry and Deposition Behavior. Energy & Fuels 25(7): 2862–2873. doi: 10.1021/ef200452d

6. Brus E, Öhman M, Nordin A (2005) Mechanisms of Bed Agglomeration during Fluidized-Bed Combustion of Biomass Fuels. Energy & Fuels 19(3): 825–832. doi: 10.1021/ef0400868

7. Davidsson KO, Steenari B-M, Eskilsson D (2007) Kaolin Addition during Biomass Combustion in a 35 MW Circulating Fluidized-Bed Boiler. Energy & Fuels 21(4): 1959–1966. doi: 10.1021/ef070055n

8. Gilbe C, Öhman M, Lindström E et al. (2008) Slagging Characteristics during Residential Combustion of Biomass Pellets. Energy & Fuels 22(5): 3536–3543. doi: 10.1021/ef800087x

9. Mac an Bhaird ST, Walsh E, Hemmingway P et al. (2014) Analysis of bed agglomeration during gasification of wheat straw in a bubbling fluidised bed gasifier using mullite as bed material. Powder Technology 254: 448–459. doi: 10.1016/j.powtec.2014.01.049

10. Ergudenler A, Ghaly AE (1993) Agglomeration of silica sand in a fluidized bed gasifier operating on wheat straw. Biomass and Bioenergy 4(2): 135–147. doi: 10.1016/0961-9534(93)90034-2

11. Vassilev SV, Baxter D, Vassileva CG (2014) An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. Fuel 117: 152–183. doi: 10.1016/j.fuel.2013.09.024

12. Wang L, Hustad JE, Skreiberg Ø et al. (2012) A Critical Review on Additives to Reduce Ash Related Operation Problems in Biomass Combustion Applications. Energy Procedia 20: 20–29. doi: 10.1016/j.egypro.2012.03.004

13. Gollmer C, Höfer I, Kaltschmitt M (2019) Additives as a fuel-oriented measure to mitigate inorganic particulate matter (PM) emissions during small-scale combustion of solid biofuels. Biomass Conversion and Biorefinery 9(1): 3–20. doi: 10.1007/s13399-018-0352-4

14. Dudyński M, van Dyk JC, Kwiatkowski K et al. (2015) Biomass gasification: Influence of torrefaction on syngas production and tar formation. Fuel Processing Technology 131: 203–212. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.11.018

15. Khalsa HJ, Döhling F, Berger F (2016) Foliage and Grass as Fuel Pellets–Small Scale Combustion of Washed and Mechanically Leached Biomass. Energies, vol 9

16. Deutsches Institut für Normung (2014) DIN EN ISO 17225-1: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements

17. Öhman, Marcus, Boström D et al. (2004) Effect of Kaolin and Limestone Addition on Slag Formation during Combustion of Wood Fuels. Energy & Fuels 18(5): 1370–1376. doi: 10.1021/ef040025+

18. Boström D, Grimm A, Boman C et al. (2009) Influence of Kaolin and Calcite Additives on Ash Transformations in Small-Scale Combustion of Oat. Energy & Fuels 23(10): 5184–5190. doi: 10.1021/ef900429f

19. Bryers RW (1996) Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. Progress in Energy and Combustion Science 22(1): 29–120. doi: 10.1016/0360-1285(95)00012-7

20. Tran K-Q, Lisa K, Steenari B-M et al. (2005) A kinetic study of gaseous alkali capture by kaolin in the fixed bed reactor equipped with an alkali detector. Fuel 84(2): 169–175. doi: 10.1016/j.fuel.2004.08.019

21. Steenari B-M, Lindqvist O (1998) High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite. Biomass and Bioenergy 14(1): 67–76. doi: 10.1016/S0961-9534(97)00035-4

22. Fagerström J, Näzelius I-L, Gilbe C et al. (2014) Influence of Peat Ash Composition on Particle Emissions and Slag Formation in Biomass Grate Co-combustion. Energy & Fuels 28(5): 3403–3411. doi: 10.1021/ef4023543

23. Llorente MF, Arocas PD, Nebot LG et al. (2008) The effect of the addition of chemical materials on the sintering of biomass ash. Fuel 87(12): 2651–2658. doi: 10.1016/j.fuel.2008.02.019

24. Steenari B-M, Lundberg A, Pettersson H et al. (2009) Investigation of Ash Sintering during Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives. Energy & Fuels 23(11): 5655–5662. doi: 10.1021/ef900471u

25. Wilen, C., Stahlberg, P., Sipila, K., Ahokas, J., London, X. (1987) Pelletization and combustion of straw. In: Klaas D (ed) Energy from Biomass and Wastes X. Elsevier Science, pp 469–483

26. Sommersacher P, Brunner T, Obernberger I et al. (2013) Application of Novel and Advanced Fuel Characterization Tools for the Combustion Related Characterization of Different Wood/Kaolin and Straw/Kaolin Mixtures. Energy & Fuels 27(9): 5192–5206. doi: 10.1021/ef400400n

27. SQ T, CM K, DM I et al. (1998) A review of sorbent materials for fixed bed alkali getter systems in biomass gasifier combined cycle power generation applications. J. Inst. Energy 71(489): 163–177

28. Toscano G, Corinaldesi F (2010) Ash fusibility characteristics of some biomass feedstocks and examination of the effects of inorganic additives. Journal of Agricultural Engineering 41(2): 13–19. doi: 10.4081/jae.2010.2.13

29. Risnes H, Fjellerup J, Henriksen U et al. (2003) Calcium addition in straw gasification☆. Fuel 82(6): 641–651. doi: 10.1016/S0016-2361(02)00337-X

30. Wang L, Skreiberg Ø, Becidan M et al. (2014) Sintering of Rye Straw Ash and Effect of Additives. Energy Procedia 61: 2008–2011. doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.063

31. Tobiasen L, Skytte R, Pedersen LS et al. (2007) Deposit characteristic after injection of additives to a Danish straw-fired suspension boiler. Fuel Processing Technology 88(11): 1108–1117. doi: 10.1016/j.fuproc.2007.06.017

32. Dahlin RS, Peng W, Nelson M et al. (2006) Formation and Prevention of Agglomerated Deposits During the Gasification of High-Sodium Lignite. Energy & Fuels 20(6): 2465–2470. doi: 10.1021/ef0602269

33. Zeng T, Pollex A, Weller N et al. (2018) Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options. Fuel 212: 108–116. doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.036

34. Zeng T, Mlonka-Medrala A, Lenz V et al. (2019) Evaluation of bottom ash slagging risk during combustion of herbaceous and woody biomass fuels in a small-scale boiler by principal component analysis. Biomass Conversion and Biorefinery(submitted)

35. Öhman M, Boman C, Hedman H et al. (2004) Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. Biomass and Bioenergy 27(6): 585–596. doi: 10.1016/j.biombioe.2003.08.016

36. Fernández MJ, Mediavilla I, Barro R et al. (2019) Sintering reduction of herbaceous biomass when blended with woody biomass: Predictive and combustion tests. Fuel 239: 1115–1124. doi: 10.1016/j.fuel.2018.11.115

37. Wang L, Skjevrak G, Hustad JE et al. (2014) Investigation of Biomass Ash Sintering Characteristics and the Effect of Additives. Energy & Fuels 28(1): 208–218. doi: 10.1021/ef401521c

38. Deutsches Institut für Normung (2014) DIN EN ISO 17225-6: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 6: Graded non-woody pellets

39. Gehrig M, Wöhler M, Pelz S et al. (2019) Kaolin as additive in wood pellet combustion with several mixtures of spruce and short-rotation-coppice willow and its influence on emissions and ashes. Fuel 235: 610–616. doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.028

40. Huelsmann T, Mack R, Kaltschmitt M et al. (2019) Influence of kaolinite on the PM emissions from small-scale combustion. Biomass Conversion and Biorefinery 9(1): 55–70. doi: 10.1007/s13399-018-0316-8

41. Wang G, Jensen PA, Wu H et al. (2018) Potassium Capture by Kaolin, Part 1: KOH. Energy & Fuels 32(2): 1851–1862. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b03645

42. Wang G, Jensen PA, Wu H et al. (2018) Potassium Capture by Kaolin, Part 2: K2CO3, KCl, and K2SO4. Energy & Fuels 32(3): 3566–3578. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b04055

43. Fusco L de, Defoort F, Rajczyk R et al. (2016) Ash Characterization of Four Residual Wood Fuels in a 100 kWth Circulating Fluidized Bed Reactor Including the Use of Kaolin and Halloysite Additives. Energy & Fuels 30(10): 8304–8315. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b01784

44. Mack R, Kuptz D, Schön C et al. (2019) 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: 50–62. doi: 10.1016/j.biombioe.2019.04.003

45. Dragutinovic N, Höfer I, Kaltschmitt M (2019) Effect of additives on thermochemical conversion of solid biofuel blends from wheat straw, corn stover, and corn cob. Biomass Conversion and Biorefinery 9(1): 35–54. doi: 10.1007/s13399-017-0273-7

46. Höfer I, Kaltschmitt M (2017) Effect of additives on particulate matter formation of solid biofuel blends from wood and straw. Biomass Conversion and Biorefinery 7(1): 101–116. doi: 10.1007/s13399-016-0217-7

47. Li F, Fan H, Guo M et al. (2018) Influencing Mechanism of Additives on Ash Fusion Behaviors of Straw. Energy & Fuels 32(3): 3272–3280. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b04012

48. Hansen V, Müller-Stöver D, Munkholm LJ et al. (2016) The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: An incubation study. Geoderma 269: 99–107. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.033

49. Hansen V, Müller-Stöver D, Ahrenfeldt J et al. (2015) Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment. Biomass and Bioenergy 72: 300–308. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.10.013

50. Mroczek K, Kalisz S, Pronobis M et al. (2011) The effect of halloysite additive on operation of boilers firing agricultural biomass. Fuel Processing Technology 92(5): 845–855. doi: 10.1016/j.fuproc.2010.11.020

51. Wang L, Skjevrak G, Hustad JE et al. (2012) Effects of Additives on Barley Straw and Husk Ashes Sintering Characteristics. Energy Procedia 20: 30–39. doi: 10.1016/j.egypro.2012.03.005

52. Wang L, Skreiberg Ø, Becidan M (2014) Investigation of additives for preventing ash fouling and sintering during barley straw combustion. Applied Thermal Engineering 70(2): 1262–1269. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.075

53. Wang L, Becidan M, Skreiberg Ø (2012) Sintering Behavior of Agricultural Residues Ashes and Effects of Additives. Energy & Fuels 26(9): 5917–5929. doi: 10.1021/ef3004366

54. Obernberger I (2014) Strategy for the Application of Novel Characterization Methods for Biomass Fuels: Case Study of Straw. Energy & Fuels 28(2): 1041–1052. doi: 10.1021/ef402249x

55. Öhman M, Nordin A (2000) The Role of Kaolin in Prevention of Bed Agglomeration during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels. Energy & Fuels 14(3): 618–624. doi: 10.1021/ef990198c

56. Skoglund N, Grimm A, Öhman M et al. (2013) Effects on Ash Chemistry when Co-firing Municipal Sewage Sludge and Wheat Straw in a Fluidized Bed: Influence on the Ash Chemistry by Fuel Mixing. Energy & Fuels 27(10): 5725–5732. doi: 10.1021/ef401197q

57. Grimm A, Skoglund N, Boström D et al. (2011) Bed Agglomeration Characteristics in Fluidized Quartz Bed Combustion of Phosphorus-Rich Biomass Fuels. Energy & Fuels 25(3): 937–947. doi: 10.1021/ef101451e

58. Krzack S, Schreiner M, Boblenz K. et al. (2010) Verhalten von Aschen aus der Biomassevergasung: Schlussbericht zum Vorhaben (FZK: 22016106), Freiberg, Germany

59. Aho M, Silvennoinen J (2004) Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminium–silicon rich biomass residue and additive. Fuel 83(10): 1299–1305. doi: 10.1016/j.fuel.2004.01.011

60. Pettersson A, Åmand L-E, Steenari B-M (2009) Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction. Fuel 88(9): 1758–1772. doi: 10.1016/j.fuel.2009.03.038

61. Åmand L-E, Leckner B, Eskilsson D et al. (2006) Deposits on heat transfer tubes during co-combustion of biofuels and sewage sludge. Fuel 85(10): 1313–1322. doi: 10.1016/j.fuel.2006.01.001

62. Vamvuka D, Zografos D, Alevizos G (2008) Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds. Bioresource Technology 99(9): 3534–3544. doi: 10.1016/j.biortech.2007.07.049

63. Xiong S, Burvall J, Örberg H et al. (2008) Slagging Characteristics during Combustion of Corn Stovers with and without Kaolin and Calcite. Energy & Fuels 22(5): 3465–3470. doi: 10.1021/ef700718j

Anhang

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Dolomit	-Temperatur, an der slight/heavy sintering einsetzt (S/H) -Temperatur „start of melting“	-Rapsstroh -Weizenstroh -Gerstenstroh	-780°C(S)→ 975°C(S) 1075°C(H)→1075°C (H) T_m=1190°C→ 1580°C -920°C(S)→ 975°C(S) 1075°C(H)→1075°C (H) T_m=940°C→ 1150°C -765°C(S)→ 865°C(S) 805°C(H)→ 975°C(H) T_m=800°C→ 1220°C	4% (w/w) bezogen auf Trockenmasse Stroh	[21]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Kaolin			-780°C(S)→ 1075°C(S) 1075°C(H)→1165°C (H) T_m=1190°C→ 1340°C -920°C(S)→ 975°C(S) 1075°C(H)→1165°C (H) T_m=940°C→ 1270°C -765°C(S)→ 1075°C(S) 805°C(H)→ 1250°C(H) T_m=800°C→1370°C		
Lime-stone ($CaCO_3$)	-1:not or very little affected -2:affected by partial sintering but still retaining a porous, brittle structure -3:sintered -4:very hard, sintered structure -5:melted	-Weizenreste	Weizen: -700°C:4→1 -800°C:5→2 -900°C:5→2 -1000°C:5→2	4,5-6% bezogen auf Trockenmasse Stroh	[24]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Kaolin			Weizen: -700°C:4→1,5 -800°C:5→1,5 -900°C:5→2 -1000°C:5→3,5	4-5,5% bezogen auf Trockenmasse Stroh	
Lime-stone+ Kaolin			Weizen: -700°C:4→1 -800°C:5→1 -900°C:5→1 -1000°C:5→2	4,5-6%+4-5,5% bezogen auf Trockenmasse Stroh	
$NaHCO_3$			Melting point decrease of 100-200°C	1,5 x S-Gehalt der Asche	
Kaolin	Versuch in Verbrennungsofen, Untersuchung der anfallenden Schlacke -1:very lightly sintered, breaks at light touch -2:slightly sintered, holds together at light touch, but easily broken apart, grain structure still clearly distinguishable -3:sintered ash, still breakable, still possible to distinguish single	Haferkörner	Keine Angaben, da während der Verbrennung keine Schlacke entstand	1% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[18]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Calcit (ge-mahlen)	grains but parts have structures resembling slag with melted material (glass) -4: totally sintered, not breakable by hand, fused to larger lumps, no individual grain structure		2-3→4	3% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	
Calcit (gefällt)			2-3→4	2% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	
Kaolin	Verbrennung in Wirbelschicht-reaktor, Tag 1 bis Tag 68 ohne, ab Tag 69 mit Kaolin, Untersuchung des Bettmaterials in lab-scale bed: Messung des Gegendrucks in Abhängigkeit der Temperatur (pressure drop = agglomeration)	Rückstände aus Forstwirt-schaft	Sintering temperatures: Tag ~18: 1027 °C Tag ~63: 999 °C Tag ~88: >1100 °C	26 MW_{th}, 9 MW_{el} bei Vollast Ab Tag 69: 43 kg Kaolin/h	[7]
Lime-stone	Je 1g Asche (>0,25 mm) + Additiv auf 1000 °C erhitzt, visuelle Beurteilung: -loose ash (LA): no sintering -weak sinter (WS): fragile sinters, easily disintegrated -hard sinter (HS): heavy sinters, often slags	Gerstenstroh	0,125g: HS→HS 0,25g: HS→HS 0,5g: HS→HS 1g: HS→WS 2g: HS→LA	0,125g/0,25g/ 0,5g/1g/2g Additiv auf 1g Asche	[23]
Lime (CaO, $Ca(OH)_2$)			0,125g: HS→HS 0,25g: HS→WS 0,5g: HS→WS 1g: HS→LA 2g: HS→LA		

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Kaolin			0,125g: HS→HS 0,25g: HS→WS 0,5g: HS→LA 1g: HS→LA 2g: HS→LA		
Al_2O_3			0,125g: HS→HS 0,25g: HS→HS 0,5g: HS→HS 1g: HS→HS 2g: HS→HS		
Ophit			0,125g: HS→HS 0,25g: HS→HS 0,5g: HS→HS 1g: HS→WS 2g: HS→LA		
Dolomit			0,125g: HS→HS 0,25g: HS→HS 0,5g: HS→HS 1g: HS→WS 2g: HS→LA		
Kalzi-nierter Dolomit			0,125g: HS→HS 0,25g: HS→WS 0,5g: HS→WS 1g: HS→LA 2g: HS→LA		

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Halloysit ($Al_4(OH)_8$/ Si_4O_{10} x 10 H_2O)	Additiv bereits vor Veraschung zugegeben, anschließend t_s (sintering), t_a (softening), t_b (melting) bestimmt	-Weizenstroh -Rapsstroh -Mischung aus Raps- und Getreide-stroh (80%/20%) (w/w)	-1%: t_s:840°C→850°C t_a:960°C→1080°C t_b:1180°C→1240°C -2%: t_s:770°C→790°C t_a:1250°C→1180°C t_b:1330°C→1200°C 4%: t_s:770°C→1100°C t_a:1250°C→1210°C t_b:1330°C→1240°C -1%: t_s:610°C→790°C t_a:1170°C→1120°C t_b:1190°C→1170°C 2%: t_s:610°C→830°C t_a:1170°C→1110°C t_b:1190°C→1160°C 3%: t_s:610°C→760°C t_a:1170°C→1150°C t_b:1190°C→1190°C	-1% -2%, 4% -1%, 2%, 3% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[50]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Klär-schlamm	AFT→IDT, ST, HT, FT sintering degree: 1-loose ash related to residues without any aggregates 2-slightly sintered ash, fragile structure that is easily broken 3-hard sintered ash related to partial melting of the residues 4-very hard sintered ash with the formation of slags difficult to break 5-completely melted ash	Weizenstroh	IDT:698°C→932°C(1%), 990°C(3%), 1004°C (5%) ST:790°C→1100°C(1%), 1160°C(3%), 1230°C(5%) HT:852°C→1124°C(1%), 1282°C(3%), 1326°C(5%) FT:916°C→1238°C(1%), 1308°C(3%), 1368°C(5%) 700°C:2→1 800°C:4→1 900°C:5→2 1000°C5→2,5	AFT: 1%, 3%, 5% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse sintering behavior: 5% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[37]
Schlamm aus Marmor-verar-beitung			IDT:698°C→938°C(1%), 1024°C(3%), 1044°C(5%) ST:790°C→998°C(1%), 1078°C(3%), 1116°C(5%) HT:852°C→1138°C(1%),1170°C(3%), 1198°C(5%) FT:916°C→1264°C(1%), 1292°C(3%), 1324°C(5%) 700°C:2→1 800°C:4→1 900°C:5→1,5 1000°C5→2,5		

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Ton-schlamm			IDT:698°C→874°C(1%), 924°C(3%), 956°C(5%) ST:790°C→926°C(1%), 988°C(3%), 1026°C(5%) HT:852°C→980°C(1%), 1040°C(3%), 1108°C(5%) FT:916°C→1004°C(1%), 1081°C(3%), 1156°C(5%) 700°C:2→1 800°C:4→1 900°C:5→2 1000°C5→3,5		
Kaolin	AFT→IDT, ST, HT, FT 1: loose ash residues 2: slightly sintered ash, brittle structure 3: sintered ash, partial melting 4: very hard sintered ash, slag formation 5: completely melted	Gerstenstroh	IDT:950°C→1150°C ST:1000°C→1250°C HT:1200°C→1350°C FT:1250°C→1400°C 700°C:2→1 800°C:3→1 900°C:3,5→2 1000°C:5→2	4% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[51]
Calcit			IDT:950°C→1050°C ST:1000°C→1200°C HT:1200°C→1300°C FT:1250°C→1375°C		

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
			700°C:2→1 800°C:3→1 900°C:3,5→2 1000°C:5→2,5		
Kaolin	AFT→IDT, ST, HT, FT loose ash slightly sintered completely melted	Roggenstroh	IDT:840°C→1080°C ST:992°C→1180°C HT:1048°C→1268°C FT:1110°C→1310°C 700°C:loose ash→loose ash 800°Cslightly sintered:→loose ash 900°C:completely melted→slightly sintered 1000°C:completely melted→slightly sintered	4% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[30]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Calcit			IDT:840°C→990°C ST:992°C→1210°C HT:1048°C→1290°C FT:1110°C→1360°C 700°C:loose ash→ loose ash 800°C:slightly sintered:→ loose ash 900°C:completely melted→ loose ash 1000°C:completely melted→ loose ash		
Kaolin	AFT→IDT, ST, HT, FT 1: loose ash 2: slightly sintered ash 3: hard sintered 4: very hard sintered ash 5: completely melted	Gerstenstroh	IDT:875°C→1025°C ST:975°C→1125°C HT:1025°C→1300°C FT:1075°C→1375°C 700°C:2→1 800°C:3→1 900°C:4→1 1000°C:5→2	4% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[52]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Zeolith 24A			IDT:875°C→1000°C ST:975°C→1050°C HT:1025°C→1250°C FT:1075°C→1300°C 700°C:2→1 800°C:3→1 900°C:4→2 1000°C:5→2,5		
MgO	AFT→D_T (Deformationtemperature)	Weizenstroh	0,25%:760°C→850°C 0,5%:760°C→890°C 0,75%:760°C→1020°C 1%:760°C→1150°C	0,25% 0,5% 0,75% 1% bezogen auf Aschemenge	[28]
CaO			0,25%:760°C→840°C 0,5%:760°C→880°C 0,75%:760°C→890°C 1%:760°C→1020°C		
Kaolin	AFT→IDT, ST, HT, FT 1: loose ash 2: partial sintering, fragile structures 3: hard sintering, partial melting 4: very hard sintered ash, slag formation 5: completely melted	Weizenstroh	IDT:700°C→990°C ST:790°C→1080°C HT:850°C→1240°C FT:910°C→1330°C 700°C:2→1 800°C:4→1 900°C:5→2 1000°C:5→2,5	4% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[53]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Zeolith 24A			IDT:700°C→970°C ST:790°C→1040°C HT:850°C→1190°C FT:910°C→1310°C 700°C:2→1 800°C:4→2 900°C:5→2 1000°C:5→3		
Zeolith Y			IDT:700°C→760°C ST:790°C→900°C HT:850°C→1010°C FT:910°C→1080°C 700°C:2→1 800°C:4→2 900°C:5→3 1000°C:5→4		
Kaolin	AFT→shrinkage starting (SS), deformation (D), hemisphere (H), flow (F)	Weizenstroh	-1%: SS: 780°C→1160°C D: 1010°C→1220°C H: 1070°C→1240°C F: 1130°C→nicht eingetreten -4%: SS: 780°C→1330°C D: 1010°C→1340°C H: 1070°C→1370°C	1%, 4%, 7% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[26]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
			F: 1130°C→1440°C -7%: SS: 780°C→1310°C D: 1010°C→1330°C H: 1070°C→1380°C F: 1130°C→1450°C		
Kaolin	AFT→shrinkage-starting temperature	Stroh	1%:780°C→1170°C 4%:780°C→1320°C 7%:780°C→1310°C	1%, 4%, 7% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[54]
Kaolin	initial bed agglomeration temperatures (IBAT) Druckänderungen bei variierter Temperatur gemessen	Weizenstroh	IBAT: 750°C→890°C	10% (w/w) bezogen auf Bettmaterial	[55]
Torf 1	Verbrennung in kommerziell erhältlichem Pellet-Ofen, anschließende Bestimmung des Anteils an Verschlackung bezüglich der gesamten, angefallenen Asche (slag fraction SF)	Weizenstroh	SF: 70%→50%	40% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[22]
Torf 2			SF: 70%→50%		
Torf 3			SF: 70%→75%		
kom-munaler Klär-schlamm	Verbrennung in Bewegtbettreaktor, initial defluidization temperatures (IDT) bestimmt über Aufzeichnung von Druckänderungen bei variierter Temperatur	Weizenstroh	IDT: 750°C→970°C	90% Stroh + 10% Klärschlamm (w/w)	[56]
Calcium-saccharat	Vergasung, anschließend Bestimmung des sintering and agglomeration index (SAI)	Weizenstroh	SAI: unverändert bei 3	1%, 2%, 3% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[29]
		Gerstenstroh	SAI: 1%: 3→1,5 2%:3→1 3%:3→0,5		
wheat		Weizenstroh	IDA:	50% bezogen	[57]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
distillers dried grain with solubles (DDGS)	Verbrennung in Wirbelschichtreaktor, initial defluidization temperatures (IDT) bestimmt über Aufzeichnung von Druckänderungen bei variierter Temperatur		750°C→vollständige defluidization schon bei ~730°C	auf Ausgangs-trockenmasse	
Phosphorsäure conc.			IDA: 750°C→880°C	Zugabe so, dass molarer Anteil an P/K von 0,13 auf 0,5 erhöht wurde	
Sand	Wärmebehandlung der Aschen bei 700°C-1100°C, anschließend visuelle Beurteilung der Asche	Weizenstroh	700°C:feinkörnige Asche→feinkörnige Asche 900°C:geschmolzen → geschmolzen 1100°C:komplett geschmolzen→komplett geschmolzen	10% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[58]
Kaolinit			700°C:feinkörnige Asche→feinkörnige Asche 900°C:geschmolzen → nur gesintert mit lokalen Schmelzen 1100°C:komplett geschmolzen→komplett geschmolzen		

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Calcit			700°C:feinkörnige Asche→feinkörnige Asche 900°C:geschmolzen → nur gesintert mit lokalen Schmelzen 1100°C:komplett geschmolzen→komplett geschmolzen		
Lime-stone als Bett-material bei fluidized bed combus-tion	optische Beurteilung im Vergleich zur Verwendung von SiO_2 als Bettmaterial	-Brassica -Distel -Mandel-schalen	-Brassica: sowohl bei SiO_2 als auch bei Limestone keine Agglomerisierung -Distel: SiO_2: Agglomerisierung, Limestone: keine Agglomerisierung -Mandelschalen: SiO_2: Agglomerisierung, Limestone: keine	-	[2]
Papier-faser-schlamm	Messung der deposition rate in g/m²*h: Verbrennung in fluidised bed, anhand von Wärmetauscheroberfläche in Reaktor wird Masse der Ablagerungen gemessen	Pinienrinde	bei 400°C Oberflächen-temperatur: 5%: 55 g/m²*h→ 41 g/m²*h 12%:55 g/m²*h→ 21 g/m²*h bei 500°C Oberflächen-temperatur: 5%:15 g/m²*h→ 31 g/m²*h 12%:15 g/m²*h→	5%, 12% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[59]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
			22 g/m²*h		
Kaolin			bei 400°C Oberflächen-temperatur: 55g/m²*h→22 g/m²*h bei 500°C Oberflächen-temperatur: 15 g/m²*h→6 g/m²*h	2% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	
Kaolin	Abgasmessung während Verbrennung in circulating fluidised bed-Reaktor	80% Holzpellets, 20% Strohpellets	KCl: 27 ppm →19 ppm HCl: 60 ppm → 75 ppm SO_2: 20 ppm → 15 ppm	40 kg/h	[60]
Zeolith (Doucil 24A)			KCl: 27 ppm → 22 ppm HCl: 60 ppm → 90 ppm SO_2: 20 ppm → 10 ppm	molares Verhältnis Zeolith/ein-gehende Kaliummenge =1,1	

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
Schwefel			KCl: 27 ppm → 10 ppm HCl: 60 ppm → 65 ppm SO_2: 20 ppm →225 ppm	4 kg/h	
Klär-schlamm	Verbrennung in circulating fluidised bed, Messung der Verunreinigungsmenge an Rohr in Abgasstrom	Holz (Abfälle + Pellets)	400 mg/m²*h → 175 mg/m²*h	13% der Aus-gangstrocken-masse	[61]
Sand	Verbrennung von Strohpellets in full scale Verbrennungsreaktor Beurteilung des Reaktorbetriebs Messung der Ablagerungsmenge an Wärmetauschermaterial	Weizenstroh-pellets	Ablagerungen: 55 g/h/m² →25 g/h/m² Reaktorbetrieb: kein Einfluss	4,4% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[31]
CaHPO4 *2H20			Ablagerungen: 55 g/h/m² →10 g/h/m² Reaktorbetrieb: negative Beeinflussung	4,0% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	
Kalk			Ablagerungen: 55 g/h/m² →165 g/h/m² Reaktorbetrieb: negative Beeinflussung	4,6% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	
Bentonit (Al2O3 *2SiO2)			Ablagerungen: 55g/h/m² → 35 g/h/m² Reaktorbetrieb: kein Einfluss	2,5% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	
Kaolinit	Verbrennung in lab-scale fluidised bed Reaktor, Messung der Hauptkomponenten in erzeugter Flugasche (K als K_2O angegeben)	Olivenkerne Olivenholz	Olivenkerne: w(K_2O) = 10% → 3% Olivenholz:	5% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse	[62]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
			$w(K_2O)$ = 4% → 3,5%		
Klino-chlor			Olivenkerne: $w(K_2O)$ = 10% → 2,5% Olivenholz: $w(K_2O)$ = 4% → 2%		
Ankerit			Olivenkerne: $w(K_2O)$ = 10% → 2% Olivenholz: $w(K_2O)$ = 4% → 1%		
Kaolin	Verbrennung in small-scale-Reaktor, Untersuchung der erzeugten Asche: Standard AFT oxidierend, Anteil der erzeugten Asche, der verschlackt vorliegt	corn stover (Maisrest-pflanze: Blätter, Stängel)	AFT: 1% IT 1170°C → 1270°C ST 1180°C → 1280°C HT 1200°C → 1310°C FT 1230°C → 1330°C 2% IT 1170°C → 1350°C ST 1180°C → 1360°C HT 1200°C → 1370°C FT 1230°C → 1390°C 3% IT 1170°C → 1370°C	AFT: 1%, 2%, 3% bezogen auf Ausgangs-trockenmasse, Schlackeanteil nur mit 3%	[63]

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
			ST 1180°C → 1380°C HT 1200°C → 1390°C FT 1230°C → 1390°C Schlackeanteil 40,6% → 20,0%		
Calcit			AFT: 1% IT 1170°C → 1170°C ST 1180°C → 1190°C HT 1200°C → 1210°C FT 1230°C → 1220°C 2% IT 1170°C → 1240°C ST 1180°C → 1260°C HT 1200°C → 1280°C FT 1230°C → 1290°C 3% IT 1170°C → 1290°C ST 1180°C → 1300°C		

Additiv	Beurteilungsmethode	Biomasse	Ergebnis	Zugegebene Menge	Re-ferenz
			HT 1200°C → 1320°C FT 1230°C → 1330°C Schlackeanteil 40,6% → 13,3%		