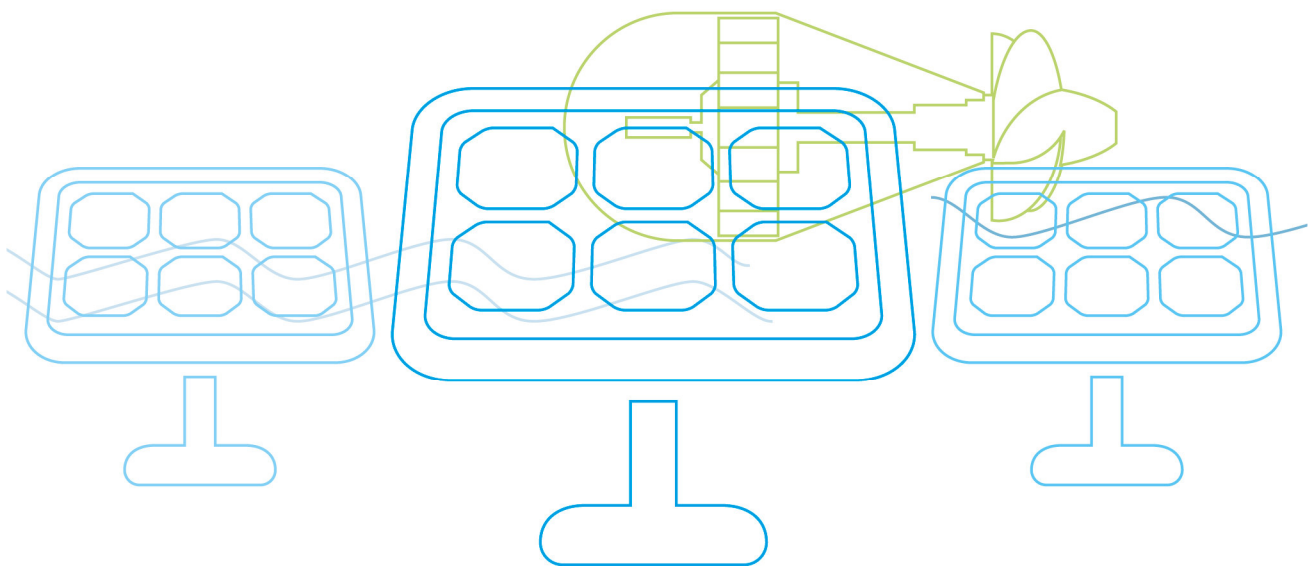




AgroAdd-Brennstoffe

Additiveinsatz zur Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „e!Mission.at“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

AgroAdd-Brennstoffe - Additiveinsatz zur Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe

AutorInnen:

Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger (Institut für Prozess- und Partikeltechnik, TU Graz)

Dipl.-Ing. Dr. Thomas Brunner (Institut für Prozess- und Partikeltechnik, TU Graz)

Dipl.-Ing. Michael Wohlmuther (Institut für Prozess- und Partikeltechnik, TU Graz)

Dipl.-Ing. Dr. Friedrich Biedermann (BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH)

Dipl.-Ing. Dr. Christoph Mandl (BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH)

Dipl.-Ing. Wilfried Pichler (Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Ausgangssituation/Motivation des Projektes.....	5
2.2	Zielsetzungen des Projektes	6
2.3	Methodik und Aufbau der Arbeit	7
3	Inhaltliche Darstellung	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	10
4.1	Erstellen einer Biomasse- und Additivdatenbank.....	10
4.2	Weiterentwicklung moderner Brennstoffcharakterisierungswerkzeuge	11
4.3	Entwicklung einer Strategie zur Additivierung landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe	14
4.4	Herstellung von kompaktierten additivierten landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffen.....	16
4.5	Testläufe an einer Pilot-Rostfeuerungsanlage	17
4.6	Wirtschaftliche, technologische und ökologische Bewertung	20
4.7	Additivierungsleitfaden	22
5	Ausblick und Empfehlungen.....	24
6	Literaturverzeichnis	25
7	Anhang	26
7.1	Abbildungsverzeichnis.....	26
7.2	Tabellenverzeichnis.....	26
8	Kontaktdaten.....	27

2 Einleitung

2.1 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

In der Wärme- und Stromerzeugung spielt Biomasse eine immer größere Rolle, wobei vorwiegend holzartige Brennstoffe eingesetzt werden. Die daraus resultierende steigende Nachfrage nach diesen Sortimenten wirkt sich in entsprechenden Preissteigerungen aus. Aus diesem Grund ist es zweckmäßig, auch landwirtschaftliche Biomasse zur energetischen Nutzung heranzuziehen. Allerdings führen die, im Vergleich zu holzartiger Biomasse, deutlich unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen landwirtschaftlicher Brennstoffe (erhöhte N, S, Cl, K und Aschegehalte) bei der thermischen Konversion in konventionellen, für Holz konzipierten, Feuerungen in der Regel zu Betriebsproblemen.

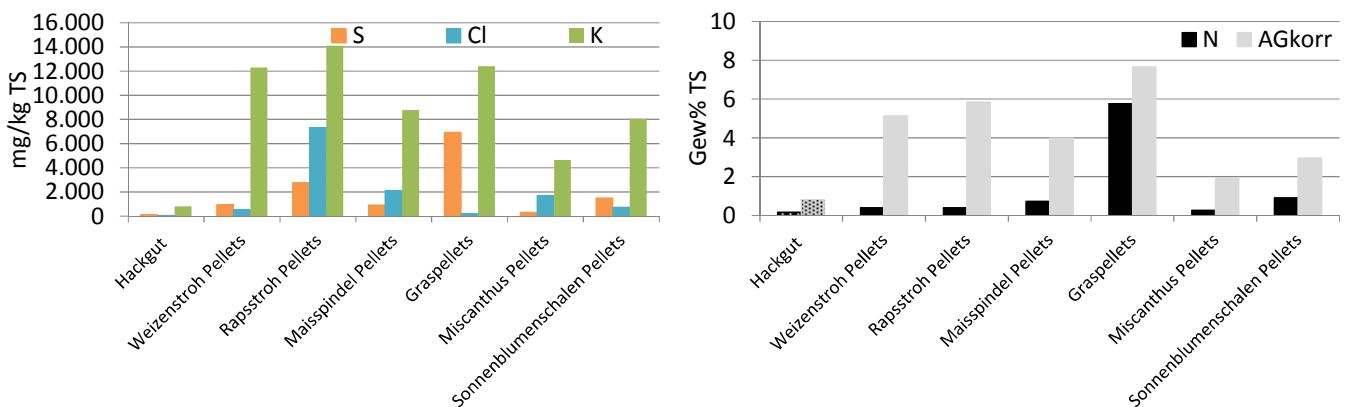


Abbildung 1: S, Cl, K-, N- und Aschegehalte unterschiedlicher Biomasse-Brennstoffe

Erläuterungen: AG_{kor} ... CO₂-freier Aschegehalt

In Abbildung 1 sind die S, Cl, K-, N- und Aschegehalte von unterschiedlichen landwirtschaftlichen Biomasse-Sortimenten und Hackgut gegenübergestellt. Die Daten stammen aus Einzelanalysen, die aber eine repräsentative Zusammensetzung für das jeweilige Sortiment zeigen. Sehr gut zu erkennen sind die im Vergleich zu Hackgut zum Teil deutlich höheren K-Konzentrationen in landwirtschaftlichen Brennstoffen. Das teilweise in die Gasphase freigesetzte K reagiert zu einem großen Teil mit Cl und S, deren Konzentrationen häufig höher als in holzartiger Biomasse sind. Bei Abkühlung des Rauchgases kondensieren diese Verbindungen (KCl, K₂SO₄) und bilden Aerosole (Feinstaub) oder lagern sich als Depositionen an kühleren Stellen in der Anlage (z.B. auf Wärmetauschoberflächen) ab. Das Potential für Aerosol- bzw. Depositionsbildung ergibt sich aus der freigesetzten K-Menge, die wiederum vom freigesetzten K-Anteil und der K-Konzentration im Brennstoff bestimmt wird. In der Rostasche unterstützen hohe K-Konzentrationen die Bildung von niedrigschmelzenden K-Si-Phasen. Große Anteile dieser Phasen resultieren in niedrigen Ascheschmelzpunkten und tragen zu verstärkter Bildung von versinterten Agglomeraten und Verschlackungen bei. In Kombination mit den meist deutlich höheren Aschegehalten der landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffe kann dies zu instabilen Feuerungsbedingungen und Störungen des Anlagenbetriebs führen. Auf Grund der höheren N-Konzentrationen landwirtschaftlicher Biomasse-Sortimente können bei deren Verbrennung Sekundärmaßnahmen zur Minderung der NO_x-Emissionen erforderlich werden.

Der gezielte Einsatz von anorganischen Brennstoff-Additiven stellt eine prinzipiell interessante Möglichkeit dar, das (Ascheschmelzverhalten) ASV und die K-Freisetzung positiv zu beeinflussen. Die Wahl und Dosierung der Additive hängt dabei stark davon ab, welche Brennstoffeigenschaften (ASV, K-Freisetzung) in welchem Ausmaß beeinflusst werden sollen. Zusätzlich müssen bei der Auswahl und Dosierung von Additiven auch deren Verfügbarkeiten sowie ökonomische Aspekte beachtet werden. Brennstoffadditivierungen wurden bislang lediglich auf experimenteller Basis untersucht und es existieren derzeit keine Strategien für eine gezielte Additivauswahl und -dosierung, die die chemische Zusammensetzung des Brennstoffes, die zu beeinflussenden Brennstoffeigenschaften sowie technologische wie auch ökonomische Aspekte berücksichtigen.

Motivation des Projektes war es, eine Strategie zur gezielten Definition von Brennstoff-Additiv-Mischungen in Form eines Additivierungsleitfadens zu erarbeiten, die die Interaktionen zwischen Brennstoff und Additiv berücksichtigt. Dieser Leitfaden soll es dem Anwender ermöglichen, zielgerichtet problematische landwirtschaftliche Biomasse-Brennstoffe durch Additivierung für den Einsatz in herkömmlichen Feuerungsanlagen für holzartige Biomasse zu optimieren und somit bislang ungenutzte Rohstoff-Potentiale für die Energieerzeugung nutzbar zu machen.

2.2 Zielsetzungen des Projektes

Die Projektziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entwicklung einer optimierten Additivierungsstrategie für landwirtschaftliche Biomasse auf Basis der Weiterentwicklung bereits zur Verfügung stehender fortschrittlicher Brennstoffcharakterisierungswerkzeuge und deren Validierung in Form von Laborreaktortests.
- Entwicklung einer Strategie zur Optimierung von Brennstoff-Additiv-Kombinationen, die die Interaktionen der für das Projekt ausgewählten Brennstoffe mit spezifischen Additiven entsprechend berücksichtigt.
- Durchführung von Testläufen mit auf Basis dieser Strategie definierten Brennstoff-Additiv-Mischungen um die Strategie zu validieren, ihre Praxistauglichkeit zu untersuchen und die Vorteile der gezielten Additivierung demonstrieren zu können. Diese Testläufe umfassen:
 - Pelletierungstests zur Optimierung der Herstellung der Brennstoff-Additiv-Mischungen sowie
 - gezielte Verbrennungstests an einer repräsentativen Holzfeuerung (Rostfeuerung) mit begleitenden Messungen, Probenahmen und Analysen zur Überprüfung der Wirkung der Additive auf die feuerungstechnischen Eigenschaften der Brennstoffe.
- Durchführung von technologischen, ökonomischen und ökologischen Bewertungen der neuen Technologie und Ausarbeitung eines finalen Additivierungsleitfadens.
- Verbreitung des erlangten Know-How.

Die Projektergebnisse, speziell der finale Additivierungsleitfaden, sollten ein methodisches Vorgehen bei der Auswahl von Brennstoff-Additiv-Mischungen ermöglichen, um landwirtschaftliche Biomasse-Brenn-

stoffe durch Zumischen von anorganischen Additiven für den Einsatz in konventionellen Holz-Feuerungen zu optimieren.

2.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung der Projektziele wurde eine grundsätzliche Methodik entwickelt, die auf der Kombination von theoretischen Betrachtungen zum Schmelzverhalten von Aschen und der K-Freisetzung mit experimentellen Untersuchungen zur Validierung beruhte. Die theoretischen Betrachtungen waren die Prognose des ASV und der K-Freisetzung mittels Brennstoff-Indexen (BSI) und thermodynamischen Hochtemperatur-Gleichgewichtsberechnungen (HT-GGB). Mit Hilfe dieser Instrumente sollte basierend auf Brennstoff-Analysen ein grundsätzliches Verständnis der Wirkung von unterschiedlichen Additiven auf erlangt werden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden geeignete Additive brennstoff-spezifisch ausgewählt. Begleitend zu den theoretischen Betrachtungen wurden Laborreaktor-Versuche durchgeführt. Die Validierung der Additivierungsstrategie erfolgte durch Versuche mit definierten Brennstoff-Additiv-Mischungen an einer Pilot-Rostfeuerungsanlage. Auf diesen methodischen Elementen bauten die Arbeitspakete des Projektes auf, die im Folgenden kurz umrissen werden.

3 Inhaltliche Darstellung

Zu Beginn wurden landwirtschaftliche Biomasse-Brennstoffe und Additive hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit im Projekt überprüft und Daten zu Marktverfügbarkeit, Marktpotential sowie Preisentwicklung erhoben. Dazu wurden Marktanalysen sowie Brennstoff- und Additivanalysen und feuerungstechnische Bewertungen durchgeführt. Bezüglich des Marktpotentials wurde darauf geachtet, dass Konkurrenzierungen mit bestehenden energetischen Verwertungsketten oder dem Nahrungs- oder Futtermittelmarkt ausgeschlossen wurden. Des Weiteren wurden Informationen zu einsetzbaren Additiven bezüglich möglicher Lieferanten, Verfügbarkeiten und Preisen aktualisiert. Additive, die mit anderen Verwertungsketten konkurrieren (z.B. Additive auf Phosphor-Basis mit P als Düngemittel) wurden von den Untersuchungen ausgeschlossen.

Im nächsten Schritt wurde intensiv an der Weiterentwicklung bzw. Anpassung moderner Brennstoffcharakterisierungswerkzeuge (BSI, HT-GGB) gearbeitet. Grundsätzlich haben diese Werkzeuge schon ihre Anwendbarkeit bei der Charakterisierung von Biomasse-Brennstoffen unter Beweis gestellt, jedoch erforderte die Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung durch die Additivierung eine Überprüfung ihrer Anwendbarkeit und Adaptierungen hinsichtlich der zu berücksichtigenden Elemente. Dies betraf beispielsweise Al, dessen Konzentration durch die Verwendung von Additiven auf Al-Si-Basis in den Brennstoffen deutlich erhöht wird, in den Brennstoff-Indexen jedoch bislang nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Die angepassten BSI und das adaptierte HT-GGB-Modell wurden verwendet, um basierend auf der chemischen Zusammensetzung von landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffen geeignete Additive zur Beeinflussung des ASV und der K-Freisetzung auszuwählen. Für die HT-GGB wurde das Softwarepaket FACTSAGE angewendet. Dieses besteht aus einer Reihe von Berechnungsmodulen sowie Datenbanken. Die für die Berechnungen angewendeten Datenbanken enthalten Parameter für ein breites Spektrum an Mischphasen und reinen Verbindungen. Um Verbindungen, die

lediglich in vernachlässigbaren Konzentrationen in den projektrelevanten Biomasse-Brennstoffen bzw. Aschen und Additiven auftreten, auszuschließen und somit realistische Ergebnisse in vertretbarer Berechnungszeit zu erhalten, wurde der Eingabedatensatz, basierend auf ersten Testrechnungen mit typischen Zusammensetzungen von landwirtschaftlichen Brennstoffen, auf die Elemente C, H, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Zn, Pb und Cu beschränkt. Die Berechnungen wurden in einem Temperaturbereich von 500°C bis 1600°C durchgeführt. Um eine genauere Vorhersage der Freisetzung von Aschenbildnern zu erzielen, wurde eine Zwei-Schritt-Berechnungsstrategie eingesetzt. Dabei wird berücksichtigt, dass der Verbrennungsprozess von trockener Biomasse in zwei Hauptphasen (Flüchtigenfreisetzung und Holzkohlenausbrand) unterteilt werden kann. In Festbett-Feuerungsanlagen herrschen während der Flüchtigenfreisetzung in der Regel Temperaturen von deutlich unter 1.000°C und reduzierende Atmosphäre vor, während die Holzkohlenverbrennung bei oxidierenden Bedingungen und Temperaturen von typischerweise mehr als 1.000°C abläuft.

Dem entsprechend erfolgte ein erster Berechnungsschritt unter reduzierender Atmosphäre, bei dem der gesamte trockene Brennstoff sowie die Verbrennungsluft als Eingangsströme berücksichtigt wurden. Die Berechnungen wurden bei 700°C (Erfahrungswert aus Laborreakortests für die Phase der Flüchtigenfreisetzung) ausgewertet. Für den nachfolgenden 2. Berechnungsschritt wurden die festen Phasen und flüssigen Phasen (nicht aber die gasförmigen Phasen) aus Schritt 1 (bei 700°C), ein aus der Literatur abgeleiteter Holzkohleanteil von 15 Gew% TS der organischen Ausgangssubstanz sowie die Verbrennungsluft (nun für oxidierende Bedingungen) als Ausgangszusammensetzung verwendet. Die HT-GGB wurden für Temperaturen von 500°C bis 1.600°C ausgewertet. Die Freisetzung von Aschenbildnern in die Gasphase wurde aus der Summe der während Schritt 1 und Schritt 2 (bei 1.200°C – Erfahrungswert bzgl. typischer Brennstoffbett-Maximaltemperaturen aus Laborreakortests) freigesetzten Komponenten berechnet. Die Beurteilung des Ascheschmelzverhaltens erfolgte an Hand der Ergebnisse von Schritt 2.

Basierend auf der Charakterisierung der Brennstoffe mit den BSI und HT-GGB wurden in der Folge mehrere reine Brennstoffe und Brennstoff-Additiv-Mischungen ausgewählt und für die Verbrennungsversuche in einem Laborreaktor produziert. Beim eingesetzten Laborreaktor handelt es sich um einen, speziell für die Simulation des Brennstoffabbrandes am Rost konzipierten, chargenweise betriebenen Reaktor. Nähere Informationen dazu können [1] entnommen werden. Die Testläufe liefern Informationen zum thermischen Zersetzungsverhalten von Biomassebrennstoffen, zur Freisetzung von aschebildenden Elementen sowie Hinweise zum ASV. Die Ergebnisse der Laborreakortests wurden nachfolgend zur Validierung und Optimierung der eingesetzten Brennstoffcharakterisierungswerkzeuge herangezogen.

Auf Basis der BSI, der HT-GGB und der Laborreakortests erfolgte die Erarbeitung einer Methodik zur Additivauswahl. Diese sollte die Identifikation aschebedingter Probleme, die Identifikation der für diese Probleme verantwortlichen Elemente bzw. Komponenten, daraus abgeleitet die Anforderungen an das einzusetzende Additiv, die Additiv-Auswahl, die Wahl der optimalen Brennstoff-Additiv-Mischung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte und die Betrachtung relevanter Aspekte des Einsatzes der additivierten landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffe in Holzfeuerungsanlagen (z.B. gasförmige Emissionen, Korrosion, Brennstoffördertechnik) abdecken. Die Methodik basiert auf der Anwendung der erarbeiteten Charakterisierungsmethoden zur Definition geeigneter Brennstoff-Additiv-Mischungen und zu deren feuerungstechnischen Beurteilung.

Im Zuge der Produktion von Brennstoffen für Testläufe an einer Pilot-Feuerungsanlage wurden zuerst Pelletierungstests durchgeführt und darauffolgend mit den optimierten Prozessparametern die Brennstoffe produziert. Die Zerkleinerung der Rohstoffe erfolgte mit einer mobilen Hammermühle bzw. mit einer Kollermühle. Die eigentliche Pelletieranlage bestand im Wesentlichen aus einer Konditioniereinrichtung zum Einstellen der Endfeuchte, der Pelletpresse, einem Gleichstrom-Kühler und Förderaggregaten zwischen den Komponenten. Die Additive wurden an der letztmöglichen Stelle direkt vor der Pelletpresse zugemischt. Ziel der Arbeiten war es, die Zumischung der Additive zur Biomasse, die Homogenität der Mischungen, Anlageneinstellungen zur effizienten Kompaktierung sowie die Qualität der Pellets zu untersuchen und wirtschaftlich sowie technologisch zu bewerten. Als Indikator für die Mischungsgüte wurde der Aschegehalt der additivierten Brennstoffe herangezogen. Hinsichtlich der Stoffströme hat der Feinanteil den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. In den Technikumsversuchen wurde die Menge des Feinanteils ermittelt, jedoch nicht wie in der industriellen Anwendung in den Primärrohstoff rezirkuliert. Auf Grund des limitierenden Durchsatzes der Förderaggregate zwischen den Anlagenkomponenten der Pelletieranlage konnte nicht der maximal mögliche Durchsatz der Pelletpresse gefahren werden. Die Ermittlung der maximal möglichen Durchsatzleistung für den jeweiligen Versuchs-Brennstoff sowie ein Vergleich mit der Pelletierung von Holz hinsichtlich des Energieverbrauchs erfolgten mit einem Lastkurvenmodell der HFA.

Die reinen und additivierten Brennstoffe wurden in Rahmen von Testläufen an einer Pilot-Rostfeuerungsanlage hinsichtlich ihrer feuerungstechnischen Eigenschaften untersucht, um die Additivierungsstrategie zu prüfen und zu bewerten. Während der Testläufe wurden alle relevanten Anlagenbetriebsparameter (Luft- und Rauchgasmengen, Drücke und Temperaturen von Luft und Rauchgas vor und nach der Anlage, Feuerraumtemperaturen, Kesselwassermenge, Vor- und Rücklauftemperatur) sowie die Rauchgaszusammensetzung (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , org. C) kontinuierlich aufgezeichnet und die HCl - und SO_x -Emissionen (VDI 3480), die Gesamtstaubemissionen nach Kessel (TSP – VDI 2066) und Feinstaubemissionen nach Kessel (Niederdruck-Kaskadenimpaktor) diskontinuierlich gemessen. Zusätzlich wurden Depositionssondenmessungen zur Evaluierung der Depositionsaufbauzeiten auf Wärmetauschoberflächen durchgeführt sowie die Aschenfraktionen aus der Anlage getrennt ausgewogen und beprobt. Proben der eingesetzten Brennstoffe und der angefallenen Aschen wurden bezüglich aller relevanten aschebildenden Elemente analysiert und darauf aufbauend Massen-, Energie- und Elementbilanzen um die Feuerung erstellt. Zusätzlich wurden Verschlackungen vom Rostbereich beprobt und mittels SEM/EDX-Analyse hinsichtlich Struktur und Zusammensetzung der geschmolzenen Phasen analysiert. An Hand der Ergebnisse der Messungen und Analysen konnte die Wirkungsweise der eingesetzten Additive untersucht und bewertet werden.

Abschließend wurde die gesamte Additivierungsstrategie einer technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung unterzogen. Es wurden nicht nur die direkt durch die Additivierung beeinflussten Effekte (Rohstoffkosten, Beeinflussung des ASV und der K-Freisetzung) sondern auch gasförmige und partikelförmige Emissionen bei der Verbrennung sowie notwendige Anpassungen der Lagerung und Fördertechnik (Brennstoff, Asche) und die Aschenverwertung geprüft. Die Bewertung stützt sich auf die Bewertungen der Testläufe an der Pilotanlage, wirtschaftliche Untersuchungen (Rohstoffe, Brennstoffproduktion) und ökologische Analysen (Emissionen).

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Erstellen einer Biomasse- und Additivdatenbank

Es wurde eine Datenbank mit relevanten landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffen angelegt. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenndaten von für das Projekt als relevant eingestuftem Brennstoffen zusammengefasst. Zur Abschätzung des ASV wurde das molare $(\text{Si}+\text{P}+\text{K})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ -Verhältnis herangezogen (sinkende Schmelztemperaturen mit steigenden Werten), wobei Werte >2 auf Ascheerweichungstemperaturen von unter 1.000°C hinweisen. Steigende Werte des molaren K/Si -Verhältnisses weisen auf verstärkte K-Freisetzung in die Gasphase hin. Als akzeptabel wurden Werte von $<0,5$ angesehen. Erläuterungen zu den BSI erfolgen in Abschnitt 4.2. Die Akquirierung der Daten zu den chemischen Zusammensetzungen erfolgte aus eigenen Quellen sowie öffentlich zugänglichen Datenbanken bzw. beruht auf Erfahrungswerten (Verfügbarkeit, Verarbeitbarkeit).

Tabelle 1: Projektrelevante landwirtschaftliche Biomasse-Brennstoffe

Erläuterungen: allgemein sind die Preise für landwirtschaftliche Biomasse starken saisonalen Schwankungen unterworfen; Verarbeitbarkeit: 1 ... sehr gut, 6 ... sehr schlecht

Biomasse	$(\text{Si}+\text{K}+\text{P})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ [mol/mol]	K/Si [mol/mol]	Potential	Verfügbarkeit	Preis [€/t]	Verarbeitbarkeit
Weizenstroh	6,8 - 6,9	0,2 - 0,4	sehr hoch	sehr gut	85	1
Heu	3,7	2,1	sehr hoch	sehr gut	115	2
Miscanthus	3,1	0,2	niedrig	mittelmäßig	130	3
Rapsstroh	0,6 - 2,3	0,4 - 11,3	hoch	gut	120	4
Sonnenblumenschalen	1,4 - 2,4	1,5 - 24,2	niedrig	sehr gut	80 - 90	5
Maisspindel	9,5 - 10,7	1,4 - 2,6	mittelmäßig	saisonal/regional unterschiedlich	200	6

Tabelle 2: Projektrelevante Additive

Erläuterungen: MW ... Mittelwerte aus mehreren vorliegenden Analysen (Herstellerangaben); n.n. ... nicht nachweisbar; Preis für Kaolin bei einer Abnahme von mindestens 24 t; Preis für Bentonit für eine Abnahme von 5 t in 25 kg-Säcken, Preis für Dolomit bei Abnahme mit Silo-LKW, bei Säcken oder BigBags wird eventuell ein Minderaufschlag eingehoben; Preis für Steinkohlenflugasche basiert auf langfristigen Lieferverträgen bei einer Abnahme von 200 t/Jahr

Additiv	Si [mg/kg]	K [mg/kg]	P [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Al [mg/kg]	Verfügbarkeit [-]	Preis [€/t]
Kaolin (MW)	215.000	8.720	n.n.	450	650	206.170	gut	345
Bentonit (MW)	274.220	6.560	105	23.240	22.160	97.960	gut	370
Bauxit	30.060	170	n.n.	290	240	301.960	gut	400
Kalkstein	1.870	n.n.	n.n.	393.280	2.900	530	gut	100
Dolomit (MW)	13.790	420	n.n.	219.480	125.300	3.710	gut	100
Steinkohlenflugasche (MW)	217.850	17.430	2182	50.040	11.460	128.640	fraglich	25

Die Auswahl der Additive erfolgte auf Basis der Marktverfügbarkeit und der chemischen Zusammensetzung bzw. ihres daraus abgeleiteten erwarteten Einflusses auf die Brennstoffeigenschaften. Tabelle 2 zeigt Basisdaten zu den für das Projekt in Betracht gezogenen Additiven. Bezüglich der Steinkohlenflugasche ist anzumerken, dass Kohlekraftwerke in der Regel langfristige Lieferverträge mit den Abnehmern ihrer Aschen haben und somit kein freier Markt besteht sondern die Verfügbarkeit und der Preis von Verhandlungen mit den Kraftwerksbetreibern abhängen. Die Zusammensetzung der Steinkohlenflugasche ist von der Zusammensetzung der eingesetzten Kohle abhängig und erfordert für jede Charge eine Bewertung hinsichtlich der Eignung als Additiv.

Die in Tabelle 1 angeführten Brennstoffsortimente wurden als für das Projekt relevant angesehen. Das heißt, dass sie in alle folgenden theoretischen Betrachtungen bezüglich Mischungsstrategien mit einbezogen wurden. Für die vorgesehenen Laborreaktor-Testläufe wurden Weizenstroh und Maisspindeln (sehr ungünstiges ASV auf Grund des sehr hohen Schmelzindex) sowie Rapsstroh (auf Grund der sehr hohen erwarteten K-Freisetzung bei gleichzeitig eher unproblematischem ASV) ausgewählt. Diese Brennstoffe wurden auch für die Verbrennungstests an der Pilot-Feuerungsanlage eingesetzt.

Bedingt durch ihre Zusammensetzungen haben die in Tabelle 2 genannten Additive unterschiedliche Auswirkungen auf die Brennstoffeigenschaften. Hohe Al- und Si-Gehalte fördern die Einbindung von K in Alumosilikate und wirken so der K-Freisetzung entgegen. Andererseits kann ein erhöhter Si-Gehalt aber auch zu einem Absinken der Ascheschmelztemperaturen führen. Hohe Ca- und Mg-Gehalte andererseits erhöhen die Ascheschmelztemperaturen, es ist aber mit keiner Verminderung der K-Freisetzung zu rechnen. Aus diesem Grund wurden von den genannten möglichen Additiven für eine erste Betrachtung Bentonit (hoher Si- und im Vergleich zu Kaolin höherer Ca-Gehalt, jedoch hoher Preis), Dolomit (hoher Ca- und Mg-Gehalt und gute Verfügbarkeit) sowie Kohleflugasche (als kostengünstige Alternative zu Bentonit) ausgewählt.

4.2 Weiterentwicklung moderner Brennstoffcharakterisierungswerkzeuge

In einem ersten Schritt wurden auf Basis bekannter BSI Brennstoff-Additiv-Mischungen definiert, von denen entsprechende Effekte bzgl. Erhöhung der Ascheschmelztemperaturen bzw. Verminderung der K-Freisetzung im Vergleich zu den nicht-additivierten Brennstoffen erwartet wurden. Es wurde dabei das molare $(\text{Si}+\text{K}+\text{P})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ -Verhältnis zur Abschätzung des ASV (Zielwert auf Basis von Literaturdaten: <2) und das molare K/Si -Verhältnis zur Abschätzung der K-Freisetzung (Zielwert auf Basis von Literaturdaten: $<0,5$) herangezogen (mehr Informationen zu Brennstoffindexen sind in [2] zu finden).

Werden Al-reiche Additive wie z.B. Bentonit oder Kohleflugasche, die durch hohe Al- und Si-Gehalte gekennzeichnet sind, eingesetzt, hat die Bildung von festen Alumosilikaten einen starken Einfluss auf das ASV. Daher wurde der Index zur Bewertung des ASV der Brennstoff-Additiv-Mischungen mit Al als schmelzpunkterhöhendes Element zu $(\text{Si}+\text{K}+\text{P})/(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Al})$ erweitert. Die Abschätzung der K-Freisetzung über das molare K/Si -Verhältnis geht davon aus, dass mit steigendem Si-Gehalt K vermehrt in Silikate eingebunden wird. Die K-Freisetzung hängt aber auch von der Cl-Konzentration im Brennstoff ab. Auf Grund der, im Vergleich zu holzartiger Biomasse, üblicherweise höheren Cl-Konzentrationen in landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffen, wurde der Einfluss des Cl-Gehalts im Brennstoff in Form des molaren Verhältnisses Cl/K (steigender Wert prognostiziert steigende K-Freisetzung) berücksichtigt.

Kombiniert mit K/Si ergibt sich das molare Verhältnis Cl/Si zur Prognose der K-Freisetzung vom Brennstoff in die Gasphase. HT-GGB haben gezeigt, dass Ca mit K um die Einbindung in Silikate konkurriert. Um diesen Effekt zu berücksichtigen wurde auch das molare Verhältnis (K+Ca)/Si zur Abschätzung der K-Freisetzung untersucht. Es zeigte sich jedoch, dass dieser Index nicht so gut wie der Index Cl/Si für die Prognose der K-Freisetzung geeignet ist.

Tabelle 3: Ursprüngliche und adaptierte Brennstoff-Indexe der Brennstoff-Additiv-Mischungen für die Laborreaktor-Testläufe

Erläuterungen: Additivanteile in Gew% TS in der Mischung; SFA ... Steinkohlenflugasche; grau hinterlegt ... neue BSI; bei Mischungen aus Dolomit bzw. Bentonit und SFA ist das Mischungsverhältnis der Additive 50% / 50%

Biomasse	Additiv	(Si+P+K)/ (Ca+Mg) [mol/mol]	(Si+P+K)/ (Ca+Mg+Al) [mol/mol]	Ziel	K/Si [mol/mol]	Cl/Si [mol/mol]	Ziel
Weizenstroh	-	8,03	6,67	ASV: Schmelz- temperaturen anheben	0,69	0,03	K-Freisetzung unverändert lassen
	3% Dolomit	3,08	2,90		0,57	0,02	
	4% Dolomit/SFA	3,51	2,98		0,53	0,02	
	4% SFA	6,49	3,98		0,54	0,04	
Rapsstroh	-	1,85	1,78	ASV: im moderaten Bereich halten	2,16	1,24	Minderung K-Freisetzung
	4% Bentonit	2,03	1,47		1,04	0,46	
	4% Bentonit/SFA	1,78	1,35		1,37	0,82	
	4% SFA	1,97	1,38		1,02	0,46	
Maisspindel	-	6,30	4,08	ASV: Schmelz- temperaturen anheben	0,90	0,24	Minderung K-Freisetzung
	6% Bentonit	6,69	3,11		0,39	0,11	
	6% Bentonit/SFA	6,39	2,46		0,35	0,11	
	6% FA	6,62	2,29		0,31	0,08	

Generell wurde angestrebt, für den Schmelzindex (Si+K+P)/(Ca+Mg+Al) Werte zwischen 2 und 3 zu erreichen. Grundlage ist ein Vergleich mit Datenbank-Brennstoffen, die bei vergleichbaren Index-Werten Erweichungstemperaturen im Bereich von 1.100°C aufweisen (vgl. Abbildung 3). Für den Freisetzungsindex Cl/Si ist eine möglichst große Reduktion anzustreben wobei zu beachten ist, dass der Index den aus dem Brennstoff freigesetzten Anteil von K prognostiziert. Die für das Aerosol- und Depositionsbildungspotential relevante K-Freisetzungsmenge hängt zusätzlich von der K-Konzentration im Brennstoff ab. Der maximale Additivgehalt ergibt sich aus dem limitierenden Aschengehalt für die Feuerungstechnologie (ca. 10 Gew% TS bei Rostfeuerungen) und der Annahme, dass anorganische Additive nahezu vollständig in die Rostasche übergehen. In Tabelle 3 sind die BSI der, in den Laborreaktor-testläufen eingesetzten, Brennstoffe und Brennstoff-Additiv-Mischungen und die Ziele der Additivierung zusammengefasst. Die neu entwickelten Indexe sind grau hinterlegt.

Um genauere Informationen über die Wirkung der Additive zu erlangen, wurden thermodynamische Hochtemperatur Gleichgewichtsberechnungen (HT-GGB) durchgeführt. Die HT-GGB liefern in erster Linie qualitative Aussagen zu Zusammensetzung und Anteil von festen, flüssigen und gasförmigen Phasen und können somit dazu verwendet werden, Trends bzgl. des Ascheschmelzverhaltens sowie der K-Freisetzung bei verschiedenen Temperaturen zu prognostizieren. Als charakteristische Temperatur für das ASV hat sich bei den HT-GGB T₃₀ (Temperatur bei 30 Gew% Schmelzeanteil) erwiesen, die gut mit

der Erweichungstemperatur nach CEN/TS 15370-1 vergleichbar ist. Die Ergebnisse zeigten, dass T_{30} von **Weizenstroh** bei einer Additivierung mit Dolomit (Additiv auf Ca-Basis) durch Bildung von höherschmelzenden Ca-Si-Phasen anstatt niedriger schmelzender K-Si-Phasen von ca. 925°C auf ca. 1.025°C erhöht wird, sich im Gegenzug aber auch die Freisetzung von K von knapp 2% auf etwa 4% erhöht, da Ca und K um die Einbindung in Silikate konkurrieren. Das Mischadditiv (Dolomit / Steinkohlenflugasche) führte zu einer ähnlichen Erhöhung von T_{30} , jedoch zu einer verminderten K-Freisetzung von ca. 1%. Die Additivierung mit reiner Steinkohlenflugasche hatte nahezu keinen Einfluss auf T_{30} und K-Freisetzung. Der Einsatz von Additiven auf Al-Si-Basis (Bentonit, Steinkohlenflugasche) führte bei **Rapsstroh** (T_{30} ca.800°C, K-Freisetzung ca. 70%) zu einer tendenziellen Anhebung der Ascheschmelzpunkte und einer Reduktion des aus dem Brennstoff freigesetzten Anteils an K durch die Einbindung in höherschmelzende K-Al-Si-Phasen, wobei mit den reinen Additiven die besten Ergebnisse erzielt wurden (T_{30} ca. 1.200°C, K-Freisetzung ca. 50%). Die Additivierung mit Mischadditiv zeigte einen geringeren Einfluss (T_{30} ca. 950°C, K-Freisetzung ca. 68%). Bei den **Maisspindeln** (T_{30} ca. 1.000°C, K-Freisetzung ca. 19%) ergaben die HT-GGB für die Additivierung mit Bentonit keinen Einfluss auf T_{30} , mit Mischadditiv und Steinkohlenflugasche jedoch eine Erhöhung auf 1.500°C–1.600°C. Die K-Freisetzung konnte mit Bentonit und Mischadditiv auf 6% reduziert und mit reiner Steinkohlenflugasche fast vollständig unterdrückt werden.

Um quantitative Ergebnisse zur Untermauerung der theoretischen Betrachtungen zu erlangen, wurden Laborreaktortests durchgeführt und das Ascheschmelzverhalten experimentell (nach CEN/TS 15370-1) untersucht (Abbildung 2). Die Laborreaktortestläufe bestätigten prinzipiell die Ergebnisse der HT-GGB, jedoch zeigten die experimentell ermittelten Erweichungstemperaturen und K-Freisetzungen zum Teil deutliche Abweichungen von den mittels HT-GGB ermittelten Ergebnissen was untermauert, dass HT-GGB ein sehr wertvolles Instrument sind, um die Mechanismen der Aschebildung zu untersuchen, die Ergebnisse allerdings nur qualitativ bewertet werden dürfen.

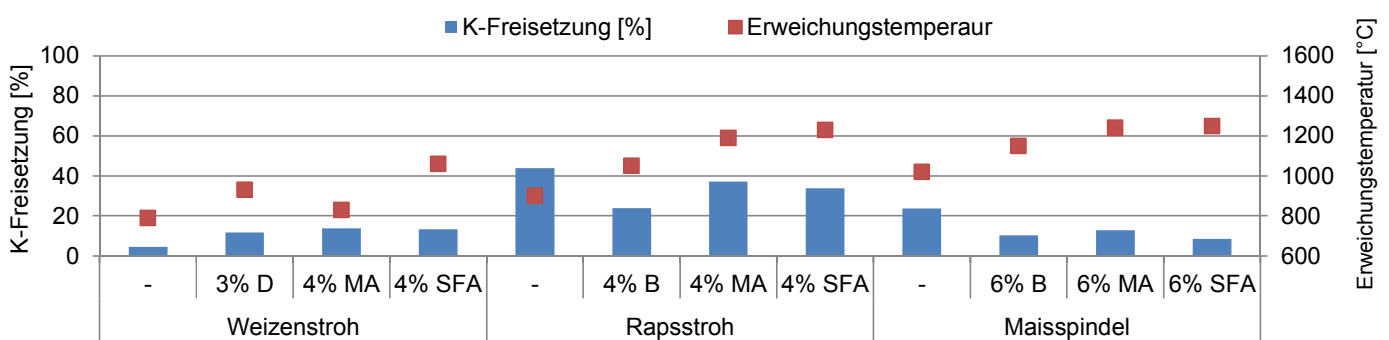


Abbildung 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Laborreaktortestläufe bzgl. K-Freisetzung und Erweichungstemperatur

Erläuterungen: D...Dolomit, B...Bentonit, SFA ... Steinkohlenflugasche, MA...Mischadditiv (50% Primäradditiv, 50% SFA) gemäß Tabelle 3, bei Rapsstroh ohne Additiv wurde im betrachteten Temperaturbereich kein Schmelzanteil von ≥ 30 Gew% ermittelt; die K-Freisetzung wurde bei 1.200°C (Erfahrungswert für maximale Betttemperaturen aus Laborreaktorversuchen) berechnet

4.3 Entwicklung einer Strategie zur Additivierung landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe

In Interaktion mit den Untersuchungen zu projektrelevanten Biomasse-Brennstoffen und Additiven und der Weiterentwicklung von Brennstoff-Charakterisierungs-Werkzeugen wurde eine Additivierungsstrategie zur Wahl geeigneter Brennstoff-Additiv-Mischungen entwickelt. Diese Strategie beruht auf der BSI-Analyse, der Wahl eines geeigneten Additivs, HT-GGB für eine erste Bewertung der Brennstoff-Additiv-Mischung und Verbrennungstests.

Die BSI-Analyse basiert auf der chemischen Zusammensetzung der Rohstoffe (Biomasse-Brennstoffe, Additive). Mittels Schmelzindex und Freisetzungsindex können Prognosen bzgl. des das Ascheschmelzverhaltens und der K-Freisetzung getroffen werden. In Abbildung 3 sind die Erweichungstemperaturen (nach CEN/TS 15370-1) und in Laborreaktortests ermittelte K-Freisetzungsfaktoren von unterschiedlichen Biomasse-Brennstoffen gegen die betreffenden BSI dargestellt. Durch Vergleich des zu bewertenden Brennstoffes mit Datenbank-Werten können zu erwartende Probleme identifiziert werden. Zu beachten ist, dass der K-Freisetzungsfaktor den Anteil an freigesetzten K im Brennstoff darstellt. Zur Beurteilung des Aerosol- bzw. Depositionsbildungspotentials ist die K-Freisetzungsmenge (Produkt von K-Freisetzungsfaktor und K-Konzentration im Brennstoff) von Bedeutung. Die Qualität der Prognose von ASV und K-Freisetzung hängt sehr stark vom Umfang der Vergleichsdaten in der Datenbank ab. Der vorhandene dichte Datensatz ließ eine gute Prognose zu.

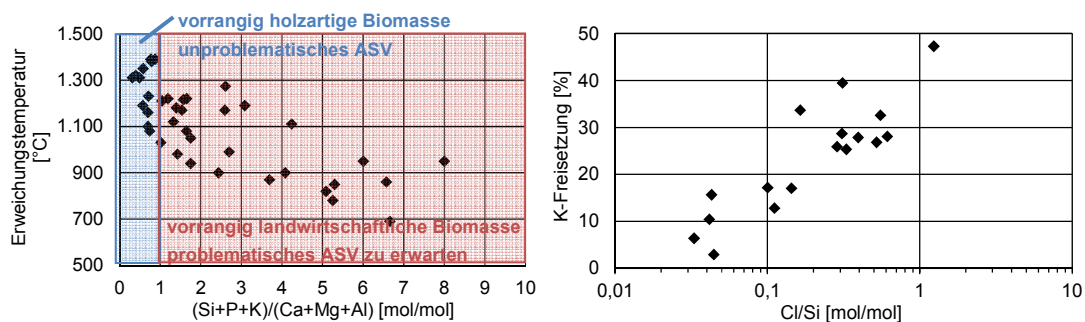


Abbildung 3: Erweichungstemperatur bzw. K-Freisetzungsfaktor vs. BSI

Erläuterungen: links: Erweichungstemperatur nach CEN/TS 15370-1 vs. Schmelzindex, rechts: K-Freisetzungsfaktor vs. Freisetzungsindex; Quelle: BIOS-Brennstoffdatenbank

Die Wahl des Additivs erfolgte nach den zu beeinflussenden feuerungstechnischen Eigenschaften. Niedrigschmelzende K-Si-Phasen führen zu niedrigen Ascheschmelzpunkten. Durch die Additivierung soll das Gleichgewicht zu höherschmelzenden Phasen verschoben werden. Dazu eignen sich besonders Additive auf Ca- und Al-Basis. In Abbildung 4 ist die Beeinflussung der Aschenchemie durch Erhöhen der Ca- bzw. Al-Konzentration in K-Si-dominierten Biomasse-Brennstoffen an Hand der ternären Systeme $CaO-K_2O-SiO_2$ und $SiO_2-K_2O-Al_2O_3$ dargestellt. Mg verhält sich ähnlich wie Ca.

Brennstoffe mit hohem Freisetzungsindex liegen im $CaO-K_2O-SiO_2$ -System im K-Ca-dominierten Bereich. Mit zunehmender Si-Konzentration (sinkender Index) sinkt die K-Freisetzung (Abbildung 3). Additive zur Reduktion der K-Freisetzung müssen die Si-Konzentration im Brennstoff erhöhen, jedoch unterstützt die alleinige Erhöhung der Si-Konzentration die Bildung von niedrigschmelzenden K-Si-

Phasen. Additive auf Al-Si-Basis erhöhen zusätzlich den Al-Gehalt und führen zur Bildung von höherschmelzende Al-Si-Phasen. Ca-basierte Additive können zum Verringern der K-Freisetzung nicht eingesetzt werden, da Ca die Bildung von K-Silikaten blockiert. Eine weitere Gruppe sind P-basierte Additive. P beeinflusst jedoch das Ascheschmelzverhalten negativ. Außerdem konkurrieren diese Additive mit P als Düngemittel, was im Projekt als ein K.O.-Kriterium für den Einsatz zur Brennstoffadditivierung angesehen wurde. Mögliche Additive auf Al-, Si- und Ca-Basis sind in Tabelle 2 enthalten.

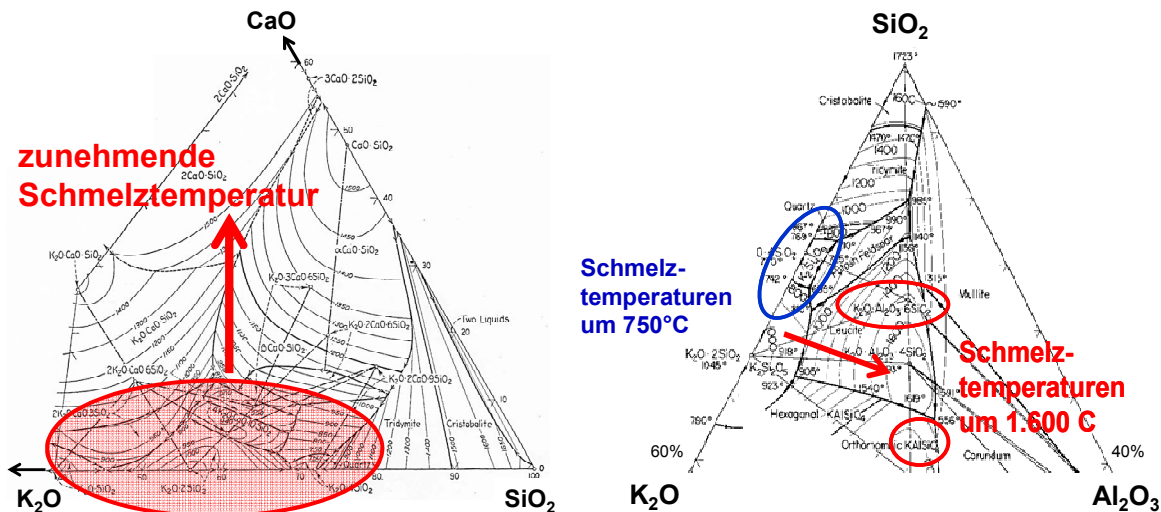


Abbildung 4: Ternäre Phasendiagramme CaO-K₂O-SiO₂ und SiO₂-K₂O-Al₂O₃

Erläuterungen: Die Abbildung zeigt Ausschnitte des Si-reichen Teils der jeweiligen Systeme

Qualitative Informationen zur Phasenbildung (feste Phasen, Schlacken, in die Gasphase freigesetzte Komponenten) können aus HT-GGB generiert werden. Sie ermöglichen eine tendenzielle Bewertung des Einflusses der Additive. Dazu können aus der Brennstoff- und der Additivzusammensetzung berechnete Zusammensetzungen herangezogen werden, es müssen also noch keine Brennstoffe produziert werden.

Verbrennungstests liefern quantitative Aussagen zur K-Freisetzung. Aus Brennstoff- und Aschenanalysen kann der K-Freisetzungsfaktor bzw. die freigesetzte K-Menge berechnet werden. Außerdem kann der Einfluss der Additivierung auf das ASV (Schlackenbildung) optisch beurteilt werden. Eine experimentelle Untersuchung des ASV der Brennstoffe ist nach CEN/TS 15370-1 möglich.

Basierend auf der Additivierungsstrategie wurden Maisspindeln (ohne Additiv, 6 Gew% TS Bentonit), Weizenstroh (ohne Additiv, 2 und 4 Gew% TS Kaolin) und Rapsstroh (ohne Additiv, 4 Gew% TS Bentonit, 4 Gew% TS Bentonit/Steinkohlenflugasche 1:1) als Versuchsbrennstoffe für die nachfolgenden Verbrennungstests an einer Pilot-Rostfeuerung definiert.

4.4 Herstellung von kompaktierten additivierten landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffen

Im Zuge der Arbeiten wurden die Anlageneinstellungen für die Produktion additiver landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe optimiert, die Versuchsbrennstoffe für die Testläufe an der Pilot-Feuerungsanlage hergestellt und das Herstellungsverfahren bewertet.

Die Zerkleinerung des zu Ballen gepressten Weizen- und Rapsstrohs erfolgte in einer mobilen, von einer Zugmaschine über eine Zapfwelle angetriebenen, Hammermühle. Der Energieverbrauch (ermittelt über den Kraftstoffverbrauch der Zugmaschine) lag bei 80–90 kWh/t, was bei einem angenommenen mechanischen Wirkungsgrad von ca. 30% (Erfahrungswert) einem Energieverbrauch von 25–30 kWh/t bei Verwendung einer elektrisch angetriebenen Hammermühle entsprechen würde. Die mit dem eingesetzten Siebblech (Loch-Durchmesser 20 mm) erreichte Partikelgröße genügte, um das gemahlene Weizenstroh und das Rapsstroh ohne weitere Zerkleinerung zu verarbeiten. Aus Sicht der Pelletierung wäre jedoch eine kleinere Partikelgröße wünschenswert, da damit ein höherer Durchsatz gefahren werden kann. Die Maisspindeln wurden als Bruch in BigBags angeliefert. Die Partikelgröße betrug 20–25 mm und wurde vor der Pelletierung in einer Kollermühle auf eine Partikelgröße <6 mm reduziert. Der Energieverbrauch für die Zerkleinerung lag bei etwa 20 kWh/t. Der Maisspindel-Rohstoff wies auffällige Verunreinigungen (Steine, Metallteile) auf. Dies zeigte, dass bei der Verarbeitung von Biomasse-Rohstoffen unbedingt auf die Entfernung von Störstoffen geachtet werden muss, um Betriebsstörungen oder sogar Schäden an der Produktionsanlage zu vermeiden.

Hinsichtlich der Pelletierung wiesen die Maisspindeln die günstigsten Eigenschaften auf. Es konnte auf Anhieb eine hohe Produktqualität bei sehr stabilem Prozess erzeugt werden. Der abgesiebte Feinanteil lag deutlich unter 5%. Eine Befeuchtung war kaum nötig, im Bedarfsfall wurden 1–2 l/h Wasser zudosiert. Die additivierten Pellets wiesen einen durchschnittlichen Additivgehalt von 5,6 Gew% TS (soll: 6 Gew% TS) auf. Das Weizenstroh konnte mit durchschnittlicher Produktqualität und Prozessstabilität pelletiert werden. Die Durchsatzleistungen der Förderaggregate limitierten auf Grund der geringen Schüttdichte des Rohmaterials den Durchsatz der gesamten Anlage. Die Pelletpresse könnte einen größeren Massenstrom verarbeiten. Die abgesiebte Feinfraktion lag in einem akzeptablen Bereich unter 10%. Eine Befeuchtung mit 4 l/h Wasser war für stabile Prozessbedingungen nötig. Die additivierten Pellets wiesen einen Additivgehalt von 2,3 Gew% TS (soll: 2 Gew% TS) bzw. 4,3 Gew% TS (soll: 4 Gew% TS) auf. Die Weizenstroh-Kaolin-Mischungen verursachten einen deutlich höheren Verschleiß an der Matrize als die anderen Brennstoff-Additiv-Mischungen, der bei einer industriellen Produktion bei der Werkstoffwahl für die Presswerkzeuge (Koller, Matrize) und in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Standzeit der Werkzeuge) unbedingt berücksichtigt werden muss. Das Rapsstroh wies zum Teil hohe Wassergehalte von über 20 Gew% FS auf. Die höhere Feuchte trat konzentriert am Boden und im Randbereich der BigBags auf, was darauf schließen ließ, dass die Feuchte erst nach dem Mahlprozess eingedrungen war. Dies führte zu sehr brüchigen Pellets und teilweise zu einem Feinanteil von über 50%. Eine zusätzliche Befeuchtung war demnach nicht erforderlich. Um eine wirtschaftliche Pelletierung zu ermöglichen, muss in der Praxis unbedingt eine wassergeschützte Logistikkette gewährleistet werden. Die additivierten Pellets wiesen einen Additivgehalt von 4,1 Gew% TS Bentonit (soll: 4 Gew% TS) bzw. 5,0 Gew% TS Bentonit/Steinkohlenflugasche (soll: 4 Gew% TS) auf.

Tabelle 4 enthält die Ergebnisse der Energiebilanzierung für die Produktion der nicht-additivierten und additivierten Pellets. Die Energiebilanzen der additivierten Weizenstroh- und Rapsstroh-Pellets zeigten keinen signifikanten Unterschied und wurden als Weizenstroh bzw. Rapsstroh additiviert in die Tabelle aufgenommen. Der Vergleich mit dem spezifischen Energiebedarf der Pelletierung von Fichtenholz zeigt für die landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffe ähnliche bzw. geringfügig niedrigere Werte. Es sind jedoch höhere spez. Energiebedarfe für die Pelletierung und zum Teil höhere maximale Durchsätze der additivierten Brennstoffe im Vergleich zu den nicht-additivierten zu erkennen. Grundsätzlich sinkt der spez. Energieverbrauch mit steigendem Durchsatz was sich auch in den (geschätzten) Energiekosten bei Volllast widerspiegelt.

Tabelle 4: Spezifischer Energieverbrauch der Pelletierung von Maisspindeln, Weizenstroh und Rapsstroh im Vergleich zu Fichtenholz bei gleichem Durchsatz

Erläuterungen: max. Durchsatz und Energiekosten bei Volllast geschätzt, Basis für die Energiekosten ist ein Preis von 0,08 EUR/kWh, spez. Energieverbrauch der Pelletierung von Fichte bei gleichem Durchsatz

Rohstoff	Durchsatz t/h	Spez. Energiebedarf kWh/t	max. Durchsatz t/h	Energiekosten bei Volllast EUR/t	Spez. Energiebedarf Pelletierung von Fichte kWh/t
Maisspindel	0,390	43	ca. 0,70	2,86	46 - 50
Maisspindel additiviert	0,410	46	ca. 0,65	3,07	
Weizenstroh	0,093	124	ca. 0,21	9,5	132 - 149
Weizenstroh additiviert	0,096	133	ca. 0,19	10,5	
Rapsstroh	0,130	98	ca. 0,24	8,3	102 - 115
Rapsstroh additiviert	0,135	98	ca. 0,24	8,3	

4.5 Testläufe an einer Pilot-Rostfeuerungsanlage

Die Testläufe mit den additivierten und nicht additivierten landwirtschaftlichen Biomasse-Brennstoffen wurden an einer 180 kW-Pilot-Holzfeuerungsanlage durchgeführt. Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung der Anlage mit den Mess- und Probenahmestellen. Die Anlage wurde jeweils mit Holzpellets angefahren, um mit einem bekannten Brennstoff stabile Verbrennungsverhältnisse einzustellen. Zur Vorbeugung von Verschlackungen wurde ein niedriges Verbrennungsluftverhältnis im Brennstoffbett angestrebt und die Temperatur in der Sekundärverbrennungszone mittels Rauchgasrezirkulation auf ca. 900–950°C geregelt. Nach einer ca. 1-stündigen Aufheizphase wurde der Versuchsbrennstoff zugeführt. Während des kontinuierlichen Anlagenbetriebes (zumindest 8 Stunden) wurde ein umfangreiches Mess- und Probennahmen-Programm durchgeführt. Nach dem Abfahren der Anlage wurden die einzelnen Aschefractionen sowie etwaig angefallene Schlacken ausgewogen und beprobt. Vor dem Anfahren mit einem neuen Brennstoff wurde die Anlage gründlich gereinigt. Tabelle 5 bis Tabelle 7 enthalten Zusammenfassungen relevanter Testlaufdaten.

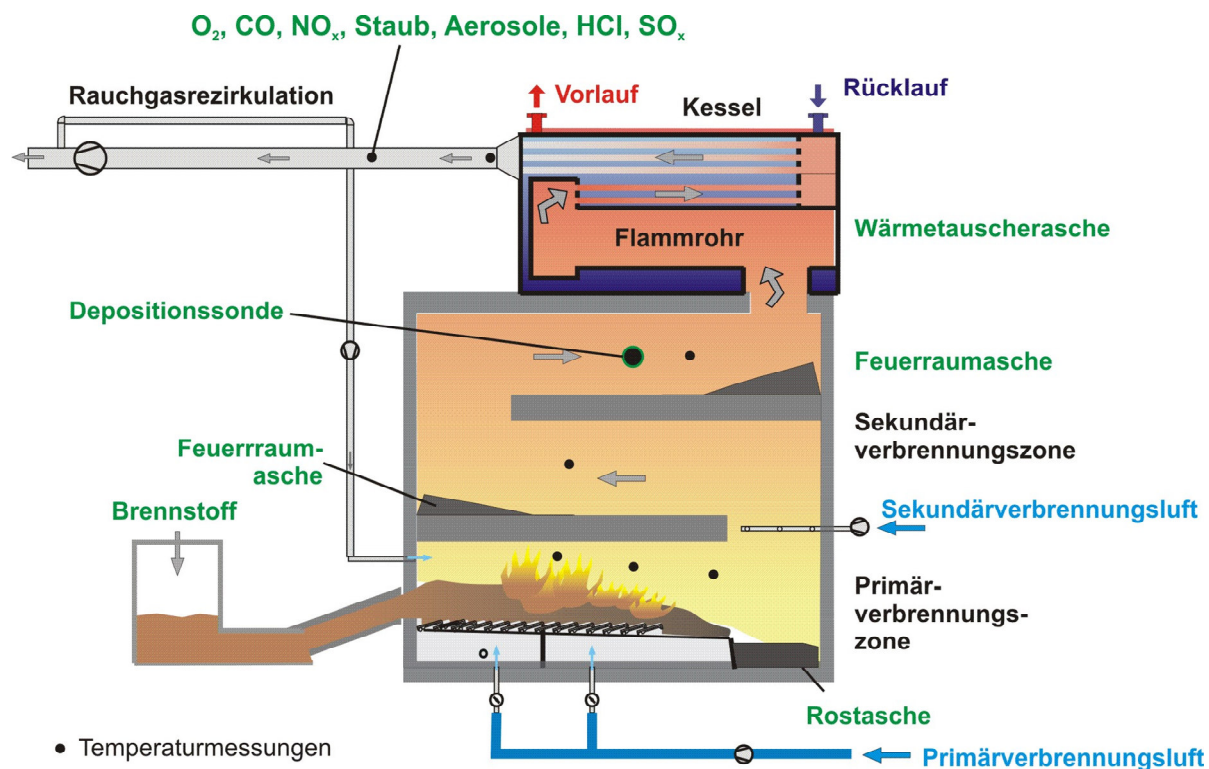


Abbildung 5: Schema der Feuerungsanlage mit Messstellen

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testläufe mit den Weizenstroh-Brennstoffen

Erläuterungen: Zuordnung von Werten gemäß der Reihenfolge der Brennstoffe, $\lambda_{\text{primär}}$... berechnetes Luftverhältnis in der Primärverbrennungszone, AG ... Aschegehalt; Emissionen in mg/Nm³ trockenes Rauchgas 13% O₂; Werte sind Mittelwerte über die Versuchsdauer von ca. 8 Stunden

Brennstoffe	Weizenstroh / Weizenstroh + 2% Kaolin / Weizenstroh + 4% Kaolin			
Ziel der Additivierung	Anhebung der Ascheschmelzpunkte, Reduktion der K-Freisetzung aus dem Brennstoff			
Kesselleistung [kW]	113,1	118,8	137,3	zum Teil nur Kesselleistungen von <120 kW erreicht
$\lambda_{\text{primär}}$ [-]	0,70	0,73	0,94	akzeptable Luftstufung in allen Testläufen
CO-Emissionen [mg/Nm ³]	2,2	5,7	4,9	sehr guter Gasphasenausbrand
NO _x -Emissionen [mg/Nm ³]	275,3	258,5	278,5	kaum Beeinflussung durch Additivierung
Feinstaubemissionen [mg/Nm ³]	48,2	24,6	11,6	sinken deutlich proportional zur Additivierung
Grobstaubemissionen [mg/Nm ³]	50,1	22,6	25,5	geringere Emissionen durch Additivierung trotz höherem AG
HCl-Emissionen [mg/Nm ³]	64,7	66,9	97,7	steigen durch Additivierung
SO _x -Emissionen [mg/Nm ³]	80,0	84,9	87,7	steigen durch Additivierung

Bei Weizenstroh und Weizenstroh+2% Kaolin musste auf Grund des ungünstigeren Abbrandverhaltens die Brennstoffmenge am Rost und damit die Leistung reduziert werden. Bei reinem Weizenstroh bildete sich eine relativ kompakte versinterte Aschenplatte über dem Rost aus, die den Brennstoff- bzw. Aschetransport über den Rost erheblich störte. Auch mit Additivierung kam es zur Ausbildung einer derartigen versinterten Platte, die durch die Rostbewegung nicht zerstört werden konnte. Mit steigendem Additivierungsgrad (2% Kaolin, 4% Kaolin) wies die Aschenplatte jedoch immer größere Poren und eine geringere Festigkeit auf. Eine geeignete Rosttechnologie, beispielsweise ein stärker schürender Treppenvorschubrost, würde bei 4% Kaolin-Additivierung die Platte durch die Rostbewegung zerstören

und so den Einsatz der additivierten Weizenstroh-Brennstoffe im Dauerbetrieb ermöglichen. Die Feinstaubemissionen konnten durch die Additivierung proportional zum Additivgehalt gesenkt werden, und auch die Grobstaubemissionen wurden signifikant reduziert.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testläufe mit den Rapsstroh-Brennstoffen

Erläuterungen: Zuordnung von Werten gemäß der Reihenfolge der Brennstoffe, $\lambda_{\text{primär}}$... berechnetes Luftverhältnis in der Primärverbrennungszone; Emissionen in mg/Nm³ trockenes Rauchgas 13% O₂; Werte sind Mittelwerte über die Versuchsdauer von ca. 8 Stunden

Brennstoffe Ziel der Additivierung	Rapsstroh / Rapsstroh + 4% Bentonit / Rapsstroh + 4% Bentonit/Steinkohlenflugasche Reduktion der K-Freisetzung aus dem Brennstoff			
Kesselleistung [kW]	144,6	142,4	152,4	gut vergleichbar
$\lambda_{\text{primär}}$ [-]	0,64	0,47	0,63	akzeptable Luftstufung in allen Testläufen
CO-Emissionen [mg/Nm ³]	3.374,2	21,2	1,9	Gasphasenausbrand bei Rapsstroh inakzeptabel
NO _x -Emissionen [mg/Nm ³]	283,9	361,4	318,0	bei Rapsstroh durch reduzierende Wirkung von CO geringer
Feinstaubemissionen [mg/Nm ³]	1.106,2	405,6	419,4	beide Additive bewirken eine Reduktion von 60%
Grobstaubemissionen [mg/Nm ³]	331,0	107,2	101,9	beide Additive bewirken eine Reduktion von 60%
HCl-Emissionen [mg/Nm ³]	63,9	140,7	171,6	steigen deutlich durch Additivierung
SO _x -Emissionen [mg/Nm ³]	33,3	256,6	175,3	steigen deutlich durch Additivierung

Reines Rapsstroh zeigte sehr hohe CO-Konzentrationen im Rauchgas, was auf ein ungleichmäßig durchströmtes Brennstoff-Bett zurückgeführt wurde, das beim additivierten Rapsstroh nicht auftrat. Beim reinen Rapsstroh bildeten sich keine stabilen Versinterungen. Einzelne größere Aschenagglomerate zerfielen bei geringer mechanischer Beanspruchung. Bei den additivierten Rapsstroh-Brennstoffen bildeten sich teilweise versinterterte Ascheagglomerate (Durchmesser 20–25 cm), die den Aschetransport in die Ascherinne aber nicht störten. Gründe dafür sind einerseits der höhere Aschegehalt und die Bildung K-reicher, niedrigschmelzender Phasen die Partikelagglomerationen fördern. Mittlere und große Feuerungsanlagen verfügen jedoch üblicherweise über ausreichend groß dimensionierte Entaschungseinrichtungen für den Abtransport der Agglomerate. Die hohen Grob- und Feinstaubemissionen des Rapsstrohs wurden durch die Additivierung zwar sehr stark (ca. 60%) reduziert, jedoch bildeten sich trotzdem in kurzer Zeit Depositionen in den Wärmetauscherrohren, die im regulären Betrieb zu Störungen führen würden.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testläufe mit den Maisspindel-Brennstoffen

Erläuterungen: Zuordnung von Werten gemäß der Reihenfolge der Brennstoffe, $\lambda_{\text{primär}}$... berechnetes Luftverhältnis in der Primärverbrennungszone; Emissionen in mg/Nm³ trockenes Rauchgas 13% O₂; Werte sind Mittelwerte über die Versuchsdauer von ca. 8 Stunden

Brennstoffe Ziel der Additivierung	Maisspindel / Maisspindel + 6% Bentonit Anhebung der Ascheschmelzpunkte, Reduktion der K-Freisetzung aus dem Brennstoff		
Kesselleistung [kW]	149,5	148,4	gut vergleichbar
$\lambda_{\text{primär}}$ [-]	0,84	0,95	repräsentative Luftstufung bei beiden Testläufen
CO-Emissionen [mg/Nm ³]	5,3	4,5	sehr guter Gasphasenausbrand
NO _x -Emissionen [mg/Nm ³]	225,2	256,1	kaum Beeinflussung durch Additivierung
Feinstaubemissionen [mg/Nm ³]	140,4	66,8	mit Additivierung Reduktion um mehr als 50%
Grobstaubemissionen [mg/Nm ³]	20,8	25,3	kaum Auswirkungen durch Additivierung
HCl-Emissionen [mg/Nm ³]	31,7	95,3	steigen durch Additivierung
SO _x -Emissionen [mg/Nm ³]	26,8	46,5	steigen durch Additivierung

Bei den reinen und additivierten **Maisspindeln** bildeten sich im Brennstoffbett Versinterungen, die jedoch keine Schwierigkeiten für den Feuerungsbetrieb darstellten. Die Feinstaubemissionen wurden durch die Additivierung um mehr als 50% reduziert, auf die Grobstaubemissionen zeigte die Additivierung bei den Maisspindeln kaum Auswirkungen.

Allgemein führte die Additivierung zu zum Teil stark erhöhten HCl- und SO_x-Emissionen, da durch verstärkte Einbindung von K und Na in die Rostaschen eine geringere S- und Cl-Einbindung in die Feinstäube erfolgt. Es konnte kein wesentlicher Einfluss der Additivierung auf die Zusammensetzung von Kesseldepositionen bemerkt werden. Diese bestanden zum Großteil aus KCl. Schwerflüchtige Elemente wie Si, Ca und Mg wurden in den Depositionen nur in geringen Mengen nachgewiesen, was darauf hindeutet, dass kaum Grobaschen oder Additiv aus dem Rostbereich ausgetragen wurden.

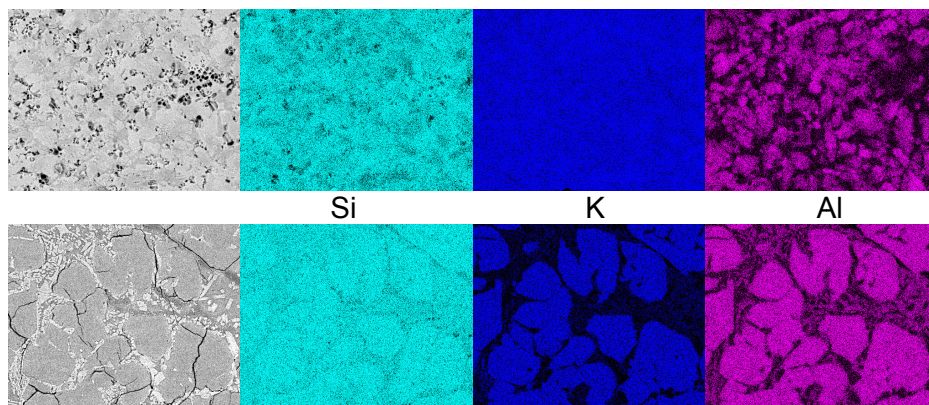


Abbildung 6: SEM/EDX-Analyse von Schlackeproben der Maisspindel-Testläufe

Erläuterungen: oben: Maisspindel ohne Additiv, unten: Maisspindel + 6% Bentonit; Reihenfolge von links: Übersichtsaufnahme – Si-Verteilung – K-Verteilung – Al-Verteilung

Abbildung 6 zeigt mittels Elementverteilungen aus der SEM/EDX-Analyse von Schlackeproben der Maisspindel-Testläufe beispielhaft den Einfluss der Additivierung auf die Aschenchemie. Sehr gut zu erkennen ist, dass bei den reinen Maisspindeln (oben) Si und K sehr homogen im betrachteten Ausschnitt verteilt sind und niedragschmelzende K-Si-Phasen bilden. Zur Verteilung von Al ist kein Zusammenhang erkennbar. Bei den additivierten Maisspindeln (unten, Al-Si-basiertes Additiv) ist sehr gut das Auftreten von Al und K in den selben Bereichen zu erkennen. Somit zeigt sich, dass durch ein Al-Si-basiertes Additiv K verstärkt in höherschmelzenden K-Al-Si-Phasen eingebunden wurde, was zu einer Erhöhung des Ascheschmelzpunktes und einer Reduktion der K-Freisetzung führte.

4.6 Wirtschaftliche, technologische und ökologische Bewertung

Die wirtschaftliche, technologische und ökologische Bewertung erfolgte für Maisspindel+6% Bentonit, Weizenstroh+4% Kaolin und Rapsstroh+4% Bentonit, da diese Brennstoffe auf Basis der durchgeführten Testläufe als potentielle Einsatzbrennstoffe für eine Anwendung in Realanlagen identifiziert wurden.

Technologische Bewertung

Durch die Pelletierung konnten für die betrachteten Brennstoffe Schüttdichten von ca. 600 kg/m³ und darüber erreicht werden (vergleichbar mit Holzpellets). Der durch die Additivierung erhöhte Aschegehalt

führte allerdings zu im Vergleich mit den nicht-additivierten Brennstoffen, niedrigeren Heizwerten und Energiedichten. Die Energiedichten (Produkt aus Schüttdichte und Heizwert) liegen mit ca. 9 bis 10 GJ/m³ geringfügig unter denen von Holzpellets (11 GJ/m³) jedoch um das ca. 3-fache über denen von Hackgut (ca. 3,2 GJ/m³).

Ökologische Bewertung

In Tabelle 8 sind die während der Testläufe gemessenen mittleren Emissionen zusammengefasst. Zum Vergleich sind die Grenzwerte entsprechend der Feuerungsanlagenverordnung (FAV) für unterschiedliche Leistungsbereiche angeführt. Die organischen C-Emissionen lagen durchwegs unter der Nachweisgrenze (1 mg/Nm³) und somit deutlich unter den Grenzwerten der FAV. Es zeigte sich, dass die Grenzwerte für CO und SO₂ bei den betrachteten Brennstoffen eingehalten werden können. Es wurde davon ausgegangen, dass additivierte Biomasse als standardisierter Brennstoff nach DIN EN ISO 17225 gilt, und es somit lt. FAV keine HCl-Grenzwertvorgaben gibt. Die NO_x-Emissionen werden beim additivierten Rapsstroh für Anlagengrößen >1 MW überschritten und erfordern in diesem Fall den Einsatz von Sekundärmaßnahmen wie SNCR zur NO_x-Reduktion. Die Staubgrenzwerte konnten bei Weizenstroh durch die Additivierung eingehalten werden. Bei additiviertem Rapsstroh sind für Anlagen <0,4 MW und bei additivierten Maisspindeln für Anlagengrößen >0,4 MW Sekundärmaßnahmen zur Feinstaubabscheidung (Elektrofilter oder Gewebefilter) notwendig.

Tabelle 8: Vergleich der Emissionen der Testläufe

Erläuterungen: Emissionen in mg/Nm³ trockenes Rauchgas 11% O₂

Emissionen	Weizenstroh	Rapsstroh	Maisspindel	Feuerungsanlagenverordnung		
	4% Kaolin	4% Bentonit	6% Bentonit	<0,4 MW	0,4–1 MW	>1–2 MW
CO	10	16	6	800	250	250
NO _x	348	468	311	500	500	400
SO _x	110	211	56	350	350	350
HCl	141	173	100	30	30	30
Staub	48	660	124	150	50	50

Die Aschen der untersuchten Brennstoffe sind aus ökologischer Sicht unproblematisch. Die Rostaschen eignen sich gut für Düngezwecke, eine Aschenutzung ist jedoch im Einzelfall zu prüfen.

Wirtschaftliche Bewertung

Es wurden 2 Szenarien für Differenzkostenrechnungen zum Vergleich der Projekt-Brennstoffe mit Hackgut bzw. Holzpellets herangezogen: die Nutzung additiver Pellets als Handelsgut in einer 350 kW- und 2.000 kW-Anlage und die Nutzung von additiviertem Rohmaterial (nicht kompaktiert) in einer 350 kW-Anlage. Es wurden nur Kosten betrachtet, die sich wesentlich von Hackgut und Weichholzpellets unterscheiden. Haupteinflussfaktoren sind dabei die Kosten für die Rohmaterialien (Brennstoffe, Additive), die Aufbereitung (Trocknung, Pelletierung, Logistik), die Ascheentsorgung und die notwendigen Adaptierungen der Feuerungsanlagen. Die ermittelten jährlichen Kosten sind in Tabelle 9 und Tabelle 10 zusammengefasst. Etwaige saisonale Preisschwankungen wurden nicht berücksichtigt. Änderungen bei der Anlagenverfügbarkeit und Nutzungsdauer wurden auf Grund fehlender Daten auf Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt. Beim betrachteten Szenario 1 (Tabelle 9) sind die jährlichen

Differenzkosten der Hackgutfeuerung am geringsten, additiviertes Weizenstroh ist jedoch zumindest gegenüber Holzpellets konkurrenzfähig.

Tabelle 9: Vergleich der jährlichen Differenzkosten der Projekt-Brennstoffe mit Hackgut und Holzpellets – Szenario 1

Brennstoff	[€/a]	Anlagenleistung 350 kW					Anlagenleistung 2.000 kW				
		Weizen	Raps	Maisspindel	Pellets	Hackgut	Weizen	Raps	Maisspindel	Hackgut	Pellets
Jahreskosten		60.156	77.656	65.876	60.677	43.356	446.024	579.363	489.608	462.302	330.329
Kostenersparnis (Hackgut)		-38,7%	-79,1%	-51,9%	-40,0%	-	-35,0%	-75,4%	-48,2%	-40,0%	-
Kostenersparnis (Holzpellets)		0,9%	-28,0%	-8,6%	-	28,5%	3,5%	-25,3%	-5,9%	-	28,5%

Bei Szenario 2 (Tabelle 10) liegen die Differenzkosten von additiviertem Weizenstroh und additivierten Maisspindeln unter jenen von Hackgut, gegenüber Holzpellets sind alle 3 Projekt-Brennstoffe konkurrenzfähig.

Tabelle 10: Vergleich der jährlichen Differenzkosten der Projekt-Brennstoffe mit Hackgut und Holzpellets – Szenario 2

Brennstoff	[€/a]	Anlagenleistung 350 kW				
		Weizen	Raps	Maisspindel	Pellets	Hackgut
Jahreskosten		33.805	45.636	38.505	60.655	43.281
Kostenersparnis (Hackgut)		21,9%	-5,4%	11,0%	-40,1%	-
Kostenersparnis (Holzpellets)		44,3%	24,8%	36,5%	-	28,6%

4.7 Additivierungsleitfaden

Aus den Projektergebnissen wurde ein Leitfaden für die Auswahl geeigneter Brennstoff-Additiv-Mischungen abgeleitet. Im Leitfaden erfolgt eine kurze Vorstellung der feuerungstechnischen Eigenschaften von Biomasse-Brennstoffen und von Werkzeugen zur Brennstoffcharakterisierung sowie eine Einführung in die Brennstoffadditivierung. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung von Methoden zur Additivwahl und im Weiteren folgen Ausführungen zur optimalen Vermischung von Brennstoff und Additiv. Abschließend werden die wesentlichen Vorteile und Einschränkungen additiver landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe im Vergleich zu den nicht-additivierten Ausgangsmaterialien zusammengefasst. In Abbildung 7 ist in 6 Schritten die Vorgehensweise mit Zwischenevaluierungen hinsichtlich bestimmter K.O.-Kriterien, die den Einsatz der betreffenden landwirtschaftlichen Biomasse als Brennstoff ausschließen, dargestellt.

Die Brennstoffbewertung mit BSI basiert auf einer nasschemischen Analyse des Zielbrennstoffs. Dabei ist für eine spätere Anwendung der brennstoffspezifischen Strategie speziell bei landwirtschaftlichen Reststoffen auf eine genaue Spezifikation des Brennstoffsortiments (Ganzpflanzen, Stängel mit/ohne Blätter etc.), eine repräsentative Probenahme und ein geeignetes Analyseverfahren zu achten.

Die feuerungstechnische Brennstoffbewertung auf Basis von BSI (Schritt 2) evaluiert auf Basis des N-Gehaltes (hinsichtlich NO_x-Emissionen), des Schmelz- und Freisetzungindexes, sowie des (K+Na)/(x(2S+Cl))-Verhältnisses [mol/mol] (hinsichtlich zu erwartender SO₂-Emissionen), ob ein

Brennstoff prinzipiell als Rohmaterial geeignet ist und bzgl. welcher Parameter Additivierungsbedarf besteht. Nicht geeignete Brennstoffe werden über entsprechende K.O.-Kriterien identifiziert.



Abbildung 7: Schematische Darstellung der Additivierungsstrategie

Die Wahl des Additivs hängt von den zu beeinflussenden Parametern ab. Ca-basierte Additive können zur Verbesserung des ASV eingesetzt werden (es muss dabei aber ein gewisser Anstieg der Aerosol-emissionen und der Depositionsbildungsneigung in Kauf genommen werden). Al-Si-basierte Additive verbessern das ASV und reduzieren die K-Freisetzung. Zu beachten ist, dass natürlich vorkommende Additive nur geringe Schwankungen aufweisen, Zusammensetzungen von Reststoffen aus anderen Prozessen (z.B. Steinkohlenflugasche) jedoch stark vom Rohmaterial und ihrem Erzeugungsprozess abhängen. Ihre Zusammensetzung ist vor dem Einsatz jedenfalls zu prüfen.

Die Vorbewertung der Brennstoff-Additiv-Mischung erfolgt wieder mit den bekannten BSIs. Die Zusammensetzung kann mittels Mischungsrechnung (Brennstoff, Additiv) ermittelt werden. Bei landwirtschaftlichen Brennstoffen sind dabei die üblichen Streubreiten bzgl. der Zusammensetzungen zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Additiv-Dosierung muss ein akzeptabler Kompromiss zwischen dem resultierenden Aschegehalt der Brennstoff-Additiv-Mischung (sollte <10 Gew% TS liegen) und den erwarteten positiven Effekten gefunden werden.

Im Falle einer anschließenden positiven wirtschaftlichen Bewertung werden Verbrennungsversuche mit dem additivierten Brennstoff in einem Laborreaktor (wenn verfügbar) oder an einer Versuchsanlage bzw. einer geeigneten Realanlage empfohlen.

5 Ausblick und Empfehlungen

Wesentliche grundlegende technische Erkenntnisse aus dem Projekt, die für die spätere Marktanwendung von großer Relevanz sind, waren:

- Durch gezielte Anwendung von anorganischen Additiven können die feuerungstechnischen Eigenschaften von landwirtschaftlichen Brennstoffen in einem derartigen Ausmaß verbessert werden, dass diese Brennstoffe in konventionellen Holzfeuerungsanlagen einsetzbar sind.
- Mit dem entwickelten Additivierungsleitfaden steht ein Tool zur Verfügung, mit dem sich vergleichsweise rasch und unkompliziert erkennen lässt, ob ein spezifischer landwirtschaftlicher Brennstoff für die Produktion additiver Brennstoffe zum Einsatz in Holzfeuerungen geeignet ist und welche Additive bzw. Additivmengen als sinnvoll erscheinen.
- Die Produktion von pelletierten additiven landwirtschaftlichen Brennstoffen kann mit gewissen, vergleichsweise unaufwändigen, Prozessadaptierungen in konventionellen Pelletieranlagen erfolgen.

Eine weitere wesentliche marktrelevante Erkenntnis war, dass die Kosten der Wärmeproduktion mit additiven landwirtschaftlichen Brennstoffen im Wesentlichen von den Brennstoff-Rohmaterialpreisen sowie von der Frage, ob pelletierte oder lose Brennstoffe eingesetzt werden sollen, abhängen. Speziell die Rohstoffpreise sind dabei Ausschlag gebend, ob gegenüber konventionellen Hackgut und Holzpellets ein Kostenvorteil bei den Wärmegestehungskosten erzielt werden kann. Kosten für notwendige Anlagenadaptation, erhöhten Wartungsaufwand und erhöhte Aschenentsorgung sowie die Additivkosten leisten dabei einen nur geringfügigen Beitrag.

Abgeleitet aus Anfragen bei Feuerungsherstellern (sowohl in Österreich als auch im Ausland) kann festgestellt werden, dass ein stetig zunehmendes Interesse an der thermischen Nutzung von landwirtschaftlichen Brennstoffen in Biomassefeuerungsanlagen vorhanden ist, viele Projekte aber nicht realisiert werden können, da mit den vorhandenen Holzfeuerungstechnologien eine Nutzung dieser Brennstoffe auf Grund der zu erwartenden aschebedingten Probleme in der Regel nicht möglich ist. Für Feuerungshersteller resultiert somit aus den Projektergebnissen die Möglichkeit, potentielle Kunden auf die Nutzung von Additiven aufmerksam zu machen und so Projekte, bei denen additivierte landwirtschaftliche Brennstoffe in Anlagen basierend auf Holzfeuerungstechnologien eingesetzt werden, zu entwickeln. Diese zusätzliche Alternative ist vor allem angesichts des stagnierenden Marktes bei mittelgroßen und großen Holzfeuerungen für heimische Feuerungshersteller von Relevanz.

Für Brennstoffhersteller und Brennstoffhändler ermöglichen es die Erkenntnisse aus dem Projekt, Additivierungsstrategien für landwirtschaftliche Brennstoffe zu entwickeln und damit ihr Produktportfolio zu erweitern. Wesentlich wird es dabei sein, die Projektergebnisse auch unter Heizwerkbetreibern und Wärmeversorgern weiter bekannt zu machen, damit sie sich der Möglichkeit derartige Brennstoffsortimente einzusetzen, bewusst werden. Ein weiterer wesentlicher Aspekt dabei ist auch, entsprechend kostengünstige Rohstoffpotentiale für die Produktion der additiven Brennstoffe zu aktivieren um deren Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Holzpellets und Hackgut zu verbessern. Mit der Entwicklung eines Marktes für additivierte landwirtschaftliche Brennstoffe ist dabei auch mit einer Aktivierung entsprechender kostengünstiger Rohstoffsortimente zu rechnen.

Für weitere Arbeiten muss das Augenmerk auf die Anwendung der entwickelten Additivierungsstrategie auf unterschiedliche Biomassesortimente gelegt werden. Dadurch können, entsprechend den regionalen Verfügbarkeiten landwirtschaftlicher Biomasse-Rohmaterialien, potentielle Brennstoff-Alternativen für den Einsatz in konventionellen Feuerungsanlagen für holzartige Biomasse-Brennstoffe geschaffen werden.

Projekte, die sich mit den Dauereinsatz additiver landwirtschaftlicher Brennstoffe in konventionellen Holzfeuerungen unter wissenschaftlicher Begleitung beschäftigen, sind dabei sehr zu begrüßen. Solche Projekte haben einerseits eine Vorbildwirkung und können noch skeptische Anlagenbetreiber dazu motivieren, diese neue Brennstoffalternative zu nutzen, sie würden aber auch die derzeit noch nicht verfügbaren Daten zu Langzeiteffekten (Auswirkung auf Wartung, Instandhaltung, etc.) liefern, und damit die breite Markteinführung additiver Brennstoffe unterstützen.

6 Literaturverzeichnis

1. BRUNNER Thomas, BIEDERMANN Friedrich, KANZIAN Werner, EVIC Nicola, OBERNBERGER Ingwald. Advanced biomass fuel characterisation based on tests with a specially designed lab-reactor. Energy Fuels. 2013, Bd. 27, 5691–5698.
2. SOMMERSACHER Peter, BRUNNER Thomas, OBERNBERGER Ingwald, 2012: Fuel indexes – a novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels. In: Energy&Fuels, 2012, 26 (1), pp 380-390

7 Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: S, Cl, K-, N- und Aschegehalte unterschiedlicher Biomasse-Brennstoffe	5
Abbildung 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Laborreaktortestläufe bzgl. K-Freisetzung und Erweichungstemperatur	13
Abbildung 3: Erweichungstemperatur bzw. K-Freisetzungsfaktor vs. BSI	14
Abbildung 4: Ternäre Phasendiagramme $\text{CaO-K}_2\text{O-SiO}_2$ und $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$	15
Abbildung 5: Schema der Feuerungsanlage mit Messstellen	18
Abbildung 6: SEM/EDX-Analyse von Schlackeproben der Maisspindel-Testläufe	20
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Additivierungsstrategie	23

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektrelevante landwirtschaftliche Biomasse-Brennstoffe	10
Tabelle 2: Projektrelevante Additive	10
Tabelle 3: Ursprüngliche und adaptierte Brennstoff-Indexe der Brennstoff-Additiv-Mischungen für die Laborreaktor-Testläufe	12
Tabelle 4: Spezifischer Energieverbrauch der Pelletierung von Maisspindeln, Weizenstroh und Rapsstroh im Vergleich zu Fichtenholz bei gleichem Durchsatz	17
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testläufe mit den Weizenstroh-Brennstoffen	18
Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testläufe mit den Rapsstroh-Brennstoffen	19
Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testläufe mit den Maisspindel-Brennstoffen	19
Tabelle 8: Vergleich der Emissionen der Testläufe	21
Tabelle 9: Vergleich der jährlichen Differenzkosten der Projekt-Brennstoffe mit Hackgut und Holzpellets – Szenario 1	22
Tabelle 10: Vergleich der jährlichen Differenzkosten der Projekt-Brennstoffe mit Hackgut und Holzpellets – Szenario 2	22

8 Kontaktdaten

Konsortialführer:

Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger

Institut für Prozess- und Partikeltechnik, Arbeitsgruppe „Energetische Biomassenutzung“, TU Graz

Inffeldgasse 13, 8010 Graz

Tel.: +43 873 481300-0

Fax: +43 316 481300-4

Email: ingwald.obernberger@tugraz.at

www.ippt.tugraz.at.at

Projektpartner:

BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH

Inffeldgasse 21b, 8010 Graz

Tel.: +43 316 481300-0

Fax: +43 316 481300-4

www.bios-bioenergy.at

Holzforschung Austria - Österreichischen Gesellschaft für Holzforschung

Franz Grill-Straße 7, A-1030 Wien

Tel.: +43 1 798 26 23-0

Fax: +43 1 798 26 23-50

<http://www.holzforschung.at/>

IMPRESSUM

Verfasser

Ingwald Obernberger
Institut für Prozess- und Partikeltechnik,
Arbeitsgruppe „Energetische
Biomassenutzung“, TU Graz
Inffeldgasse 13, 8010 Graz
Tel.: +43 873 481300-0
Fax: +43 316 481300-4
E-Mail: ingwald.obernberger@tugraz.at
Web: www.ippt.tugraz.at

Projektpartner und AutorInnen

Institut für Prozess- und Partikeltechnik, TU
Graz

- Ingwald Obernberger
- Thomas Brunner
- Michael Wohlmuther

BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH

- Friedrich Biedermann
- Christoph Mandl

Holzforschung Austria – Österreichische
Gesellschaft für Holzforschung

- Wilfried Pichler

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch
die Forschungsförderungsgesellschaft
(FFG) sind für die Weiternutzung der hier
enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH