

65

Berichte aus dem TFZ

Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinf Feuerungsanlagen

Verbrennungstechnische
Optimierung durch Additivierung
und Mischung



**Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen
Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und
Mischung**



Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen

Verbrennungstechnische Optimierung durch
Additivierung und Mischung

Robert Mack
Dr. Daniel Kuptz
Claudia Schön
Dr. Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 65

Straubing, März 2020

Titel: Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinf Feuerungsanlagen
Autoren: Robert Mack, Dr. Daniel Kuptz, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann
Projektleiter: Dr. Hans Hartmann
Mitarbeiter: Elisabeth Rist, Benedikt Haas, Albert Maierhofer, Stephan Winter, Thomas Kiesslinger, Markus Wiesbeck, Anja Rocktäschel

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22404415 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.03.2016 bis 28.02.2019. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Autoren möchten sich bei der Fa. Amandus Kahl GmbH & Co. KG (Prof. Werner Sitzmann und Mitarbeitende) herzlich für die Unterstützung bei technischen Fragen zur Herstellung der Versuchspellets an der Pelletieranlage des TFZ bedanken.

© 2020
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werks darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Robert Mack, Dr. Daniel Kuptz, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann, Anna Grundner, Ulrich Eidenschink

Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2020
Gestaltung: Mack, Kuptz, Hartmann

Fotonachweis: Robert Mack, Elisabeth Rist; Tobias Hase/StMELF (Titelbild)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	11
1 Einleitung	13
2 Stand des Wissens.....	17
2.1 Brennstoffdesign	17
2.1.1 Optimierung der Brennstoffzusammensetzung durch Additiveren oder Vermischen.....	17
2.1.2 Optimierung der physikalischen Brennstoffeigenschaften	19
2.2 Feuerungstechnik.....	20
2.3 Wirkungsweise von Kaolin als Additiv.....	20
2.4 Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens	22
2.5 Rechtliche Rahmenbedingungen für alternative Brennstoffe	23
2.6 Einschränkungen für Additive durch Vorgaben in Brennstoffnormen und Verordnungen	25
3 Zielsetzung und Aufbau des Projekts	27
4 Material und Methoden	29
4.1 Brennstoffherstellung	29
4.1.1 Auswahl und Beschreibung der Ausgangsstoffe.....	29
4.1.2 Eingesetzte Pelletiertechnik und Beschreibung des Pelletierprozesses.....	30
4.1.3 Bestimmung chemischer und physikalischer Brennstoffeigenschaften	36
4.2 Feuerungsversuche	37
4.2.1 Beschreibung der verwendeten Feuerung	37
4.2.2 Prüfstands Aufbau und Messtechnik	39
4.2.3 Ablauf der Feuerungsversuche	41
4.3 Methoden zur Vorhersage bzw. Bewertung der Verschlackungsanfälligkeit der Brennstoffe bzw. Brennstoffaschen.....	42
4.3.1 PASSA-Methode (Pellet Ash and Slag Sieving Assessment)	42
4.3.2 Slag Analyzer.....	44
4.3.3 Bewertung der Kesselaschen (Verschlackungsgrad „Sintering degree“).....	48
4.4 Statistische Analysen der Messergebnisse.....	49
5 Brennstoffanalysen und Brennstoffherstellung	51
5.1 Brennstoffanalysen der Ausgangsmaterialien und Festlegung der Additivierungsstufen.....	51
5.2 Herstellung der Pellets.....	53
5.3 Zusätzliche Versuche mit direkter Additivzugabe und Mischen von Pellets	60

5.4	Beurteilung der Brennstoffe hinsichtlich der verbrennungstechnischen Eigenschaften (Brennstoffindizes)	61
5.5	Verschleiß an der Pelletieranlage.....	63
6	Ergebnisse der Feuerungsversuche	67
6.1	Betriebserfahrungen und allgemeine Betriebsparameter (Übersicht)	67
6.2	Gasförmige Emissionen.....	69
6.2.1	CO-Emissionen	69
6.2.2	Org.-C-Emissionen.....	73
6.2.3	NO _x -Emissionen	76
6.2.4	HCl und SO ₂ -Emissionen.....	81
6.3	Partikelförmige Emissionen.....	83
6.3.1	Gesamtstaubemissionen.....	83
6.3.2	Partikelgrößenverteilung und Partikelanzahl	86
7	Ergebnisse der Untersuchungen zur realen Verschlackung im Kessel und bei den Labormethoden	93
7.1	Allgemeine Beobachtungen zu Ascheanfall und Ablagerungen	93
7.2	Ergebnisse zur Beurteilung der Kesselaschen.....	95
7.3	Ergebnisse der Versuche mit der PASSA-Methode	100
7.4	Ergebnisse der Versuche mit dem Slag Analyzer	103
7.5	Vergleich der Labormethoden mit den Feuerungsversuchen am Kessel.....	105
7.6	Glühverluste der Aschen aus den Feuerungsversuchen	107
	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	111
	Abstract	117
	Quellenverzeichnis	119
	Anhang: Guidelines for advanced fuel and boiler design	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wärme und Kältebedarf 2015 in den 28 EU-Mitgliedsstaaten verglichen mit dem gesamten Primärenergiebedarf [49].....	13
Abbildung 2:	Prozentuale Verteilung der regenerativen Energieträger zur Wärmebereitstellung in den 28 EU-Mitgliedsstaaten 2015 [11].....	14
Abbildung 3:	Aufbau der Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Ko. KG, Typ 33-390) am TFZ mit Materialzufuhr und Vibro-Rinne	31
Abbildung 4:	Schematische Darstellung eines Presskanals einer beidseitig nutzbaren Flachmatrize (Quelle: TFZ).....	32
Abbildung 5:	Extraktmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK)	33
Abbildung 6:	Befeuchtung des gemahlene Rohmaterials mit einem Drucksprühgerät (GLORIA Haus- und Gartengeräte GmbH, prima 5 Typ 42 E)	34
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des Guntamatic Powerchip 20/30 [50].....	38
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der für die Versuche verwendeten Messstrecke und Anordnung der Messgeräte am Feuerungsprüfstand des TFZ	40
Abbildung 9:	Temperaturprogramm bei der Veraschung in der PASSA-Methode [72]	43
Abbildung 10:	Schematischer Aufbau des Slag Analyzers [73].....	45
Abbildung 11:	Verlauf des Wassergehalts, des Aschegehalts und des Heizwerts über den Pelletierprozess von WS3,45K	56
Abbildung 12:	Gegenüberstellung von Schüttdichte und mechanischer Festigkeit in Abhängigkeit von der Partikeldichte.....	59
Abbildung 13:	Verschleiß an einer der verwendeten Matrizen (links) und am Kollerkopf (rechts) der Pelletieranlage am TFZ.....	64
Abbildung 14:	Schlackebrocken verstopfen die Entaschungsöffnung bei der Verbrennung reiner Weizenstrohpellets im 30-kW-Kessel	68
Abbildung 15:	CO-Emissionen aller Brennstoffe mit Weizenstroh (WS) im Vergleich zu Holzpellets (W) im 30-kW-Kessel (Erläuterungen vgl. Tabelle 14)	70
Abbildung 16:	Vergleich des CO-Konzentrationsverlaufs von W50WS50 und W50+WS50 von 0 bis 5.000 ppm (oben) und 0 bis 300 ppm (unten)	71
Abbildung 17:	CO-Emissionen aller Brennstoffe aus Pappel im Vergleich zu Holzpellets (W) (Erläuterungen vgl. Tabelle 14)	72
Abbildung 18:	CO-Emissionen aller Brennstoffe aus Sonnenblumenspelzen und Gras im Vergleich zu Holzpellets.....	73
Abbildung 19:	Org.-C-Emissionen aller Brennstoffe aus Weizenstroh im Vergleich zu Holzpellets.....	74

Abbildung 20:	Org.-C-Emissionen aller Brennstoffe aus Pappel im Vergleich zu Holzpellets.....	75
Abbildung 21:	Org.-C-Emissionen aller Brennstoffe aus Sonnenblumenspelzen und Gras im Vergleich zu Holzpellets	76
Abbildung 22:	Abhängigkeit der NO _x -Emissionen vom Brennstoffstickstoffgehalt der untersuchten Brennstoffe.....	77
Abbildung 23:	NO _x -Emissionen aller Brennstoffe aus Weizenstroh im Vergleich zu Holzpellets.....	78
Abbildung 24:	NO _x -Emissionen aller Brennstoffe aus Pappel im Vergleich zu Holzpellets.....	79
Abbildung 25:	NO _x -Emissionen aller Brennstoffe aus Sonnenblumenspelzen und Gras im Vergleich zu Holzpellets	80
Abbildung 26:	HCl-Emissionen der untersuchten Brennstoffe in Abhängigkeit vom Chlorgehalt im Brennstoff und von den Additivierungsstufen	82
Abbildung 27:	SO ₂ -Emissionen der untersuchten Brennstoffe in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff und von den Additivierungsstufen	82
Abbildung 28:	Gesamtstaubemissionen der Weizenstrohbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets (W)	83
Abbildung 29:	Gesamtstaubemissionen der Pappelbrennstoffe im Vergleich zu Holzpellets (W)	85
Abbildung 30:	Gesamtstaubemissionen der Sonnenblumenspelzen- und Grasbrennstoffe im Vergleich zu Holzpellets (W)	86
Abbildung 31:	Prozentuale Partikelanzahlverteilung innerhalb der PM ₁ -Fraktion für alle Weizenstrohbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets	89
Abbildung 32:	Prozentuale Partikelanzahlverteilung innerhalb der PM ₁ -Fraktion für alle Pappelbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets	90
Abbildung 33:	Prozentuale Partikelanzahlverteilung innerhalb der PM ₁ -Fraktion für alle Sonnenblumenspelzen- und Grasbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets.....	90
Abbildung 34:	Ablagerungen am Wärmetauscher des Kessels nach einem Versuchstag (8 h Vollastbetrieb + 2 h Aufheizdauer) mit reinen Graspellets	94
Abbildung 35:	Ablagerungen an dem Filter der Abgasprobenahmesonde (links) und der Staubprobenahmesonde (rechts) nach einem Versuchstag (8 h Vollastbetrieb + 2 h Aufheizdauer) mit reinen Graspellets.....	95
Abbildung 36:	Fraktion > 1 mm der Bodenasche nach dem Versuch mit Holzpellets.....	97
Abbildung 37:	Größte aus dem Kessel entnommene Schlackebrocken der Weizenstrohbrennstoffe im Vergleich	98

Abbildung 38: Größte aus dem Kessel entnommene Schlackebrocken der Pappel- (obere Zeile), Sonnenblumenspelzen- (mittlere Zeile) und Grasbrennstoffe (untere Zeile) im Vergleich.....	99
Abbildung 39: Optischer Vergleich der Glühschalen mit Proben aller pelletierten Brennstoffe nach thermischer Behandlung (definierte Veraschung) gemäß der PASSA-Methode	101
Abbildung 40: Optischer Vergleich der Glühschalen aller pelletierten Brennstoffe nach der thermischen Behandlung (definierte Veraschung) gemäß der PASSA-Methode und Entnahme der Proben mit einem Pinsel	102
Abbildung 41: Größte aus dem Slag Analyzer entnommene Schlackebrocken der pelletierten Brennstoffe im Vergleich (* Brennstoffe, deren Aschegehalt mit Holzpellets verdünnt wurde)	104
Abbildung 42: Vergleich des Slag-Index für Partikel > 3,15 mm der Labormethoden im Vergleich mit den Aschen aus den Feuerungsversuchen	106
Abbildung 43: Kumulierte Glühverluste der Aschen aus den Feuerungsversuchen bei 550 °C und 815 °C	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der derzeit bzw. zukünftig geltenden Emissionsanforderungen bei der Errichtung von Neuanlagen zur Verbrennung fester Biomasse in der EU und Deutschland [7] [8] [9] [13].....	24
Tabelle 2:	Rohmaterialien für die Brennstoffherstellung	29
Tabelle 3:	Chemische Zusammensetzung des verwendeten Kaolins der Firma KAMIG in Österreich, in Masseprozent (Quelle: KAMIG).....	30
Tabelle 4:	Technische Spezifikationen der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390 [1].....	31
Tabelle 5:	Technische Spezifikationen des verwendeten Extraktmischers.....	34
Tabelle 6:	Technische Spezifikationen der am TFZ verfügbaren Matrizen [1].....	35
Tabelle 7:	Erfahrungswerte des Pressenherstellers für optimale Wassergehalte und Pressverhältnisse bei verschiedenen Biomassen (Quelle: Firma Amandus Kahl)	36
Tabelle 8:	Ermittelte physikalische und chemische Eigenschaften der Brennstoffe, z. T. auch Rostaschen und beladene Planfilter.....	36
Tabelle 9:	Technische Daten des Guntamatic Powerchip 20/30 [50].....	39
Tabelle 10:	Kategorien zur Einordnung der Aschen aus dem Slag Analyzer (angepasst aus [64])	47
Tabelle 11:	Beschreibung der fünf Verschlackungsgrade („Sintering degrees“) nach [66]	48
Tabelle 12:	Analyseergebnisse der Brennstoffzusammensetzung und Ascheschmelzverhalten der Rohmaterialien	52
Tabelle 13:	Basierend auf den Brennstoffanalysen berechnete Additivierungsstufen	53
Tabelle 14:	Nomenklatur der Versuchsbrennstoffe	54
Tabelle 15:	Eingestellter Wassergehalt, Wasserdosierung, bei der Pelletierung verwendete Matrice und Matrizenorientierung	55
Tabelle 16:	Physikalische Eigenschaften der hergestellten Versuchsbrennstoffe	58
Tabelle 17:	Ergebnisse der Untersuchungen zu Pelletlänge und Durchmesser nach DIN EN ISO 17829 [33].....	60
Tabelle 18:	Elemente der pelletierten Brennstoffe	61
Tabelle 19:	Berechnete Brennstoffindizes der pelletierten Versuchsbrennstoffe.....	63
Tabelle 20:	Zusammenfassung der Betriebsparameter und gasförmigen Emissionen für die untersuchten Brennstoffe (zu den Heizwerten, Asche- und Wassergehalten vgl. Tabelle 16).....	69

Tabelle 21:	Gravimetrische Partikelgrößenverteilung gemessen mit dem Kálmán Impaktor	87
Tabelle 22:	Anzahlbezogene Partikelgrößenverteilung gemessen mit dem ELPI+.....	88
Tabelle 23:	Ergebnisse der visuellen Beurteilung (Kategorie) und der granulometrischen Untersuchung aller Kesselaschen nach den Feuerungsversuchen.....	96
Tabelle 24:	Slag Index der PASSA-Methode für die untersuchten Brennstoffe, berechnet für Aschepartikel > 3,15 mm, sowie Anteil der nach Veraschung an der Glühschale anhaftenden Probe	103
Tabelle 25:	Ergebnisse der Untersuchungen aller pelletierten Brennstoffe mit dem Slag Analyzer	105
Tabelle 26:	Slag-Index der Labormethoden im Vergleich zu den Feuerungsversuchen am Kessel.....	107
Tabelle 27:	Glühverluste der Aschen aus den Feuerungsversuchen bei 550 °C und 815 °C	109

1 Einleitung

Der derzeitige Rahmen der Renewable Energy Directive (RED) für das Jahr 2020 sieht vor, dass 20 % des Primärenergieverbrauchs der EU aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden sollen [47]. Bis 2030 soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch in der EU mindestens 27 % betragen [46]. Dieses Ziel ist auf Ebene der EU verbindlich und soll durch die Beiträge der einzelnen Mitgliedstaaten erreicht werden [46] [47]. Dabei entfallen fast 50 % und damit je nach Datenquelle ca. 6.350 TWh (2015 [49]) bzw. 5.892 TWh (2015 [11]) des Primärenergieverbrauchs der EU auf den Wärme- und Kältesektor (Abbildung 1), von denen wiederum rund 75 % nach wie vor mit fossilen Brennstoffen gedeckt werden [46].

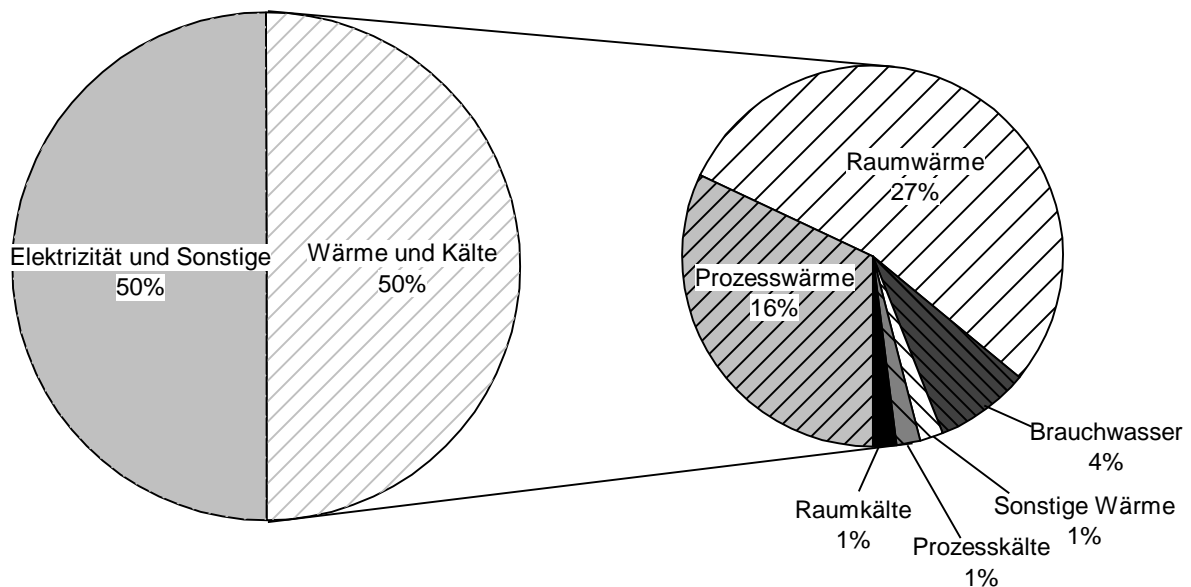


Abbildung 1: Wärme und Kältebedarf 2015 in den 28 EU-Mitgliedsstaaten verglichen mit dem gesamten Primärenergiebedarf [49]

Den größten Anteil des Energieverbrauchs für Wärme und Kälte macht dabei mit ca. 53 % am Energieverbrauch die Raumwärme aus, gefolgt von Prozesswärme mit ca. 32 % [49]. Mit ca. 2.850 TWh (2015) bzw. ca. 45 % des gesamten Energieverbrauchs für Wärme und Kälte liegt der größte Anteil im häuslichen Sektor [49], dicht gefolgt von der Industrie mit ca. 2.390 TWh (2015), wobei davon ca. 80 % Prozesswärme mit > 200 °C sind [49].

Von diesen insgesamt 6.350 TWh (2015 [49]) bzw. 5.892 TWh (2015 [11]) werden derzeit ca. 13 % (2015 [49]) bis 18,6 % (2015 [11]) aus regenerativen Energieträgern gewonnen und von diesen wiederum ca. 12 % (2015 [49]) bzw. 15 % (2015 [11]) aus Biomasse.

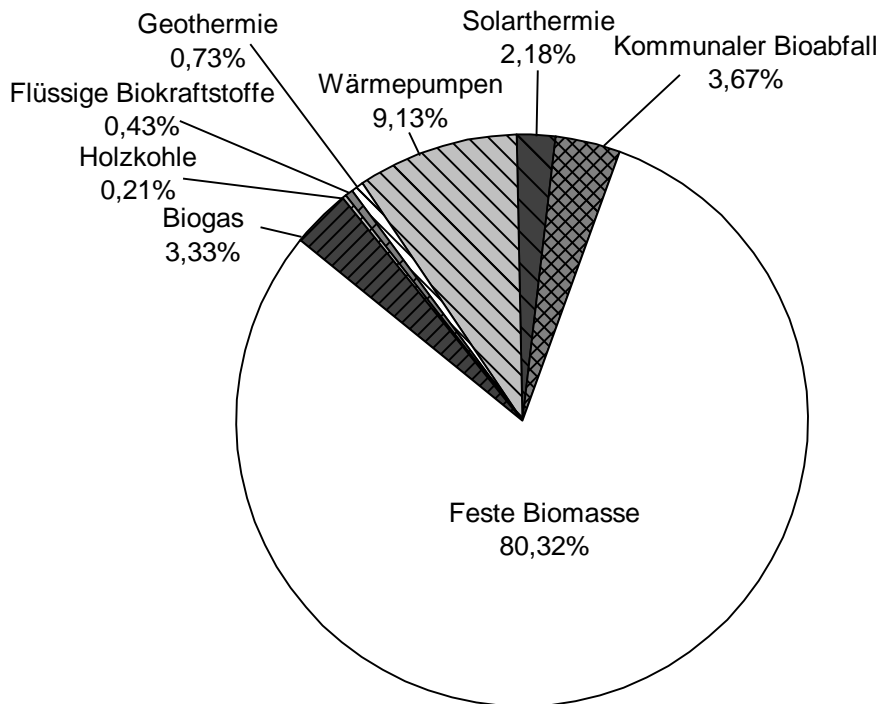


Abbildung 2: Prozentuale Verteilung der regenerativen Energieträger zur Wärmebereitstellung in den 28 EU-Mitgliedsstaaten 2015 [11]

Dabei stellen die Festbrennstoffe aus holzartiger Biomasse nach wie vor den größten Anteil (Daten für EU28 in 2015) an der Wärmegewinnung aus Biomasse. In den 28 Mitgliedsstaaten der EU wurden in 2015 ca. 80 % der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien durch Festbrennstoffe bereitgestellt (Abbildung 2). 51 % davon wurden in privaten Haushalten und weitere 26 % in der Industrie aus vorwiegend holzartiger Biomasse in Form von Pellets, Hackschnitzeln oder Scheitholz produziert [80] [11].

Da das Potenzial an holzartiger Biomasse jedoch begrenzt ist [58], ist es wichtig, weitere „schwierige“ Brennstoffe für den Einsatz in kleinen ($< 500 \text{ kW}_{\text{th}}$, Haushalte und Gewerbe) bis mittelgroßen ($0,5\text{--}10 \text{ MW}_{\text{th}}$, Gewerbe und Industrie) Biomassefeuerungen verfügbar bzw. verwertbar zu machen. Dabei handelt es sich vor allem um Abfall- bzw. Reststoffe sowie Nebenprodukte aus der Landwirtschaft, wie z. B. Stroh und holzartige Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen (KUP), die nicht in direkter Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion stehen. „Schwierig“ für eine Nutzung in kleinen bis mittelgroßen Anlagen sind diese Brennstoffe aufgrund ihrer zum Teil ungünstigen physikalischen und chemischen Eigenschaften wie beispielsweise ein geringerer Energiegehalt, ein hoher Aschegehalt, ein erhöhter Gehalt aerosolbildender Elemente oder eine niedrige Ascheerweichungstemperatur.

Im Rahmen des europäischen ERA-NET-Projekts „BIOFLEX!“, „Saubere und flexible Nutzung schwieriger Biobrennstoffe in kleinen bis mittelgroßen Verbrennungsanlagen“ sollen Lösungsansätze für eine höhere Brennstoffflexibilität erarbeitet werden, um das Entwicklungspotenzial solcher schwierigen Biobrennstoffe zu steigern. Dabei sollen

Brennstoffe durch Zugabe von Additiven oder durch Herstellung von Brennstoffmischungen in ihrem Verschlackungsverhalten verbessert werden, wobei gleichzeitig eine Senkung des Schadstoffausstoßes erreicht werden soll.

Zu diesem Zweck wurden insgesamt vier Agrarbrennstoffe (Weizenstroh, Pappelholz aus dem Kurzumtrieb, Sonnenblumenspelzen und Gras) an der Pelletieranlage des TFZ pur und mit Kaolin-Zugabe pelletiert (siehe Unterkapitel 4.1 und Kapitel 1). Als Referenzbrennstoff kamen handelsübliche ENplus-A1-Holzpellets zum Einsatz. Diese Brennstoffe wurden in einem 30-kW-Hackschnitzelkessel mit bewegtem Treppenrost (siehe Unterkapitel 4.2) verbrannt und hinsichtlich ihrer Emissionsauswirkungen bewertet (siehe Kapitel 6). Zur Bewertung des Verschlackungsverhaltens wurden die Aschen aus den Feuerungsversuchen untersucht (siehe Abschnitt 4.3.3) und zwei unterschiedliche Schnellbestimmungsmethoden zur Untersuchung der Schlackebildung bei pelletierten Brennstoffen (siehe Abschnitte 4.3.1 und 4.3.2) angewendet. Die Ergebnisse zu den Schnellbestimmungsmethoden wurden dann mit den Ergebnissen aus der direkten Untersuchung der Kesselaschen verglichen (siehe Kapitel 7).

2 Stand des Wissens

Im folgenden Abschnitt werden die zwei wesentlichen Arbeitsschwerpunkte des Projekts „BIOFLEX!“ beschrieben. Die praktischen Untersuchungen, die am Technologie und Förderzentrum sowie bei den schwedischen Projektpartnern durchgeführt wurden, beschäftigen sich ausschließlich mit dem Brennstoffdesign. Die Untersuchungen zur Feuerungstechnik wurden durch die österreichischen und polnischen Projektpartner durchgeführt. Daraus wurden die Leitfäden zum Brennstoffdesign und zur Anlagenoptimierung erarbeitet, sie können auf der Projekthomepage unter [https://bioflex-eranet.eu/media/2019/](https://bioflex-eranet.eu/media/2019/07/20190703-Guidelines-for-advanced-fuel-and-boiler-design.pdf)

07/20190703-Guidelines-for-advanced-fuel-and-boiler-design.pdf heruntergeladen werden und finden sich auch im Anhang zu diesem Bericht.

2.1 Brennstoffdesign

Einen der größten Einflüsse auf die Verbrennungsqualität hinsichtlich der Emissionen, des Wirkungsgrads und des störungsfreien Betriebs bei der Biomasseverbrennung hat der Brennstoff selbst [58]. Jeder Brennstoff weist bedingt durch die Art und Herkunft der Biomasse, aber auch durch Ernte und Transport (evtl. Verunreinigungen) sowie Aufbereitung unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften auf, welche die Verbrennung maßgeblich beeinflussen können [58]. Hierzu zählen:

- Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert,
- mechanische Eigenschaften wie Abriebfestigkeit (bei Pellets), Schüttdichte und Feinanteil bzw. Korngrößenverteilung,
- Gehalt aerosolbildender Elemente (Kalium (K), Schwefel (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Zink (Zn), Silizium (Si) und Phosphor (P)) → Einfluss auf die Gesamtstaubemissionen,
- Gehalt an Stickstoff (N), Schwefel (S) und Chlor (Cl) im Brennstoff → Einfluss auf NO_x , SO_x , und HCl-Emissionen sowie Korrosion durch Säurebildung (SO_x , und HCl),
- Gehalt an Kalium (K), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Kalzium (Ca) und Silizium (Si), Phosphor (P) → Einfluss auf die Ascheerweichung (Schlackebildung).

Diese Parameter können durch gezielte Änderung der chemischen Zusammensetzung sowie der physikalischen Eigenschaften optimiert oder gezielt für bestimmte Anwendungen zugeschnitten werden („Brennstoffdesign“).

2.1.1 Optimierung der Brennstoffzusammensetzung durch Additiveren oder Vermischen

Um die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs zugunsten niedrigerer Emissionen (v. a. Partikel bzw. Aerosole) sowie einer verringerten Störanfälligkeit durch Schla-

ckeildung positiv zu beeinflussen, kann entweder ein Additiv zugemischt oder der Brennstoff mit einer zweiten Biomasse anderer Zusammensetzung vermischt werden [58].

Wenn die Bildung partikelförmiger Emissionen beeinflusst werden soll, liegt das Hauptaugenmerk auf dem im Brennstoff enthaltenen Kalium (K), das üblicherweise zusammen mit Natrium (Na) den Hauptanteil der Aerosolbildner in fester Biomasse ausmacht, sowie auf dem Schwefel- (S) und Chlorgehalt (Cl). Über die sogenannten sekundären Bildungsreaktionen mit hoher Reaktivität (Formeln (2.1)–(2.3)) bilden sich bei der Verbrennung aus dem im Brennstoff enthaltenen K, S und Cl zunächst $\text{HCl}_{(g)}$, $\text{SO}_{2(g)}$ und bei Temperaturen über 1.200 °C $\text{KOH}_{(g)}$. Diese bilden beim Abkühlen vorwiegend Kaliumsalze (K_2SO_4 , KCl und K_2CO_3), die niedrige Schmelztemperaturen aufweisen und mit dem Abgasstrom mitgerissen werden. KCl (fest bei $< 760\text{ °C}$) und K_2SO_4 machen ca. 80 bis 90 % der gesamten anorganischen Aerosolfracht aus [58].



Wobei:

g = gaseous (gasförmig),

l = liquid (flüssig),

s = solid (fest).

Bei den natriumhaltigen Komponenten kondensiert zunächst NaCl gefolgt von Na_2SO_4 [58] bei fortschreitender Abkühlung.

Zur Verringerung der Kaliumsalzbildung stehen folgende Optionen zur Verfügung [58]:

- Auswaschen oder Auspressen der in Wasser gelösten aerosolbildenden Elemente (hier nicht untersucht),
- Verdünnen der aerosolbildenden Elemente durch **Mischen** mit anderer Biomasse mit niedrigem Gehalt an Aerosolbildnern (z. B. Mischungen von Stroh mit Holz),
- Binden der aerosolbildenden Elemente in hitzebeständigen Verbindungen durch Beimischung beispielsweise mineralischer **Additive**. Diese können dann über die Rostasche entsorgt werden.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde Kaolin (Abschnitt 4.1.1) als aluminiumbasiertes Additiv verwendet. Aluminium bindet Kalium und Silizium in die Asche ein und erhöht damit den Ascheanfall. Neben aluminiumbasierten Zusatzstoffen wären auch Additive, die den Gehalt an Kalzium, Magnesium, Phosphor und Schwefel im Brennstoff erhöhen, wie beispielsweise Kalk, Magnesiumoxid Kalziumphosphate, Ammoniumsulfate, Aluminiumsulfate und Eisensulfate denkbar [58].

Der Effekt des Mischens von Biomassen wurde hier mit Mischungen aus Holz und Weizenstroh untersucht. Ähnliche Untersuchungen zeigen einen positiven Effekt auf die gasförmigen und Gesamtstaubemissionen ab einem Holzanteil in der Mischung von ca. 50 m-% [84] und einen positiven Effekt auf die Verschlackung ab einem Holzanteil von ca. 70 m-% [83].

Ascheschmelzverhalten. Aschen bestimmter Halmgutbrennstoffe, wie z. B. Stroh, können bereits ab Temperaturen von 900 °C schmelzen. Daher können solche Brennstoffe nur schwierig bis gar nicht in vorhandenen Holzfeuerungsanlagen eingesetzt werden [58]. Um solche Brennstoffe mit vorhandener Anlagentechnik nutzen zu können, kann das Ascheschmelzverhalten durch Additiveren der Biomasse oder Vermischung mit z. B. holzartiger Biomasse beeinflusst werden. Den größten Einfluss auf die Ascheerweichungstemperatur scheinen aluminiumbasierte Additive zu haben [58]. Jedoch sind – abhängig von der Brennstoffzusammensetzung – auch auf Magnesium und Kalzium basierende Additive geeignet, um das Ascheschmelzverhalten zu beeinflussen.

Zur Einbringung von Additiven in den Brennstoff gibt es verschiedene Möglichkeiten [55]:

- Zumischung des Additivs zum Brennstoff vor der Pelletierung,
- Zugabe zum Brennstoff (z. B. Hackschnitzel) mittels Zudosierung in der Brennstoffzuführung zur Feuerungsanlage,
- Zugabe des Additivs mittels Primär- bzw. Sekundärluftstrom in den Brennraum.

2.1.2 Optimierung der physikalischen Brennstoffeigenschaften

Unter den Begriff „Brennstoffdesign“ fällt auch die Anpassung bzw. Optimierung der physikalischen und/oder mechanischen Brennstoffparameter, die das Verbrennungsverhalten verbessern können. Hierzu gehören u. a. der Wassergehalt, die Schüttdichte und Rohdichte, der Feinanteil und die Korngrößenverteilung des Brennstoffs sowie die Homogenität. Hierunter fallen folgende relevante Aufbereitungsschritte [58]:

- diverse Trocknungsverfahren zur Verringerung des Wassergehalts.
- Zerkleinern und Klassieren zur Beeinflussung der Abmessungen, Korngrößenverteilung und des Feingehalts.
- Pressen (Pelletieren, Brikettieren) zur Beeinflussung der Rohdichte/Schüttdichte, Abmessungen, Feinanteil, Korngrößenverteilung und Brennstoffhomogenität.

2.2 Feuerungstechnik

Eine hohe Brennstoffflexibilität kann neben der Anpassung des Brennstoffs selbst auch durch die Optimierung der Feuerungsanlage auf die Brennstoffeigenschaften des zu verwendenden Brennstoffs ermöglicht werden. Im kleinen Leistungsbereich ($< 500 \text{ kW}_{\text{th}}$) kommen v. a. Festbettfeuerungen zum Einsatz, wobei für Brennstoffe mit einem hohen Aschegehalt und niedrigem Ascheschmelzpunkt nur Feuerungen mit seitlichem Einschub und bewegtem Rost oder Schubboden geeignet sind [58]. Im mittleren Leistungsbereich ($0,5\text{--}10 \text{ MW}_{\text{th}}$) sind sowohl Festbettfeuerungen (seitlicher Einschub) als auch stationäre Wirbelschicht- und Staubfeuerungen (Einblasfeuerungen) möglich. Wirbelschichtfeuerungen besitzen die größte Flexibilität in Bezug auf Brennstoffart, Aschegehalt und Wassergehalt [58].

Da die Feuerungen im mittleren Leistungsbereich nicht Gegenstand dieser Untersuchung und die Optimierung der Feuerungstechnik nicht Bestandteil der Arbeiten am TFZ war, werden hier nur die Optimierungspotenziale bei Festbettfeuerungen kurz genannt. Hierzu zählen [58]:

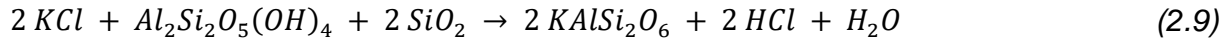
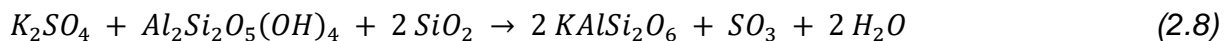
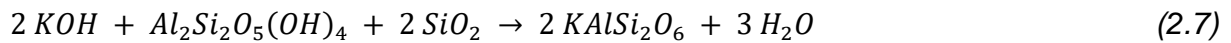
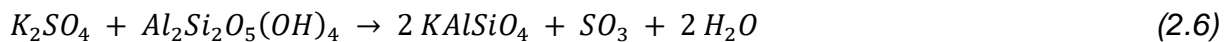
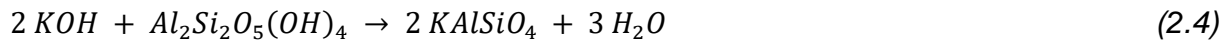
- Rostkühlung bzw. Kühlung des Glutbetts durch Primärluft oder Wasser,
- Senkung der Temperaturen im Glutbett durch Abgas-Rezirkulation,
- Vollständigere Verbrennung durch Luftstufung oder extreme Luftstufung [65],
- Reduzierung des Eintrags von Aschepartikeln (oder Additivmaterial) in das Abgas durch niedrige Strömungsgeschwindigkeit,
- Minimierung des Falschlufteintrags durch verbesserte Anlagendichtigkeit.

2.3 Wirkungsweise von Kaolin als Additiv

Eine Kaolinbeimischung zum Brennstoff bewirkt meist eine verringerte Schlackebildung sowie eine Minderung der Feinstaubemissionen. Die aus einschlägiger Literatur bekannten aerosolbildenden Elemente sind die Alkalimetalle Kalium (K) und Natrium (Na), die Spurenelemente Zink (Zn) und Blei (Pb) sowie Schwefel (S) und Chlor (Cl) [76] [62], wobei Kalium (K) dominiert.

K wird größtenteils während der Verbrennung als KOH und KCl in die Gasphase freigesetzt, aber auch kleinere Mengen an K_2SO_4 und K_2CO_3 können gebildet werden [57].

Kaolin ist ein Tonmineral und besteht zum größten Teil aus dem Mineral Kaolinit ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$). Alkalimetalle wie Kalium können in Anwesenheit von Kaolinit nach den Formeln (2.4)–(2.9) zu schwerschmelzenden kristallinen Verbindungen wie Kalsilit (KAlSiO_4) oder Leucit (KAlSi_2O_6) reagieren [67].



Folgt man den Reaktionsgleichungen (2.4)–(2.9), so wird deutlich, dass für die stöchiometrische Fixierung von 2 mol K in der Asche 1 mol $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ benötigt wird. Aus diesem Zusammenhang kann die für die Fixierung des Kaliums stöchiometrisch benötigte Menge an Kaolinit unter Verwendung der molaren Massen und des Kaliumgehalts in der Biomasse berechnet werden. Außerdem muss noch der Kaolinitgehalt des verwendeten Kaolins (hier 87 %) berücksichtigt werden. Zusätzlich können weitere Sicherheitszuschläge einberechnet werden, um die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens und damit die Reaktion der Edukte (Kaolinit und Kaliumverbindungen) zu Kaliumaluminiumsilikaten zu erhöhen [4]. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass es auch zu Reaktionen zwischen Kaolinit und Erdalkali-Metallen (Ca und Mg) kommen kann, was vor allem bei kalziumreichen holzartigen Brennstoffen (wie z. B. Pappel) berücksichtigt werden sollte. Zuletzt müssen auch die physikalischen Eigenschaften des Kaolins, wie z. B. Vermahlungsgrad und Wassergehalt, berücksichtigt werden. All diese Punkte beeinträchtigen die „Effektivität“ des eingebrachten Kaolinit und erhöhen somit die benötigte Additivmenge im Brennstoff. Der Faktor wurde für die Versuchsbrennstoffe im Projekt unter Berücksichtigung des Ca/K-Verhältnisses in der verwendeten Biomasse und mittels Erfahrungswerten des Projektpartners Umeå University festgelegt. Nach finaler Auswertung der Messdaten wurde dann für die Guidelines folgende Berechnungsmethode entwickelt [5]:

- Umrechnung der aschebildenden Elemente der Biomasse und des Additivs von mg/kg, d. auf mol/kg durch Division der Massenkonzentrationen durch die jeweiligen Molmassen (K: 39,10 g/mol, Na: 22,99 g/mol, Ca: 40,08 g/mol und Mg: 24,31 g/mol).
- Berechnung der theoretisch minimal nötigen Kaolinit-Menge $Additiv_{theo_min}$ (Formel (2.10)) in mol/kg der jeweiligen Biomasse, um alle Alkalimetalle zu binden (K und Na).

$$Additiv_{theo_min} = (K_{Brennstoff} + Na_{Brennstoff})/2 \quad (2.10)$$

- Berechnung der technisch mindestens erforderlichen Kaolinzugabemenge $Additiv_{level(I)}$ unter Berücksichtigung der Konzentrationen an K, Na, Ca und Mg im Additiv (K_{add}, Na_{add}, \dots) durch Formel (2.11)

$$Additiv_{level(I)} = \frac{Additiv_{theo_min}}{\frac{Al_{add} - (K_{add} + Na_{add} + 2(Ca_{add} + Mg_{add}))}{Al_{add}}} \quad (2.11)$$

- Um weitere potenzielle Unsicherheiten und limitierende Effekte auf die Funktionalität, Verfügbarkeit und die Effizienz des Additivs zu berücksichtigen, kann ein Faktor von z. B. 90 % berücksichtigt werden (Formel (2.12)). Dieser Faktor sollte basierend auf den spezifischen Gegebenheiten sowie den experimentellen Erfahrungen des Anwenders dieser Methode angepasst werden. Solche Gegebenheiten werden in den im Projekt erarbeiteten „Guidelines for advanced fuel and boiler design“ [5] beschrieben.

$$Additiv_{leve(I)} = \frac{Additiv_{level(I)}}{0,9} \quad (2.12)$$

2.4 Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens

Um eine erste Abschätzung über das Verbrennungsverhalten geben zu können, werden Brennstoffindizes basierend auf der Elementarzusammensetzung der Brennstoffe herangezogen [76] [59]. Dazu zählen:

- *Der Stickstoffgehalt.* Die Stickoxidemissionen (NO_x) hängen direkt vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs ab, sie fallen somit höher aus, wenn mehr Stickstoff im Brennstoff enthalten ist [58]. Das Niveau der NO_x -Emissionen wird zu einem geringen Teil von der eingesetzten Feuerungstechnik beeinflusst [58].

- *Molares $(K+Na)/[x(2S+Cl)]$ -Verhältnis.* Es beschreibt das erhöhte Korrosionsrisiko aufgrund der Bildung von HCl- und SO_x-Emissionen [76] [77], wobei der Faktor x die durchschnittlichen Freisetzungsraten von K und Na im Verhältnis zu den durchschnittlichen Freisetzungsraten von S und Cl beschreibt, die experimentell ermittelt werden. Dieser Faktor beträgt z. B. ca. 3,6 für Nadelholz und ca. 6,7 für Graspellets [76]. Ist das molare $(K+Na)/[x(2S+Cl)]$ -Verhältnis deutlich > 1 , sind nur geringe HCl- und SO_x-Emissionen zu erwarten. Ist dieses Verhältnis dagegen deutlich < 1 , muss mit erhöhten HCl- und SO_x-Emissionen gerechnet werden [76].
- *Summe der Aerosolbildner.* Als Indikator für die Höhe der Gesamtstaubemissionen mit einem Partikeldurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ (PM₁) sowie für die Bildung von Ablagerungen (z. B. Wärmetauscher) wird ausgehend von einer Elementaranalyse des Brennstoffs die Summe der Aerosolbildner ($\sum(K, Na, Pb, Zn)$) herangezogen [76] [59].
- *Molares Si/K-Verhältnis.* Die Kaliumfreisetzung in die Gasphase kann über die Berechnung des molaren Si/K-Verhältnisses abgeschätzt werden. Bei Werten unter 2,5 erfolgt eine erhöhte Kaliumfreisetzung in die Gasphase, während für Werte über 2,5 eine Einbindung von Kalium in die Asche dominiert [59].
- *Molares 2S/Cl-Verhältnis.* Das Risiko der Hochtemperaturkorrosion kann durch die Berechnung des molaren 2S/Cl-Verhältnisses abgeschätzt werden. Dabei stellen Werte über 8 kein Risiko, Werte über 4 ein geringes Risiko und Werte unter 2 ein erhöhtes Risiko dar [76].
- *Molares $(Si+P+K)/(Ca+Mg)$ -Verhältnis.* Es erlaubt eine Abschätzung des Ascheerweichungsverhaltens. Für Werte von über 2,5 typischerweise sind niedrige Ascheerschmelztemperaturen zu erwarten [76].
- *Molares Cl/Si-Verhältnis.* Es erlaubt ebenfalls eine Abschätzung der Kaliumfreisetzung in die Gasphase, wobei steigende Werte des Cl/Si-Verhältnisses auf eine erhöhte Kaliumfreisetzung hindeuten [6].

Im Unterschied zu den reinen Brennstoffen ist bei der Verwendung von Kaolin die Aluminiumkonzentration in den additivierten Brennstoffen deutlich höher. Dies hat eine wirkungsvolle Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur zur Folge. Aus diesem Grund sollte für die Abschätzung der Ascheerweichungstemperatur bei additivierten Brennstoffen das molare $(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)$ -Verhältnis verwendet werden [6] [77].

2.5 Rechtliche Rahmenbedingungen für alternative Brennstoffe

Die rechtlichen Anforderungen an kleine ($\leq 500 \text{ kW}_{\text{th}}$) Festbrennstoffkessel innerhalb der EU ist in der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG [45] geregelt und soll bis 01.01.2020 in nationales Recht umgesetzt werden. Für mittelgroße Feuerungen (1–50 MW_{th}) sind die Anforderungen in der MCPD-Richtlinie (Medium Combustion Plants Directive) in der EU 2015/2193 [48] geregelt. Sie wurde in Deutschland durch die Einführung einer neuen 44. BImSchV (Verordnung über mittelgroße Feuerungsanlagen (1–50 MW_{th})) umgesetzt,

die am 20.06.2019 in Kraft getreten ist [13]. Kleine bis mittelgroße Anlagen (4 kW bis < 1 MW_{th}) sind bereits mit der 1. BlmSchV [7] abgedeckt, diese soll auch bis auf formelle Änderungen bestehen bleiben. Damit wäre die Regelungslücke bei Holzbrennstoffen zwischen 500 kW_{th} und 1 MW_{th}, die zwischen Ökodesign und MCPD besteht, in Deutschland geschlossen. Zusätzlich sind Anlagen mit einer Nennwärmeleistung von 100 kW_{th} bis 50 MW_{th}, die Brennstoffe aus nicht holzartiger Biomasse, wie z. B. Stroh einsetzen, nach der 4. BlmSchV [8] in Verbindung mit §19 BlmSchG [9] nach dem vereinfachten Verfahren zu genehmigen.

Die derzeit gültigen Verordnungen nach 1. BlmSchV, 4. BlmSchV, BlmSchG bzw. die neuen Anforderungen nach der 44. BlmSchV, MCPD und Ökodesign-Richtlinie für kleine bis mittelgroße Anlagen zur Verbrennung fester holzartiger und nicht holzartiger Biomasse in der EU sowie deren Umsetzung in Deutschland sind in Tabelle 1 für Neuanlagen gegenübergestellt. Für Bestandsanlagen gelten abweichende Emissionsgrenzwerte, die den jeweiligen Verordnungen zu entnehmen sind.

Tabelle 1: *Übersicht der derzeit bzw. zukünftig geltenden Emissionsanforderungen bei der Errichtung von Neuanlagen zur Verbrennung fester Biomasse in der EU und Deutschland [7] [8] [9] [13]*

Geltungsbe- reich	Bezugs- sauerst. in Ver- ordnung	Brennstoff	Staub	Org. C	CO	NO _x	SO ₂	HCl	
			mg/Nm ³ bei 0 °C, 1013 hPa, hier einheitlich bei 13 % O ₂ angegeben						
Ökodesign	< 500 kW _{th}	10 %	naturbelas- senes Holz	29 ^{a)}	15 ^{a)}	364 ^{a)}	145 ^{a)}	–	–
			nicht holzar- tige Bio- masse	–	–	–	–	–	–
1. BlmSchV	4 kW bis < 1 MW _{th}	13 %	naturbelas- senes Holz	20	–	400	–	–	–
			nicht holzar- artige Biomasse ^{b)}	20	250 ^{c)}	400	500 ^{c)}	–	–
MCPD	1–50 MW _{th}	6 %	naturbelas- senes Holz	27 ¹ (1–5 MW) 16 ¹ (5–20 MW) 11 ¹ (20–50 MW)	–	–	267 ¹ (1–5 MW) 160 ¹ (5–50 MW)	–	–
			nicht holzar- tige Bio- masse	27 ¹ (1–5 MW) 16 ¹ (5–20 MW) 11 ¹ (20–50 MW)	–	–	267 ¹ (1–5 MW) 160 ¹ (5–50 MW)	107 ¹	–
44. BlmSchV	1–50 MW _{th}	6 %	naturbelas- senes Holz	19 ² (< 5 MW) 11 ² (> 5 MW)	5 ²	117	197 ² (< 5 MW) 160 ² (5–20 MW) 107 ² (< 20 MW)	–	–
			nicht holzar- tige Bio- masse	16 ² (< 20 MW) 11 ² (> 20 MW)	5 ²	117/197 (Halm- gut)	197 ² (< 5 MW) 160 ² (5–20 MW) 107 ² (< 20 MW)	107 ²	24

> 100 kWth bis < 1 MWth	nicht holzar- tige Bio- masse	27 ²	27 ²	400	197 ²	107 ²	24
----------------------------	-------------------------------------	-----------------	-----------------	-----	------------------	------------------	----

Wobei: a) Raumheizungs-Jahres-Emissionen; gewichteter Durchschnitt der Emissionen bei Nennwärmeleistung und Teillast (je nach Art der Beschickung); b) Für die nicht holzartigen Brennstoffe (§ 3, Absatz 1, Nummer 8 und 13) wie z. B. Stroh ist die Nennwärmeleistung in der 1. BImSchV von ≥ 4 bis < 100 kWth beschränkt; c) Zusätzliche Anforderungen bei der Typenprüfung für Anlagen mit den in § 3 Absatz 1 Nummer 8 und 13 1. BImSchV genannten Brennstoffen; 1 Bestandsanlagen MCPD (1–20 MW): Staub 27 mg/Nm³, NOX 347 mg/Nm³, SO₂ 107 mg/Nm³ (160 mg/Nm³, wenn ausschließlich Stroh verfeuert wird); (20–50 MW): Staub 16 mg/Nm³ (13 % O₂); 2 Bestandsanlagen 44. BImSchV für Bestandsanlagen gelten bis 31.12.2024 die Anforderungen nach der TA-Luft, ab dem 01.01.2025 gilt für Einsatz von naturbelassenem Holz abweichend zu den Werten in der Tabelle: Staub bei Anlagen, die vor 20.06.2019 mit einem Staubfilter ausgerüstet wurden 27 mg/Nm³ (< 5 MW) und 16 mg/Nm³ (> 5 MW), Org. C 8 mg/Nm³, NOX 197 mg/Nm³ (> 5 MW); bei Einsatz von sonstiger Biomasse: Staub 27 mg/Nm³ (< 1 MW) und 16 mg/Nm³ (> 1 MW), Org. C 8 mg/Nm³, NOX 197 mg/Nm³ (> 20 MW), NOX 320 mg/Nm³ (< 20 MW); SO₂ 160 mg/Nm³ (< 1 MW).

2.6 Einschränkungen für Additive durch Vorgaben in Brennstoffnormen und Verordnungen

Inwieweit Brennstoffe mit Zugabe verbrennungsfördernder Additive im praktischen Einsatz auch tatsächlich zulässig sind, ist zum Teil noch unklar. Bei der Suche nach Antworten sind hierzu insbesondere zwei Regel-Bereiche heranzuziehen, der Bereich der Brennstoffnormen und der Bereich der Emissionsschutzgesetze.

Im Bereich der Normen sind verschiedene internationale Normen aufzuführen. Gemäß DIN EN ISO 16559 [26] gilt ein Biomassebrennstoff per Definition prinzipiell als chemisch behandelt, wenn er mit Chemikalien in Berührung gekommen ist, ausgenommen sind lediglich Luft, Wasser und Hitze. Gleichwohl wird in der aktuellen internationalen Norm für Holzpellets DIN EN ISO 17225-2 [23] eine Zugabe von Additiven aber geduldet. Als Additiv wird darin ein Material bezeichnet, „das zielgerichtet zu dem als Ausgangsmaterial verwendeten Brennstoff zugegeben wurde, um die Qualität des Brennstoffs (z. B. Verbrennungseigenschaften) zu verbessern, Emissionen zu verringern oder eine effizientere Herstellung zu ermöglichen“. Ausdrücklich werden hierbei Spuren von Schmierfett oder anderen Schmiermitteln, die als Teil der normalen Zerkleinerungsvorgänge in die Verarbeitungskette des Brennstoffs eingebracht werden, nicht als Additive angesehen. Tatsächlich können zur Herstellung von Holzpellets der Normklassen A1, A2 oder A3 gemäß DIN EN ISO 17225-2 bis zu 2 m-% solcher Additive verwendet werden. Allerdings ist der Gesamtaschegehalt solcher Pellets in diesen drei Klassen auch auf maximal 0,7, 1,2 bzw. 2,0 m-% begrenzt [23], was insbesondere die Verwendung rein mineralischer Additive, wie z. B. Kaolin, erschwert.

Bei Verwendung von Additiven sind gemäß ISO-Normvorgabe stets Art und Menge anzugeben. Diese Forderung wird jedoch auf dem deutschen Markt selten erfüllt. Das liegt daran, dass Händler in Deutschland bei der Kennzeichnung der Pellets selten einen direkten Bezug zu der Norm DIN EN ISO 17225-2 herstellen. Stattdessen wird bei der Vermarktung stets auf die Übereinstimmung mit den Anforderungen eines der beiden gängigen Gütesiegel EN_{Plus} oder DIN_{Plus} verwiesen. In diesen Gütesiegelanforderungen besteht keine Verpflichtung gegenüber dem Endkunden, die Art und Menge eventuell verwendeter Additive zu deklarieren. Gemäß EN_{Plus} ist die Additivmenge in der Produktion auf 1,8 % beschränkt und weitere Zusätze, die nach der Produktion noch hinzukom-

men, sind auf 0,2 m-% beschränkt [42]. Gemäß DIN_{Plus}-Gütezeichen gelten ebenfalls die Vorgaben von maximal 2 m-% Additivzugabe und die Art und Menge des Additivs sind zu „definieren“ [43], was aber nicht einer Deklarationspflicht gegenüber dem Endkunden gleichkommt.

Die Zulässigkeit von (additivierten) Brennstoffen wird vorrangig durch nationale Emissionsschutzverordnungen oder in den ggf. erforderlichen Genehmigungsverfahren für Feuerungsanlagen geregelt. In Deutschland ist für kleine und mittlere Anlagen mit bis zu 1000 kW Nennwärmeleistung die 1. BImSchV [7] heranzuziehen. Darin wird für nicht genehmigungspflichtige Feuerungsanlagen gefordert, dass die eingesetzten Holzpresslinge nicht unter Verwendung von Bindemitteln hergestellt sein dürfen, sofern es sich nicht um Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Stearin, Melasse oder Zellulosefaser handelt. Außerdem sind nur Holzpellets zugelassen, die die Anforderungen der früheren deutschen Norm für Holzpellets (DIN 51731) erfüllen oder die die Anforderungen des Zertifizierungsprogramms DIN_{Plus} einhalten bzw. gleichwertig sind. Die Gleichwertigkeit wurde anschließend auch für Pellets der Klasse A1 nach DIN EN 14961-2 offiziell festgestellt [10]. Für deren Nachfolgenorm auf ISO-Ebene (DIN EN ISO 17225-2) steht ein solcher offizieller Beschluss noch aus.

Für die Verwendung mineralischer Additive zur Verbesserung der Verbrennungseigenschaften von Holzhackschnitzeln (z. B. aus Kurzumtriebsplantagen) sind derzeit keine rechtlich verbindlichen Aussagen zu finden. Hier gilt vermutlich zunächst der Grundsatz der Naturbelassenheit, d. h., das Holz darf ausschließlich einer mechanischen Bearbeitung ausgesetzt gewesen und dabei nicht mehr als nur unerheblich mit Schadstoffen kontaminiert worden sein [7].

Für Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe gilt dieser Grundsatz ebenso. Für Pellets aus solchen Rohstoffen existieren in der 1. BImSchV keine Normvorgaben. Deren Verwendung ist jedoch wegen der aktuell sehr aufwändigen Anforderungen an die spezielle Typenprüfung der entsprechenden Feuerungsanlagen in Neuanlagen nahezu vollständig unterbunden. Die beiden auf ISO-Ebene erarbeiteten Brennstoffnormen DIN EN ISO 17225-6 [24] für nicht holzartige Pellets bzw. DIN EN ISO 17225-7 [25] für nicht holzartige Briketts erlauben zwar deutlich höhere Additivzugaben bis 5 m-% und Aschegehalte bis 6 m-% bzw. bis 10 m-% (Klassen A bzw. B), jedoch wird auf diese Norm derzeit in deutschen Verordnungstexten noch kein Bezug genommen.

3 Zielsetzung und Aufbau des Projekts

Im Rahmen des Gesamtprojekts „BIOFLEX!“ sollten mit allen Partnern Lösungsansätze für eine „saubere und flexible Nutzung schwieriger Biobrennstoffe in kleinen bis mittelgroßen Verbrennungsanlagen“ erarbeitet werden. Die Ziele des Projekts waren:

- Weiterentwicklung und Brennstoffoptimierung sowie Maßnahmen zur Optimierung der Feuerungstechnik für einen sauberen und effizienten Einsatz von Biomasse aus Reststoffen, Nebenprodukten und anderen ressourceneffizienten Energiepflanzen (z. B. Stroh, Gras, Holz aus Kurzumtriebsplantagen, Pferdemist) in kleinen bis mittelgroßen Feuerungsanlagen. Dabei sollten niedrige Emissionen und ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden, wie sie in der Ökodesignrichtlinie und der MCP-Directive gefordert sind.
- Durchführung von Messungen an entsprechend angepassten Testanlagen in Zusammenarbeit mit Kesselherstellern und Anlagenbauern.
- Verbesserung des Verständnisses in Fragen der Aschetransformation durch grundlegende Untersuchungen und Modellbildung zur Aschetransformation und Validierung der Modellergebnisse mit denen aus den Verbrennungsversuchen.
- Verwendung von Additiven und Mischungen von Brennstoffen, um neue schwierige Rohmaterialien für den Einsatz in kleinen bis mittelgroßen Anlagen besser nutzbar zu machen (ein vertiefter Projektschwerpunkt am TFZ).
- Weiterentwicklung der Verbrennungstechnologien im kleinen ($< 500 \text{ kW}_{\text{th}}$) bis mittleren ($0,5\text{--}10 \text{ MW}_{\text{th}}$) Leistungsbereich durch Primärmaßnahmen wie:
 - Neue Rostfeuerungs- und Staubfeuerungstechnologien für aschereiche Brennstoffe,
 - CFD-optimierte Brennkammerentwicklungen und neuartige Luftstufungskonzepte,
 - verbesserte Regelungssysteme für eine höhere Brennstoffflexibilität.
- Erreichen eines stabilen Betriebs unter Realbedingungen mit einem Wirkungsgrad von über 90 % mit optimierten Brennstoffen und verbesserten Feuerungstechnologien.
- Entwicklung von Leitfäden zur Entwicklung geeigneter Verbrennungstechnologien mit niedrigen Emissionen sowie geeigneter Brennstoffdesignkonzepte (Koordination: TFZ).

In den folgenden Abschnitten wird ausschließlich auf die Forschungsarbeiten des TFZ eingegangen. Für die übrigen Projektergebnisse sollt hier auf den Schlussbericht des Gesamtprojekts („Eranet Bioenergy Final Report“) und den Leitfaden („Guidelines for advanced fuel and boiler design – A result of a scientific project“) verwiesen werden. Sie können unter <https://bioflex-eranet.eu/publications/> heruntergeladen werden.

4 Material und Methoden

4.1 Brennstoffherstellung

Die Herstellung der Pellets mit einem Durchmesser von 6 mm aus den dafür beschafften Rohmaterialien (siehe Abschnitt 4.1.1) erfolgte mit der Pelletieranlage am TFZ (siehe Abschnitt 4.1.2). Die Mengen an Additiv zu ausgewählten Brennstoffen wurden von der Umeå University, Schweden, auf Basis der in Unterkapitel 2.3 dargestellten stöchiometrischen Grundlagen errechnet. Die Brennstoffe wurden nach der Herstellung am TFZ an die beteiligten Projektpartner verteilt. Art und Eigenschaften dieser Versuchsbrennstoffe sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.1.1 Auswahl und Beschreibung der Ausgangsstoffe

Die Auswahl geeigneter Rohmaterialien bzw. Brennstoffe erfolgte aufgrund ihres erwarteten Potenzials als Ersatzbrennstoff bzw. der Marktrelevanz (Preis, Verfügbarkeit), der chemischen Zusammensetzung und der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion [11]. Ausgehend von diesen Überlegungen wurden insgesamt fünf Brennstoffe vom Markt als Rohmaterialien (Tabelle 2) bezogen. Als Referenzbrennstoff sowie zum Mischen des Weizenstrohs kamen ENplus-Holzpellets aus 100 % Nadelholz in 15-kg-Säcken zum Einsatz.

Tabelle 2: Rohmaterialien für die Brennstoffherstellung

Rohmaterial	Handelsform	Spezifikationen
Holz	Pellets	6-mm-ENplus-Pellets, Sackware, 100 % Nadelholz
Weizenstroh	Pellets	8 mm Durchmesser, reines Weizenstroh
Sonnenblumenspelzen	Pellets	8 mm Durchmesser, reine Sonnenblumenspelzen
Gras	Pellets	9 mm Durchmesser, sehr flach, reines Gras
Pappel	Stämme	Pappel aus siebenjährigem Umtrieb

Als Additiv zur Reduzierung der partikelförmigen Emissionen sowie zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens wurde das auf Aluminium basierende Tonmineral Kaolin ausgewählt. Dieser Zuschlagstoff der Firma KAMIG besteht zu 87 % aus reinem Kaolinit, die Zusammensetzung ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Kaolins der Firma KAMIG in Österreich, in Masseprozent (Quelle: KAMIG)

SiO ₂	49,00 % ± 1,0 %
Al ₂ O ₃	35,00 % ± 1,0 %
Fe ₂ O ₃	0,50 % ± 0,1 %
CaO	0,20 % ± 0,1 %
MgO	0,10 % 0,1 %
MnO	< 0,01 %
K ₂ O	1,40 % ± 0,3 %
TiO ₂	0,70 % ± 0,1 %
Na ₂ O	< 0,02 %
P ₂ O ₅	0,03 %

4.1.2 Eingesetzte Pelletiertechnik und Beschreibung des Pelletierprozesses

Bei der am TFZ eingesetzten Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) handelt es sich um eine Flachmatrizenpresse (Abbildung 3). Die technische Spezifikation der Flachmatrizenpresse ist in Tabelle 4 zusammengestellt.



Abbildung 3: Aufbau der Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) am TFZ mit Materialzufuhr und Vibro-Rinne

Tabelle 4: Technische Spezifikationen der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390 [1]

Parameter	Wert
Kollerdurchmesser/-breite in mm	230/77
Matrizendurchmesser in mm	390
Anzahl der Koller	2
Antriebsmotor in kW/bei Umdrehungen pro min	15–30/1.500
Kollergeschwindigkeit in m/s	2,2
Matrizenlochfläche cm ²	617
Maschinengewicht kg	1.150

Der Vorteil dieser Technik liegt darin, dass sie – mit den entsprechenden Matrizen – sowohl zur Zerkleinerung der Biomasse als Kollermühle als auch zum Pelletieren verwendet werden kann. Die Flachmatrizen bieten generell auch die Möglichkeit einer beidseitigen Verwendung. Hierbei handelt es sich um Matrizen mit konusförmigen Auslassbohrungen, die nach dem Wenden der Matrize als Einlasskonus wirken und zusätzlich einen „Schluck“ (trichterförmige Einführstrecke) aufweisen (Abbildung 4) [58]. Im Gegensatz

dazu kommen im industriellen Maßstab in Deutschland vorwiegend Ringmatrizen zum Einsatz.

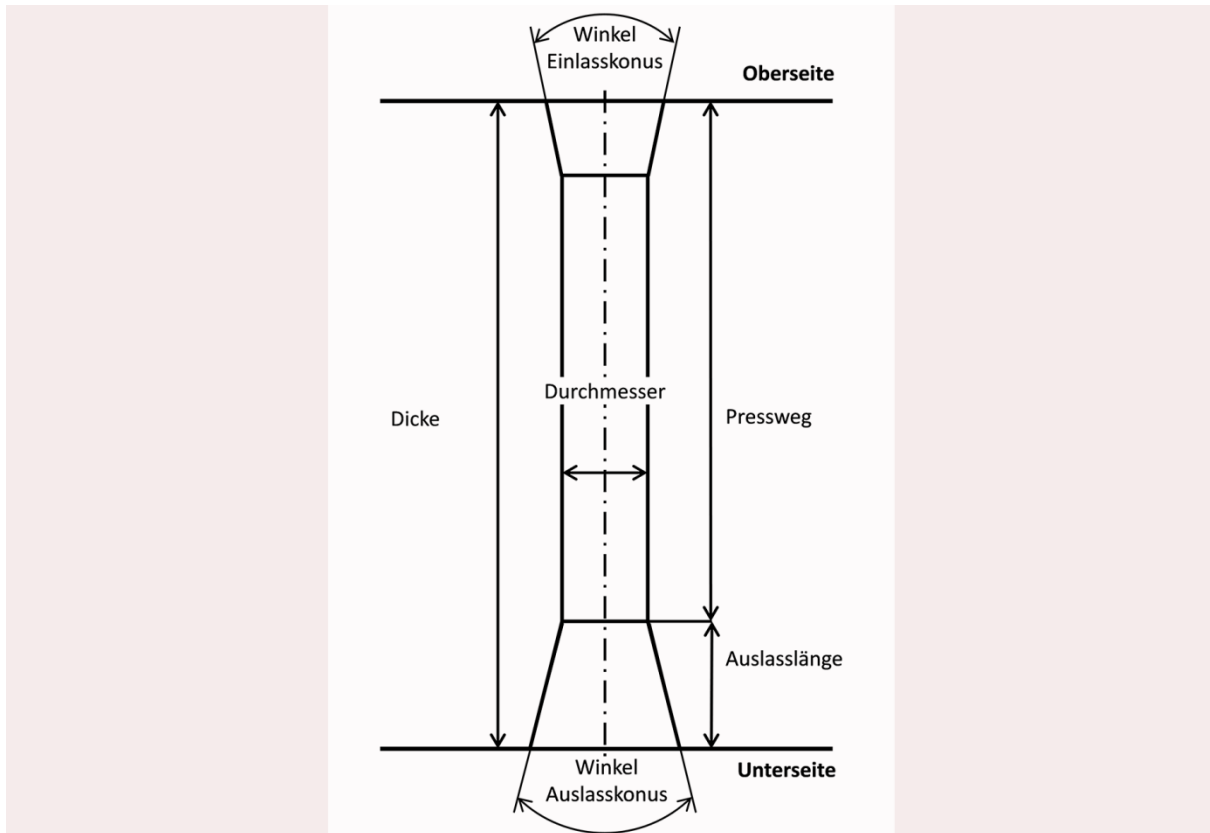


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Presskanals einer beidseitig nutzbaren Flachmatrize (Quelle: TFZ)



Abbildung 5: Extraktmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK)



Abbildung 6: Befeuchtung des gemahlene Rohmaterials mit einem Drucksprühgerät (GLORIA Haus- und Gartengeräte GmbH, prima 5 Typ 42 E)

Tabelle 5: Technische Spezifikationen des verwendeten Extraktmischers

Technische Spezifikation und Einheit	Wert
Füllmenge in l	500
Behältermaße in cm	125 x 68
Stundenleistung in m ³	10
Gewicht in kg	470

Für die Konditionierung des zerkleinerten Materials mit Wasser und Additiv kam ein Extraktmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK) zum Einsatz (Abbildung 5). Eine definierte Menge an Wasser wurde mittels Messbechers und Drucksprühgeräts (GLORIA Haus- und Gartengeräte GmbH, prima 5 Typ 42 E) mit einer Kapazität von 5 l beigemischt (Abbildung 6). Das Additiv wurde auf einer Plattformwaage mit einer Auflösung von 0,001 kg (PESA WAAGEN AG, GPW-30K-B1 W2) eingewogen. Die Zugabe des Wassers bzw. Additivs erfolgte gleichmäßig während des Homogenisierungsprozesses über dafür vorgesehene Schlitze im Deckel des Extraktmischers. Zur Wasserzugabe vor der Pelletierung besteht die Möglichkeit, über eine in der Pelletieranlage integrierte und mit einem Durchflussrotameter versehene Dosiereinheit während des Pelletierens

zusätzlich Wasser zuzugeben. Die Zerstäubungsdüsen sind direkt hinter dem Einfüllstutzen der Pelletieranlage positioniert.

Die Einwaage der Biomasse erfolgte in großen Hartkunststoffkisten mittels eines Hubwagens mit integrierter Waage mit einer Auflösung von 1,0 kg (Sax GmbH, HP ESR 20).

Zunächst wurden die Rohmaterialien in der Pelletieranlage zerkleinert. Dies erfolgte für die Pappelhackschnitzel in zwei Schritten (12- und 6-mm-Loch Matrizen) und für die anderen Rohmaterialien in einem Schritt mit der 6-mm-Loch Matrize (siehe Tabelle 6). Anschließend wurde der Wassergehalt des gemahlene Materials bestimmt. Die zerkleinerte Biomasse wurde dann mit einer definierten Menge Wasser im Extraktmischer vermengt und über Nacht stehen gelassen, um einen homogenen Wassergehalt gemäß Tabelle 7 für die Pelletierung zu gewährleisten. Das Kaolin wurde in einem zweiten Schritt zu der bereits befeuchteten Biomasse hinzugegeben, um eine bessere Adhäsion des Kaolins an den Biomassepartikeln zu erzielen. Je nach Art der Biomasse bzw. Mischung und Additivgehalt muss zur Pelletierung bzw. Zerkleinerung die geeignete Matrize ausgewählt werden. Dafür standen am TFZ zwei Matrizen zur Zerkleinerung sowie vier Matrizen zum Pelletieren zur Verfügung (siehe Tabelle 6). Das angegebene Pressverhältnis ergibt sich entweder aus Lochdurchmesser und Pressweg (oben) oder Lochdurchmesser und Matrizendicke (unten).

Während der Produktion der einzelnen Pelletchargen wurden gleichmäßig verteilt über den Produktionszeitraum Proben gezogen und hinsichtlich des Aschegehalts, Wassergehalts, Feingehalts, der mechanischen Festigkeit und Schüttdichte (siehe Abschnitt 4.1.3) untersucht, um die Homogenität der Pelletchargen und der Additivverteilung im Brennstoff zu ermitteln.

Tabelle 6: Technische Spezifikationen der am TFZ verfügbaren Matrizen [1]

Matrizendicke	[mm]	50	30	50	40	36	33
Lochdurchmesser	[mm]	12,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Beidseitig nutzbar	[-]	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Einlasskonus oben	[°]	60,0	60,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Auslasskonus unten	[°]	–	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Pressweg	[mm]	12,0	6,0	36,0	30,0	24,0	18,0
Auslasslänge	[mm]	38,0	24,0	14,0	10,0	12,0	15,0
Pressverhältnis oben	[-]	1:1,0	1:1,0	1:6,0	1:5,0	1:4,0	1:3,0
Pressverhältnis unten	[-]	–	1:5,0	1:8,3	1:6,6	1:6,0	1:5,5
Anwendung	[-]	Zerkleinern	Zerkleinern	Pelletieren	Pelletieren	Pelletieren	Pelletieren

Tabelle 7: Erfahrungswerte des Pressenherstellers für optimale Wassergehalte und Pressverhältnisse bei verschiedenen Biomassen (Quelle: Firma Aman-dus Kahl)

Brennstoff	optimaler Wassergehalt [m-%]	Pressverhältnis
Pappel pur	15	1:5,0
Weizenstroh pur	12	1:6,7–1:8,3
Gras pur	10	1:6,7
Sonnenblumenspelzen pur	12	1:8,3

4.1.3 Bestimmung chemischer und physikalischer Brennstoffeigenschaften

Die Bestimmung der physikalischen Parameter (siehe Tabelle 8) des eingesetzten Brennstoffs sowie der Aschen erfolgte am Technologie- und Förderzentrum. Die chemische Analyse ausgewählter Parameter (siehe Tabelle 8) erfolgte für die Rohmaterialien durch den Projektpartner BIOS Bioenergiesysteme GmbH und für ausgewählte Brennstoffe, Rostaschen und mit Staub beladene Planfilter durch EUROFINS Umwelt Ost GmbH.

Tabelle 8: Ermittelte physikalische und chemische Eigenschaften der Brennstoffe, z. T. auch Rostaschen und beladene Planfilter

Parameter	Verwendetes Gerät bzw. Verfahren	Zugehörige Norm
Probenherstellung	Schneidmühle Fritsch Pulverisette, Fritsch GmbH	DIN EN ISO 14780 [37]
Probenahme	TFZ-Probenteiler	DIN EN ISO 18135 [39]
Wassergehalt	Trockenschrank: FED720-02-42004, Binder GmbH	DIN EN ISO 18134-2 [41]
Aschegehalt/Glühverlust bei 550°C	Muffelofen: LT15, Nabertherm GmbH	DIN EN ISO 18122 [34]
Aschegehalt/Glühverlust bei 815°C	Muffelofen: LT15, Nabertherm GmbH	DIN 51719 [15]
Schüttdichte	Genormter 5-l-Behälter; Plattformwaage: 32 kg MT KA32s mit ICS429, Mettler-Toledo GmbH	DIN EN ISO 17828 [36]
Partikeldichte (Rohdichte)	Hydrostatischer Auftrieb: Messbecher, Wasser + Tensid; Analysenwaage 310 g LA310S, Auflösung 0,0001 g, Sartorius AG	DIN EN ISO 18847 [56]
Mechanische Festigkeit	Abriebtester nach Norm, Sieb mit 3,15 mm Maschenweite; Präzisionswaage 8,2 kg CPA8201, Auflösung 0,1 g, Sartorius AG	DIN EN ISO 17831-1 [32]
Feinanteil	Manuelle Siebung: Sieb mit 3,15 mm Maschenweite; Präzisionswaage 8,2 kg, Auflösung 0,1 g, Sartorius AG	DIN EN ISO 18846 [31]
Brennwert/Heizwert	Kalorimeter IKA C 2000 basic, IKA-Werke GmbH & Co. KG	DIN EN ISO 18125 [40]
Pelletlänge und -durchmesser	Messschieber CD-15DC, Mitutoyo Corporation	DIN EN ISO 17829 [33]
Gesamtgehalt: C, H, N*	Elemente aus der Originalsubstanz	DIN EN ISO 16948 [30]

Parameter	Verwendetes Gerät bzw. Verfahren	Zugehörige Norm
Gesamtgehalt: S, Cl*	Elemente aus der Originalsubstanz	DIN EN ISO 16994 [29]
Gesamtgehalt: Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (Biomasse)*	Elemente aus dem Mikrowellendruckaufschluss	DIN EN ISO 16967 [28]
Bestimmung des Chlor-gehalts (Asche)*	Elemente aus der Originalsubstanz	DIN 51727 [16]
Gesamtgehalt: C, H, N (Asche)*	Elemente aus der Originalsubstanz	DIN 51732 [21]
Bestimmung des Schwefelgehalts (Asche/Filter)*	Elemente aus der Originalsubstanz	DIN 51724-3 [20]
Oxidgehalt an Al, Ca, K, Mg, Na, P, S (Asche)*	Elemente aus dem alkalischen Borataufschluss	DIN EN ISO 11885 [18]
Gesamtgehalt: Al, Ca, Mg, P, K und Na (Filter)*	Direkt am Planfilter	DIN EN ISO 17294-2 [38]
Ascheschmelzverhalten*	Muffelofen, Reagenzien, Pyrometer etc.	DIN CEN/TS 15370-1 [12]
Flüchtige Bestandteile*	Ofen, Schmelztiegel	[35]

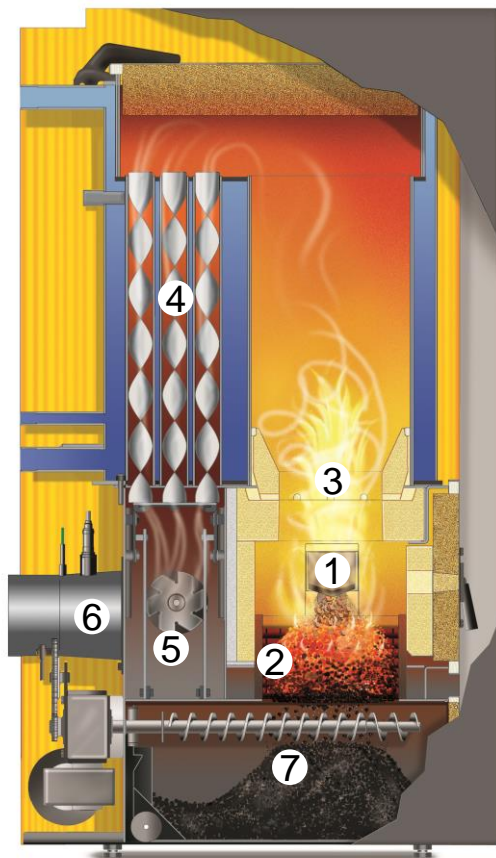
* Analyse von externem Labor durchgeführt, alle anderen Analysen wurden am TFZ durchgeführt.

4.2 Feuerungsversuche

Die Feuerungsversuche wurden am Feuerungsprüfstand des TFZ (siehe Abschnitt 4.2.2) durchgeführt. Um die Ergebnisse innerhalb des Projekts vergleichen zu können, wurde die Prüfmethodik im Vorfeld mit den in diesem Arbeitspaket beteiligten Projektpartnern abgestimmt.

4.2.1 Beschreibung der verwendeten Feuerung

Bei der verwendeten Feuerung am TFZ handelt es sich um den Hackschnitzelkessel Powerchip 20/30 der Firma Guntamatic aus dem Jahr 2010. Dieser Kessel (Abbildung 7) ist für die Verbrennung von Hackschnitzel und Pellets, aber auch Energiekorn und Miscanthus geeignet und zugelassen. Der Brennstoff wird über eine Stokerschnecke seitlich in die Brennkammer (1) gefördert und gelangt so auf den bewegten Treppenrost (2). Die Füllmenge wird dabei mittels einer Füllstandszone überwacht. Die Primärluft tritt von unten durch den Rost in den Brennraum ein. Der Brennstoff wird während der Verbrennung über den bewegten Treppenrost bewegt und nach dem Holzkohleausbrand am Ende des Rosts über eine Ascheschnecke in den Aschebehälter befördert (7). Die erzeugten Brenngase verlassen die Primärbrennkammer über eine Wirbeldüse (3). Hier erfolgt die Zugabe der Sekundärluft für eine möglichst vollständige Verbrennung der Brenngase in der Sekundärbrennkammer. Von der Sekundärbrennkammer gelangt das heiße Abgas in den mit Wirbulatoren ausgestatteten Rohrbündelwärmetauscher (4). Das abgekühlte Abgas wird aktiv über das integrierte Saugzuggebläse (5) abgeführt. Im Abgasstutzen des Kessels (6) ist die Lambdasonde zur Messung des Restsauerstoffgehalts im Abgas verbaut [50].



- 1 Seitlicher Einschub mit Füllstandszone
- 2 Treppenrost – Primärluft
- 3 Wirbeldüse – Sekundärluft
- 4 Rohrbündelwärmetauscher mit Wirblatoren
- 5 Saugzuggebläse
- 6 Rauchrohr mit Lambdasonde
- 7 Aschebehälter – Ascheschnecke

Abbildung 7: Schematische Darstellung des Guntamatic Powerchip 20/30 [50]

Der Kessel liefert nach Herstellerangaben (Tabelle 9) eine Wärmeleistung von 7–30 kW bei einer Vorlauftemperatur von 65–80 °C für Hackschnitzel und Holzpellets. Für Miscanthus und Energiekorn gibt der Hersteller eine max. Leistung von 25 kW an. Der vom Hersteller geforderte Schornsteinzug beträgt 15 Pa. Die Ascheladen fassen maximal 60 l für die Rostasche und maximal 15 l für die Flugasche aus dem Wärmetauscher.

Tabelle 9: Technische Daten des Guntamatic Powerchip 20/30 [50]

Anlagenkomponente	Ausführung
Anlagenart	Rostfeuerung
Bauart	Feuerung in Kessel integriert
Nennwärmeleistung	30 kW bei Holzbrennstoffen 25 kW bei Getreide oder Miscanthus
kleinste Wärmeleistung	7 kW
Feuerungsprinzip	Einschub mit bewegtem Treppenrost
Brennstoffzufuhr	automatisch über Schnecken
Zündung	automatisch mit Zündgebläse
Entaschung	automatischer Austrag mit Schnecken
Form des Wärmetauschers	Rohrwärmetauscher stehend
Reinigung	automatisch
Primärluftzufuhr	durch den Treppenrost
Sekundärluftzufuhr	in die Nachverbrennungszone
Luftmengenregelung	Drosselklappen
Regelgrößen Leistung	Kesselwasser-, Brennraum- und Abgastemperatur
Stellgrößen Leistung	Brennstoff- und Verbrennungsluftmenge
Regelgrößen Verbrennung	Abgastemperatur, Lambda
Stellgrößen Verbrennung	Verbrennungsluftmenge
Betriebsdruck	3,0 bar
Betriebstemperatur	60–80 °C
Wasserinhalt	128 l
Rauchrohrdurchmesser	150 mm

Dieser Kessel wurde für die Feuerungsversuche ausgewählt, da er aufgrund des bewegten Treppenrosts wenig stör anfällig für aschereiche Brennstoffe mit einem niedrigeren Ascheschmelzpunkt ist. Dennoch wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei den meisten der hier verwendeten Brennstoffen nicht um Regelbrennstoffe gemäß § 3 Abs. 1 der 1. BImSchV handelt und diese vom Hersteller nicht für diesen Kessel freigegeben sind.

4.2.2 Prüfstands Aufbau und Messtechnik

Die Feuerungsversuche wurden am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums durchgeführt. Abbildung 8 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Messstrecke sowie die Anordnung der Messgeräte.

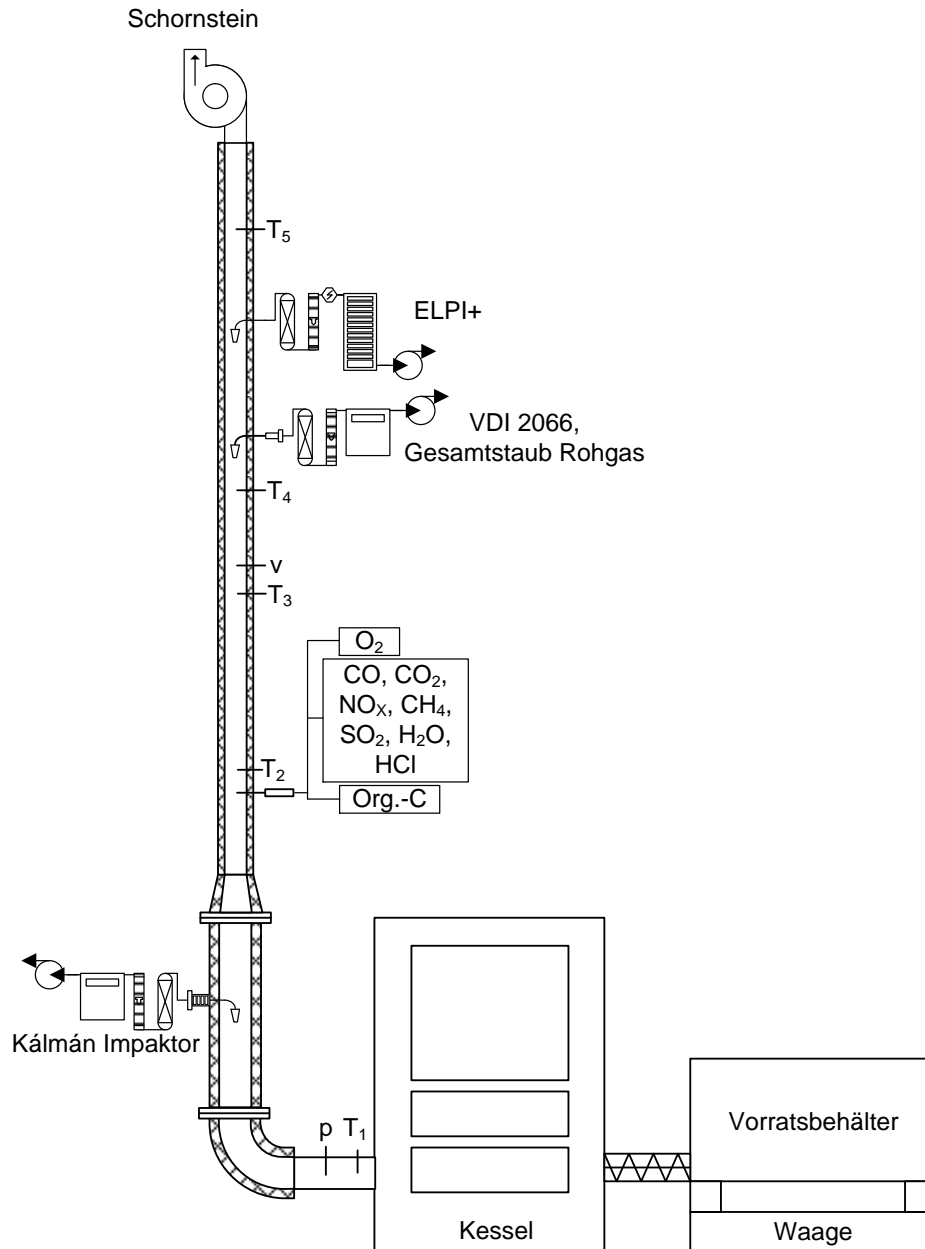


Abbildung 8: Schematische Darstellung der für die Versuche verwendeten Messstrecke und Anordnung der Messgeräte am Feuerungsprüfstand des TFZ

Die Abgasmessstrecke besteht aus Edelstahlrohren (V2A). Der untere Teil der Messstrecke, vom Abgasstutzen bis zur Messstelle für den Kálmán Impaktor, hatte einen Innendurchmesser von 150 mm. Der obere Teil der Messstrecke wurde auf 100 mm verjüngt. Die Messung der Staubemissionen erfolgte in Anlehnung an die VDI 2066 mit Quarzplanfiltern und vorgeschalteter, mit Quarzwolle gestopfter Hülse [81] (Staubprobe-nahmeapparat Paul Gothe GmbH). Die Staubsonden wurden stets am Ende eines Messtags ausgebaut und mit Aceton gespült. Die Rückstände aus der Spülflüssigkeit wurden nach dem Verdampfen des Acetons proportional zur Beladung der Filter auf die Einzelmessungen verteilt. Die Filtrationstemperatur während der Staubprobenahme betrug 180 °C, da bei dieser Temperatur auch die organischen Kohlenwasserstoffe (Org. C) mittels Flammenionisationsdetektor (Mess- & Analysetechnik GmbH C_nH_m -

Analysator ThermoFID) gemessen wurden. Die Messung der Gaskomponenten CO und CO₂ erfolgte mittels NDIR-Einzelkomponentenmessgeräten und der Sauerstoffkonzentration paramagnetisch (ABB Automation GmbH ABB AO2020). NO_x wurde mittels eines Chemilumineszenzdetektors (Eco Physics GmbH CLD 822 Mhr Analysator) und der Wasserdampfgehalt im Abgas mittels FTIR (Ansyco GmbH FTIR DX4000N) bestimmt. Die Erfassung des Brennstoffmassenstroms erfolgte durch kontinuierliche Wägung des gefüllten Brennstoffbehälters mittels einer Abbrandwaage (Mettler-Toledo GmbH Plattformwaage 600 kg MT KD600) mit einer Auflösung von 0,005 kg.

Für die Messung des Abgasvolumenstroms wurde ein Flügelrad-Anemometer (Höntzsch GmbH, Flügelrad Strömungssensor ZS25/25-ZG4) verwendet.

Zusätzlich zur Messung der Gesamtstaubemissionen wurden gravimetrische Messungen zur Partikelgrößenverteilung (PM₁, PM_{2,5} und PM₁₀) mit einem Kaskadenimpaktor (Kálmán System GmbH, KS-400-CUV.15/8) sowie Messungen zur Bestimmung der Partikelanzahlverteilung mittels eines elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktors (Dekati Ltd., ELPI®+) durchgeführt. Durch die gravimetrische Messung der PM₁-Konzentration ist es möglich, das Online-Messsignal des ELPI+ zu kalibrieren und somit einen zeitlichen Verlauf der PM₁-Konzentrationen darzustellen. Dies ist erforderlich, weil die Partikeldichte unbekannt ist und bei der Justierung des ELPI+ vor jeder Messung standardmäßig eine Partikeldichte von 1 kg/m³ angenommen wird. Diese Kalibrierung muss für jeden Brennstoff und jede Änderung der Kesseleinstellung erneut durchgeführt werden

Der verwendete Hackschnitzelkessel wurde wasserseitig an eine Wärmeleistungsmessstrecke angeschlossen, die den Anforderungen der DIN EN 303-5 [19] zur Erfassung der Wärmeleistung entspricht. Dadurch kann die abgegebene Nutzwärme direkt über den Wasserdurchfluss (Endress + Hauser Promag 53) und die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur (PT100 Thermokon) ermittelt werden. Gleichzeitig kann über diese Wärmeleistungsmessstrecke die Abnahme der Wärmeleistung vom Kessel geregelt werden (Volllast und Teillastbetrieb).

Der Kessel wurde bei Nennlast (30 kW) und bei einem vom Hersteller vorgegebenen konstanten Förderdruck von -15 ± 2 Pa betrieben.

4.2.3 Ablauf der Feuerungsversuche

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb des Projekts zu gewährleisten, wurde die Prüfmethodik vor Beginn der Versuche mit den Projektpartnern abgestimmt. Dabei wurden folgende Punkte zum Prüfablauf definiert:

- vollständige Reinigung des Kessels (Brennkammer, Aschekasten, Wärmetauscher) und der Brennstoffzufuhr vor jedem Feuerungsversuch,
- Aufheizphase des Kessels bis auf Nennlast bzw. min. 80 % der angegebenen Nennlast (sonst Versuchsabbruch),

- kontinuierliche Messung der gasförmigen Emissionen über 8 h bei Nennlast exklusive der Anheizphase,
- gravimetrische Gesamtstaubmessung bei Nennlastbetrieb: 0–30 min, 150–180 min, 300–330 min und 450–480 min,
- Vorbehandlung der Filtermedien bei 200 °C, Filtrationstemperatur während der Staubprobenahme bei 180 °C, Nachbehandlung der Filtermedien bei 180 °C,
- nur TFZ: gravimetrische Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mit dem Kálmán Impaktor bei 0–30 min und 150–180 min sowie kontinuierliche Messung der Partikelanzahlverteilung mit dem ELPI+ (wenn möglich über gesamten Nennlastbetrieb),
- Abkühlen des Kessels und Fotodokumentation der Asche in der Brennkammer: Es folgte die Entnahme der Asche aus der Brennkammer und dem Aschebehälter. Die Asche aus dem Wärmetauscher wurde verworfen,
- Erfassung der verbrauchten Brennstoffmenge und Bestimmung des Brennstoffwassergehalts,
- Siebanalyse der Aschen.

4.3 Methoden zur Vorhersage bzw. Bewertung der Verschlackungsanfälligkeit der Brennstoffe bzw. Brennstoffaschen

Zur Bewertung der Verschlackungsanfälligkeit bzw. des Ascheschmelzverhaltens der Brennstoffe wurden zwei in der Entwicklung befindliche Methoden herangezogen, die PASSA-Methode in Abschnitt 4.3.1 und der Slag-Analyser in Abschnitt 4.3.2. Zusätzlich wurde auch die Asche aus den durchgeführten Feuerungsversuchen untersucht (Abschnitt 4.3.3), um eine Aussage über die Vergleichbarkeit der Prüfmethode mit dem realen Kesselbetrieb treffen zu können.

4.3.1 PASSA-Methode (Pellet Ash and Slag Sieving Assessment)

Die PASSA-Methode (Pellet Ash and Slag Sieving Assessment) wurde in einem europäischen Projekt (EU-AshMeIT) entwickelt [72]. Dabei werden 250 g des pelletierten Brennstoffs in einer Glühschale (Tiegel) eingewogen. Diese muss eine Temperaturbeständigkeit von mindestens 1.050 °C aufweisen. Zum Einwiegen der Brennstoffprobe sowie zur Bestimmung des Leergewichts der Glühschale ist eine Waage mit einer Auflösung von mindestens 0,01 g (Kern & Sohn GmbH, 572-35) zu verwenden.

Erzeugung der Asche: Die Probe wird in einem Muffelofen (LT15, Nabertherm GmbH) thermisch behandelt. Dabei folgt man dem in Abbildung 9 vorgegebenen Temperaturprogramm mit einer Aufheizrate von 10 K/min. Die maximale Temperatur beträgt dabei 1.000 °C.

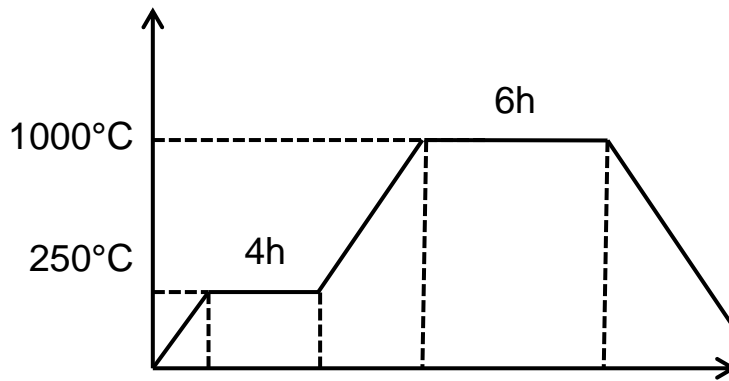


Abbildung 9: Temperaturprogramm bei der Veraschung in der PASSA-Methode [72]

Nachdem die Probe auf 100 °C abgekühlt ist, wird sie aus dem Muffelofen entnommen und fotografiert. Danach muss die Probe im Exsikkator vollständig auf Raumtemperatur abkühlen. Anschließend wird die Probe inklusive der Glühschale erneut gewogen. Hierfür ist wieder eine Waage mit einer Auflösung von 0,01 g zu verwenden. Jetzt wird die Probe aus der Glühschale mit einem Pinsel entfernt. Die leere Glühschale wird erneut gewogen, um die Masse des anhaftenden Materials zu bestimmen.

Bewertung der Asche/Schlacke: Der lose Anteil der Probe wird durch eine Siebanalyse hinsichtlich der gebildeten Schlackeagglomerate bewertet. Verwendet werden Siebe mit einer Maschenweite von 3,15 mm, 2 mm, 1 mm und 0,5 mm nach ISO 3310-1 [17]. Dafür wird der lose Anteil der Probe in das Sieb mit 3,15 mm Maschenweite gefüllt und die anderen Siebe (2 mm, 1 mm, 0,5 mm, Boden) darunter platziert. Die Probe wird dann mittels einer Siebmaschine (Retsch GmbH & Co. KG, Siebmaschine, AS400 Control) bei 200 rpm für 1 min gesiebt. Das Gewicht der gewonnenen Aschefractionen wird mit einer Waage mit einer Auflösung von mindestens 0,001 g ermittelt (Analysenwaage 220 g MS204S/01, Mettler-Toledo GmbH).

Pro Brennstoffprobe ist jeweils eine Doppelbestimmung durchzuführen. Aus den Ergebnissen lässt sich der sogenannte Slag Index berechnen. Dabei handelt es sich um den relativen Anteil einer Aschefraktion an der Gesamtaschemenge nach der thermischen Behandlung der Probe. Für die Untersuchungen in diesem Projekt wurde der Slag Index für die Fraktion > 3,15 mm berechnet (siehe Formeln (4.1) und (4.2)) da die meisten der hier betrachteten Brennstoffe zu einer starken Verschlackung neigen. Für die Beurteilung diverser Holzpellets eignet sich der Slag Index für die Fraktion > 2 mm oder > 1 mm [72].

$$\text{Slag Index} = \frac{m_{>3,15\text{mm}}}{m_{\text{ges}}} \quad (4.1)$$

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{voll,nach}} - m_{\text{leer,vor}} \quad (4.2)$$

$$\Delta m_{\text{haft}} = m_{\text{leer,nach}} - m_{\text{leer,vor}} \quad (4.3)$$

Wobei:

$m_{>3,15\text{mm}}$ = Siebrückstand auf dem 3,15-mm-Sieb in g;

m_{ges} = gesamte Masse der Asche in g;

$m_{\text{voll,nach}}$ = Masse der Glühschale mit Asche nach Versuch in g;

$m_{\text{leer,vor}}$ = Masse der leeren Glühschale vor Versuch in g;

$m_{\text{leer,nach}}$ = Masse der entleerten Glühschale nach Versuch in g;

Δm_{haft} = nach Versuch an der Glühschale anhaftende Aschemeng in g.

Ein weiterer wichtiger Indikator für die Verschlackung der Probe ist die Masse an Asche, die nach dem Reinigen der Glühschale (Tiegel) an dieser haften bleibt (Formel (4.3)). Dieser Anteil wird zu der Fraktion > 3,15 mm gerechnet.

4.3.2 Slag Analyzer

Die zweite Methode zur Bewertung des Ascheschmelzverhaltens ist der sogenannte Slag Analyzer. Dieser wurde ursprünglich von dem Danish Technological Institute (DTI) entwickelt und ebenfalls in dem Projekt EU-AshMeIT hauptsächlich für Holzpellets untersucht und weiterentwickelt [73].

Bei dem Slag Analyzer (Abbildung 10) handelt es sich um einen einfachen Batch-Reaktor mit unterem Abbrand. Dieser ist mit mehreren Thermoelementen zum Messen der Rost- und Brennkammertemperaturen sowie mehreren Rotametern und einem Durchflussmesser zum Messen und Steuern der Luftmassenströme ausgestattet.

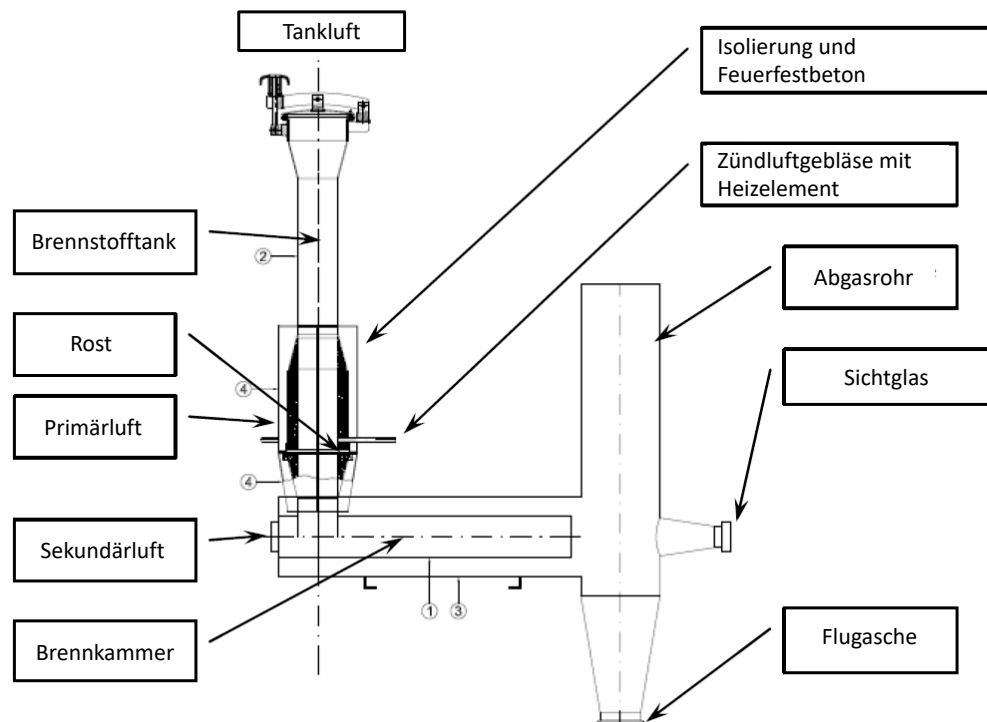


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Slag Analyzers [73]

Der Ablauf einer Messung kann wie folgt beschrieben werden [64]:

Vorbereitung der Messung:

- Vor jeder Messung wird ein neues Einmal-Rostelement aus Edelstahl mit einem Durchmesser von 150 mm, mit Lochdurchmessern von 2 mm und einer Materialstärke von 1,5 mm gewogen und in den Reaktor eingelegt.
- Der Brennstofftank wird über dem Rost befestigt.
- Für die Versuche wurden jeweils 3 kg Pellets verwendet. Bei Brennstoffen mit einem Aschegehalt von über 3 m-% wurde der Versuchsbrennstoff mit den Holzpellets als Referenzbrennstoff (siehe Abschnitt 4.1.1) verdünnt. Die Menge an Versuchsbrennstoff und Referenzbrennstoff wurde nach den Formeln (4.4) und (4.5) berechnet.

$$m_{\text{Versuchsbrennstoff}} = \frac{90 * 100}{A} \quad (4.4)$$

$$m_{\text{Referenzbrennstoff}} = 3000 - m_{\text{Versuchsbrennstoff}} \quad (4.5)$$

Wobei:

$m_{\text{Versuchsbrennstoff}}$ = Masse des eingesetzten Versuchsbrennstoffs in kg;

A = Aschegehalt des Versuchsbrennstoffs in m.-%;

$m_{\text{Referenzbrennstoff}}$ = Masse des eingesetzten Referenzbrennstoffs in kg.

- Die abgewogene Brennstoffmenge bzw. das Brennstoffgemisch wurde in den Brennstofftank gefüllt und dieser luftdicht mit einem Deckel verschlossen.
- Vor Versuchsbeginn wurde der Förderdruck am Abgasrohr auf –80 Pa eingestellt.

Zünden des Brennstoffs:

- Die Lufteinstellungen zum Zünden des Brennstoffs sind:
 - Zündluft: 35 l/min,
 - Tankluft: 7 l/min,
 - Primärluft: 5 l/min (vorgeheizt),
 - Sekundärluft: 5 l/min.
- Einschalten des Zündfunken in der Brennkammer. Der Zündvorgang ist abgeschlossen, wenn die Rosttemperatur 400 °C überschritten hat.

Stationärer Betrieb:

- Die Lufteinstellungen während der Ausbrandphase sind:
 - Zündluft: 5 l/min (sobald Rosttemperatur > 650 C),
 - Tankluft: 7 l/min (bis 40 min nach Zündung, dann 0 l/min),
 - Primärluft: 60 l/min,
 - Sekundärluft: 45 l/min.
- Der Versuch ist beendet, sobald die Rosttemperatur unter 100 °C fällt.

Bewertung der Asche/Schlacke:

- Den Slag Analyzer vorsichtig öffnen und den gesamten Rost mitsamt der Asche entnehmen und fotografieren.
- Visuelle Bewertung der größeren Schlackepartikel und auf Rasterpapier fotografieren. Alle Auffälligkeiten werden notiert (Farbe, Stückigkeit usw.).
- Asche in einen geeigneten Behälter füllen, das Rost umdrehen und fünfmal auf die Rückseite klopfen, um die anhaftende Asche/Schlacke zu lösen.
- Rost mit restlichen Anhaftungen wiegen.
- Die drei größten Stücke werden mit einem Messschieber vermessen.
- Die lose Asche wird wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben gesiebt, wobei nur die Fraktion größer 2 mm von Interesse ist.

Mit den Ergebnissen der visuellen Bewertung und der Siebanalyse kann die Asche bzw. Schlacke aus dem Slag Analyzer nach Tabelle 10 einer der fünf Kategorien zugeordnet werden. Um die Methoden untereinander und mit den Feuerungsversuchen vergleichen zu können, kann aus der Kategorie nach Tabelle 10 mithilfe von Formel (4.6) näherungsweise der Slag Index berechnet werden, sodass der Indexwert zwischen 0 und 1 schwanken kann.

$$Slag\ Index = \frac{Kategorie_{Slag\ Analyzer} - 1}{4} \tag{4.6}$$

Tabelle 10: Kategorien zur Einordnung der Aschen aus dem Slag Analyzer (angepasst aus [64])





Kategorie	Visuelle Beurteilung	Agglomerierte Schlacke am Rost	Schlacke > 2 mm	Schlacke > 2 mm inkl. Agglom.	Maximale Größe der drei größten Schlackepartikel
1	Keine Schlacke	< 0,1 %	< 0,01 %	< 0,263	< 11 mm
2	Beginnende Verschlackung	< 0,75 %	< 0,75 %	< 1,313	< 23 mm
3	Deutliche Verschlackung	< 1,5 %	< 1,5 %	< 2,63	< 45 mm
4	Starke Verschlackung	< 3 %	< 3 %	< 5,25	< 90 mm
5	Sehr starke Verschlackung	> 3 %	> 3 %	> 5,25	> 90 mm

4.3.3 Bewertung der Kesselaschen (Verschlackungsgrad „Sintering degree“)

Für die Bewertung der Kesselaschen (siehe Abschnitt 4.2.3) wurde die komplette Asche (Rostasche, Bodenasche aus dem Aschekasten und Flugasche aus Aschelade am Wärmetauscher) aus dem Kessel vorsichtig entnommen und die Gesamtmenge bestimmt. Anschließend wurde die Asche visuell einer der fünf Verschlackungsgrade gemäß Tabelle 11 zugeordnet.

Zusätzlich zur visuellen Beurteilung wurde eine Siebung wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben durchgeführt und der Slag Index nach Formel (4.1) bestimmt.

Tabelle 11: Beschreibung der fünf Verschlackungsgrade („Sintering degrees“) nach [66]

Verschla- ckungsgrad	Bild	Beschreibung
1		Nicht gesinterte Ascherückstände, lose Asche (deutliche Kornstruktur)
2a		Teilweise gesinterte Asche, z. B. Partikel bestehen eindeutig aus geschmolzener Asche und zerbrechen bei leichter Berührung (körnige Struktur der Asche)
2b		Teilweise gesinterte Asche, z. B. Partikel bestehen eindeutig aus geschmolzener Asche und zerbrechen NICHT bei leichter Berührung, können jedoch mit der Hand zerbrochen werden (körnige Struktur der Asche)
3		Vollständig gesinterte Asche, Aschebrocken zu kleinen Stücken verschmolzen, kann aber noch mit der Hand zerbröseln werden.

Verschla- ckungsgrad	Bild	Beschreibung
4		Vollständig gesinterte Asche, Aschebrocken zu kleinen Stücken verschmolzen, kann aber nicht mehr mit der Hand zerbröseln werden.

4.4 Statistische Analysen der Messergebnisse

Alle statistischen Analysen der Messdaten wurden mit der Software OriginPro 2015 durchgeführt. Für den Test auf Normalverteilung der Messdaten wurde der Shapiro-Wilk-Test verwendet. Für die Varianzanalyse kam bei Normalverteilung der Einzelwerte eine einfache ANOVA zum Einsatz. Für den paarweisen Mittelwertvergleich aller Mittelwerte einer gesamten Messreihe wurde der Tukey-Test durchgeführt. Für den direkten Vergleich, ob sich zwei Mittelwerte signifikant unterscheiden, wurde ein t-Test für verbundene Stichproben verwendet. Die Messdaten wurden als normalverteilt bzw. signifikant angenommen, sobald der p-Wert $\leq 0,05$ war. Wenn in den folgenden Abschnitten also von Signifikanz gesprochen wird, sind stets diese Bedingungen erfüllt.

5 Brennstoffanalysen und Brennstoffherstellung

5.1 Brennstoffanalysen der Ausgangsmaterialien und Festlegung der Additivierungsstufen

Die Analyse der Ausgangsmaterialien erfolgte durch den Projektpartner BIOS Bioenergiesysteme GmbH und die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Der Aschegehalt für den Referenzbrennstoff Holz lag mit 0,34 m-% in einem für Nadelholz typischen Bereich nach DIN EN ISO 17225-1 [22]. Pappel weist einen höheren Aschegehalt von 2,24 m-% auf. Für Sonnenblumenspelzen beträgt der Aschegehalt 2,89 m-%, für Weizenstroh beträgt er 4,27 m-%. Gras weist mit 8,53 m-% den höchsten Aschegehalt aller Ausgangsbrennstoffe auf. Die Aschegehalte aller Brennstoffe außer Holz könnten bereits ohne eintretende Verschlackung, z. B. Abwurffeuierungen, zum Verstopfen der Luftzufuhr und zum Überfüllen des Brennertopfs und somit zum Abschalten der Feuerungsanlage führen.

Der Heizwert der ENplus-Holzpellets liegt bei 18.891 kJ/kg. Die Sonnenblumenspelzen weisen einen leicht höheren Heizwert von 19.041 kJ/kg auf. Etwas geringer fällt der Heizwert für Pappel mit 18.411 kJ/kg aus. Den niedrigsten Heizwert der untersuchten Ausgangsmaterialien haben Weizenstroh mit 17.515 kJ/kg und Gras mit 16.835 kJ/kg.

Hinsichtlich des Ascheschmelzverhaltens ist vor allem bei den Brennstoffen Weizenstroh und Gras mit hoher Wahrscheinlichkeit mit Schlackebildung zu rechnen, da hier die Erweichungs- und Fließtemperatur (siehe DT und FT in Tabelle 12) im Bereich der zu erwartenden Temperaturen im Glutbett (ca. 1000–1200 °C) liegen [58].

Bei den aerosolbildenden Elementen (K, Na, Zn) zeigen sich deutliche Unterschiede. Der Kaliumgehalt, als Hauptkomponente der Aerosolbildner, für den Referenzbrennstoff beträgt 414 mg/kg. Pappel weist mit 3.070 mg/kg einen bereits vielfach höheren Kaliumgehalt auf. Sonnenblumenspelzen und Weizenstroh weisen Kaliumgehalte von 7.450 mg/kg bzw. 8.450 mg/kg auf und liegen somit auf einem untereinander vergleichbaren Niveau. Der hier untersuchte Brennstoff aus Gras markiert hier den Spitzenwert für den Kaliumgehalt mit 21.200 mg/kg, er liegt damit 51-mal höher als bei Holzpellets. Es ist somit mit einer deutlichen Zunahme an Gesamtstaub während der Verbrennung zu rechnen.

Tabelle 12: Analyseergebnisse der Brennstoffzusammensetzung und Ascheschmelzverhalten der Rohmaterialien

Parameter	Einheit	Holz	Weizenstroh	Pappel	Sonnenblumenspelzen	Gras
Wassergehalt	m-%, ar	5,52	8,53	7,87	6,90	9,68
Aschegehalt	m-%, d	0,34	4,27	2,24	2,89	8,53
Aschegehalt ohne Karbonate	m-%, d	0,28	3,96	1,66	2,40	8,23
Brennwert	kJ/kg, d	20.080	18.880	19.600	20.200	18.350
Heizwert*	kJ/kg, d	18.891	17.515	18.411	19.041	16.835
Anorganischer Kohlenstoff (TIC)	mg/kg, d	51.800	20.000	70.600	46.300	9.500
Leichtflüchtige	m-%, d	84,3	77,5	81,0	76,7	72,8
SST	°C	810	700	720	690	1.000
DT	°C	1.350	850	1.340	1.230	1.050
HT	°C	> 1.550	1.080	> 1.550	>1.550	1.110
FT	°C	> 1.550	1.100	> 1.550	>1.550	1.150
C	m-%, d	50,7	47,5	49,5	51,3	45,4
H	m-%, d	6,1	5,8	6,0	6,3	5,8
N	m-%, d	<0,1	0,44	0,27	0,65	2,5
Cl	mg/kg, d	64,3	2.090	75,0	383,0	3.600
S	mg/kg, d	52,1	717	384,0	1.490	2.260
Si	mg/kg, d	166,0	9.460	211,0	490,0	9.630
Al	mg/kg, d	25,1	145,0	31,2	27,8	988
Ca	mg/kg, d	811,0	2.860	6.010	3.810	7.560
Fe	mg/kg, d	27,5	117,0	55,4	83,2	721
K	mg/kg, d	414,0	8.450	3.070	7.450	21.200
Mg	mg/kg, d	131,0	767,0	554	1.910	3.350
Mn	mg/kg, d	134,0	22,2	9,0	8,6	78,3
Na	mg/kg, d	14,6	42,1	19,9	6,4	369,0
P	mg/kg, d	54,7	638,0	873	752	3.610
Zn	mg/kg, d	9,0	6,8	42,3	14,5	28,1

Wobei: ar = bezogen auf Feuchtmasse (as received); d = bezogen auf Trockenmasse (dry basis); SST = Temperatur am Beginn der Schrumpfung (shrinkage starting temperature); DT = Erweichungstemperatur (deformation temperature); HT = Halbkugeltemperatur (hemisphere temperature); FT = Fließtemperatur (flow temperature); * Bestimmung am TFZ

Basierend auf den hier bestimmten Kaliumgehalten wurde wie in Unterkapitel 2.3 beschrieben und in den veröffentlichten Guidelines dargestellt (siehe Anhang) [5] die stöchiometrisch notwendige Menge an Kaolinit bzw. Kaolin berechnet. Der stöchiometrisch berechnete sowie der inklusive des Sicherheitszuschlags tatsächlich gewählte Kaolinbedarf sind in Tabelle 13 für alle Brennstoffe außer Holz zusammengestellt.

Tabelle 13: Basierend auf den Brennstoffanalysen berechnete Additivierungsstufen

Parameter	Einheit	Weizenstroh	Pappel	Sonnenblumenspelzen	Gras
K	mg/kg, d	8.450	3.070	7.450	21.200
K	mol/kg, d	0,216	0,011	0,190	0,542
Stöchiometrischer Kaolin-Bedarf*	m-%, d	2,79	1,01	2,46	7,00
Angepasster Bedarf 1 (+ 12 %)*	m-%, d	3,12	1,13	2,76	7,84
Angepasster Bedarf 2 (+ 50 %)*	m-%, d	4,19	1,52	3,69	10,50

* Die berechneten Additivierungsstufen wurden unter Berücksichtigung eines Kaolinitgehalts von 87 % berechnet. Die für die Versuche ausgewählten Additivierungsstufen inklusive des Sicherheitszuschlags sind fett markiert.

5.2 Herstellung der Pellets

Insgesamt wurden mit der unter Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Pelletieranlage 13 Brennstoffe am TFZ hergestellt. Bis auf die *ENplus*-Holzpellets, die bereits als 6-mm-Pellets vorlagen, wurden die reinen Brennstoffe gemahlen und dann zu 6-mm-Pellets gepresst. Hinzu kommen der Referenzbrennstoff und die unter Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Zusatzbrennstoffe. Für die bessere Übersichtlichkeit über die somit insgesamt 17 Versuchsbrennstoffe in Tabellen und Grafiken wird fortan die in Tabelle 14 zusammengestellte Nomenklatur der Versuchsbrennstoffe verwendet.

Tabelle 14: Nomenklatur der Versuchsbrennstoffe

Brennstoff, Mischung, Additivierungsstufe	Abkürzung
Holzpellets ENplus („Wood pellets“)	W
Holz 90 Stroh 10 (Mischung aus gemahlenem Material)	W90WS10
Holz 75 Stroh 25 (Mischung aus gemahlenem Material)	W75WS25
Holz 50 Stroh 50 (Mischung aus gemahlenem Material)	W50WS50
Holz 50 Stroh 50 (Mischung aus Pellets)*	W50+WS50
Weizenstrohpellets	WS
Weizenstrohpellets mit 3,45 m-% Kaolin	WS3,45K
Pappelpellets	P
Pappelpellets mit 1,5 m-% Kaolin	P1,5K
Pappelpellets mit 1,5 m-% Kaolin (Additiv nach Pelletierung zugegeben)*	P+1,5K
Pappelhackschnitzel** („Poplar chips“)	PC
Pappelhackschnitzel mit 1,5 m-% Kaolin (Additiv direkt in die Brennstoffförderschnecke dosiert)**	PC+1,5K
Sonnenblumenspelzenpellets („Sunflower husks“)	Sf
Sonnenblumenspelzenpellets mit 2,8 m-% Kaolin	Sf2,8K
Graspellets	G
Graspellets mit 8,1 m-% Kaolin	G8,1K
Graspellets mit 10,5 m-% Kaolin	G10,5K

* nach Pelletierung gemischt bzw. additiviert, ** nicht pelletierter Brennstoff

In Tabelle 15 sind die zur Pelletierung eingestellten Wassergehalte des Rohmaterials bzw. der Materialmischungen sowie die Wasserdosierung während des Pelletierens (sofern erforderlich), die verwendete Matrize und Matrizenorientierung (Oberseite oder Unterseite) und der mittlere Durchsatz zusammengestellt. Der einzustellende Wassergehalt

wurde mithilfe der Erfahrungswerte der Firma Kahl GmbH und Co. KG sowie anhand von Vorversuchen ermittelt und durch die Dosierung von Wasser während des Pelletierens ggf. angepasst. Der Durchsatz bei der verwendeten Pelletieranlage lag bei maximal 311 kg/h für reines Gras und bei minimal 121 kg/h für W90WS10.

Tabelle 15: Eingestellter Wassergehalt, Wasserdosierung, bei der Pelletierung verwendete Matrize und Matrizenorientierung

Material/ Mischung	Wassergehalt Rohmaterial nach Konditionierung	Wasserdosierung am Einfülltrichter	Matrizenstärke und Matrizenorientierung	Mittlerer Brennstoff- durchsatz
	[m-%]	[l/h]	[mm]	[kg/h]
W90WS10	12	12–15	24 oben	121
W75WS25	12	–	24 oben	162
W50WS50	12	–	30 oben	197
WS	14	5–8	36 unten	122
WS3,45K	15	–	36 unten	155
P	12	6	30 oben	211
P1,5K	11	–	30 oben	166
Sf	15	4	36 unten	128
Sf2,8K	10	–	30 unten	156
G	10	4	30 unten	311
G8,1K	12	–	30 unten	213
G10,5K	11	–	30 unten	156

Die gleichmäßige Verteilung des Additivs während des Pelletierprozesses wurde überprüft, indem zehn Proben bei der Herstellung von WS3,45K gleichmäßig über die Versuchsdauer gezogen und hinsichtlich des Aschegehalts, Wassergehalts und des Heizwerts untersucht wurden. Die Homogenität des Additivs über den Pelletierprozess lässt sich anhand des Verlaufs des Aschegehalts beschreiben (Abbildung 11). Bis auf die letzte Probe (10) schwankt der Aschegehalt zwischen 6,34 und 6,62 %, was für eine hohe Homogenität des Additivs in der Pellet-Charge spricht. Probe 10 weicht mit 5,89 % Aschegehalt etwas weiter vom Durchschnitt ab, was dadurch zu erklären ist, dass bei

der letzten Probe der in der Förderschnecke zur Pelletieranlage verbliebene Rest entnommen (Staubsauger) und per Hand in den Einfülltrichter gefüllt wurde.

Der Wassergehalt nimmt von Beginn des Pelletierprozesses bis ca. zur Mitte (6) von 6,5 auf 5,9 m-% leicht ab. Danach steigt der Wassergehalt bis zum Ende des Pelletiervorgangs wieder auf 6,4 m-% an. Der Grund hierfür ist vermutlich der Umstand, dass die zerkleinerte Biomasse chargenweise in dem ca. 200 kg fassenden Extraktmischer (siehe Abschnitt 4.1.2) befeuchtet und homogenisiert wird. Durch die Zwischenlagerung in den Hartkunststoffkisten ist es zudem möglich, dass sich ein Gefälle des Wassergehalts innerhalb der Box von oben nach unten ausbildet.

Der Heizwert ist relativ homogen verteilt und beträgt zwischen 17,18 und 17,22 MJ/kg. Lediglich die Proben 1 und 10 weisen einen höheren Heizwert auf. Dies deckt sich für Probe 10 mit dem deutlich niedrigeren Aschegehalt. Auch in der Probe 1 lag der Aschegehalt etwas niedriger.

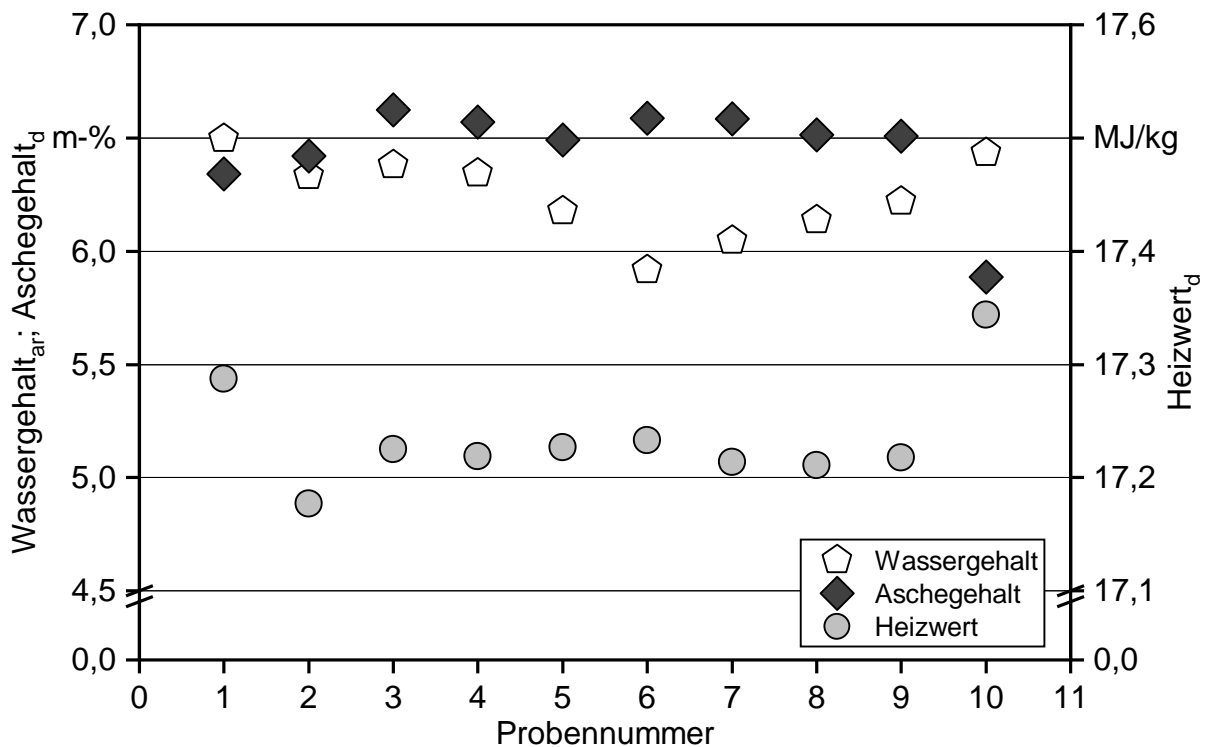


Abbildung 11: Verlauf des Wassergehalts, des Aschegehalts und des Heizwerts über den Pelletierprozess von WS3,45K

Zudem wurde versucht, den tatsächlichen Additivgehalt in den produzierten Pellets anhand des Aschegehalts der additivierten Pellets und der reinen Rohmaterialien zu berechnen, wie dies als Qualitätssicherungsmaßnahme von der Holzforschung Austria empfohlen wird [68]. Hier ergab sich jedoch bereits bei Vorversuchen eine Abweichung von ca. 0,25 m-% Kaolin, weshalb die zugegebene Menge an Kaolin bei den Brennstoffen WS3,45K, Sf2,8K und G8,1K um 0,25 m-% erhöht wurde im Vergleich zu den berechneten Masseanteilen in Unterkapitel 5.1.

Allerdings zeigte sich trotz der Zugabe wieder eine Abweichung der aus dem Aschegehalt berechneten Menge an Kaolin gegenüber dem vorgegebenen Kaolingehalt von ca. 0,7 m-%. Während eines Vorversuchs mit Kaolin wurde beobachtet, dass sich – bedingt durch chemische Veränderungen während der Veraschung wie Kaliumbindung, Carbonatbildung etc. (siehe auch Unterkapitel 7.6) – der Aschegehalt des additivierten Brennstoffs bei 550 °C im Vergleich zu dem über die Aschegehalte der Mischungs-partner (Biomasse bzw. Kaolin) berechneten Aschegehalt zu verringern scheint. Somit scheint der Aschegehalt nicht geeignet zu sein, den tatsächlichen Kaolingehalt im Brennstoff zu bestimmen, er kann aber durchaus zur Überprüfung der Homogenität der Additivzugabe im Brennstoff herangezogen werden. Die tatsächlichen Kaolingehalte der hergestellten Brennstoffe wurden daraufhin aus den gewogenen Mengen der Biomasse und des Kaolins unter Berücksichtigung des Wassergehalts angegeben (siehe Tabelle 16). Aus diesem Zusammenhang ergeben sich auch die zur Berechnung (siehe Tabelle 13) abweichenden Additivgehalte der Brennstoffe WS3,45K, Sf2,8K und G8,1K.

Die am TFZ hergestellten Pellets weisen verglichen mit den vom Markt bezogenen Holzpellets (99,3 m-%) weitestgehend eine vergleichbare mechanische Festigkeit zwischen 94,6 und 99,1 auf (siehe Tabelle 16). Der Feingehalt (< 3,15 mm) liegt für die hergestellten Pellets zwischen 0 und 0,12 m-%. Damit erfüllen alle Brennstoffe außer reinen Weizenstrohpellets sowie Sonnenblumenspelzen pur und mit Kaolin die Spezifikationen hinsichtlich mechanischer Festigkeit (> 98 m-%) und Feinanteils (< 1 m-%) des EN*plus*-A1-Zertifikats für Holzpellets [42], das hier zur groben Einordnung der Messwerte auch bei den Nichtholzbrennstoffen herangezogen wird. Die niedrigste mechanische Festigkeit weisen die Pellets aus Sonnenblumenspelzen mit 2,5 m-% Kaolin (94,6 m-%) auf, gefolgt von reinen Sonnenblumenspelzen (96,3 m-%) und reinem Weizenstroh (96,4 m-%). Demzufolge würden die Anforderungen für Holzpellets von EN*plus* A2 bzw. B hinsichtlich der mechanischen Festigkeit nicht eingehalten. Dies kann insofern an einer fehlenden Matrizengröße zwischen den Matrizen mit 30 und 36 mm Pressweg mit einem Pressweg von 33 mm liegen (vgl. Tabelle 6), als eventuell nicht das nötige Pressverhältnis für diese Brennstoffe eingestellt werden konnte.

Tabelle 16: Physikalische Eigenschaften der hergestellten Versuchsbrennstoffe

Parameter	Aschegehalt _d	Wassergehalt _{ar}	Heizwert _d	Mechanische Festigkeit	Feinanteil < 3,15 mm	Schüttdichte _{ar}	Partikeldichte _{ar}
Einheit	[m-%]	[m-%]	[MJ/kg]	[m-%]	[m-%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
W	0,3	7,9	18,9	99,3	0,00	684	1.316
W90WS10	0,7	7,6	18,8	98,7	0,02	768	1.290
W75WS25	1,3	8,6	18,6	98,0	0,04	722	1.277
W50WS50	2,3	8,3	18,3	98,3	0,03	742	1.433
WS	4,2	8,8	17,5	96,4	0,3	625	1.198
WS3,45K	6,6	8,2	17,1	98,9	0,03	730	1.270
P	2,3	8,4	18,4	99,1	0,01	699	1.307
P1,5K	3,1	8,6	18,2	98,0	0,04	689	1.403
Sf	2,9	8,4	19,0	96,3	0,03	710	1.291
Sf2,8K	4,8	7,3	18,6	94,6	0,12	766	1.327
G	8,8	11,3	16,8	98,8	0,01	722	1.330
G8,1K	13,9	11,0	15,7	98,4	0,03	820	1.297
G10,5K	16,0	10,2	15,2	98,7	0,02	835	1.307

Wobei: d = bezogen auf Trockenmasse; ar = bezogen auf Feuchtmasse (engl. „as received“)

Der Aschegehalt der hergestellten Brennstoffe lag zwischen 0,3 m-% für Holzpellets und 16,0 m-% für Graspellets mit 10,5 m-% Kaolin. Damit entsprechen beim Aschegehalt die Holzpellets den Kriterien nach ENplus A1 ($\leq 0,7$ m-%), die Mischung W90WS10 ENplus A2 ($\leq 1,2$ m-%) und die Mischung W75WS25 immerhin noch ENplus B (≤ 2 m-%). Die anderen Brennstoffe liegen alle über 2 m-% Aschegehalt. Der Heizwert nimmt mit steigendem Aschegehalt ab [58]. Somit weist Gras mit 10,5 % Kaolin nicht nur einen extrem hohen Aschegehalt auf, sondern mit 15,2 MJ/kg auch den niedrigsten Heizwert der hergestellten Brennstoffe. Nach ENplus für Holzpellets wird für alle Qualitätsklassen ein Heizwert von $\geq 4,6$ kWh/kg gefordert, was umgerechnet 16,56 MJ/kg entspricht. Demnach blieben alle Brennstoffe außer Gras mit 8,1 und 10,5 m-% Additiv noch über diesem Schwellenwert. Die Schüttdichte sollte für eine ENplus-Zertifizierung zwischen 600 und 750 kg/m³ liegen. Hier liegen die Brennstoffe W90WS10, Sf2,8K, G8,1K und G10,5K darüber. Allerdings scheint die Schüttdichte nicht direkt vom verwendeten Rohmaterial abhängig zu sein, da z. B. die Schüttdichte von reinem Gras und Sonnenblumenspelzen deutlich niedriger liegt. Auch die Additivierung mit Kaolin kann nicht der Grund für den Anstieg der Schüttdichte sein, da z. B. die Schüttdichte von Pappel mit Kaolin niedriger ist als diejenige der reinen Pappelpellets. Die Partikeldichte der Holzpellets liegt bei

1.316 kg/m³, die Partikeldichten der am TFZ hergestellten Pellets erreichen Werte zwischen 1.198 kg/m³ (WS) und 1.433 kg/m³ (W50WS50).

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen mechanischer Festigkeit der Pellets und der Partikel- bzw. Schüttdichte zu untersuchen, wurden diese Parameter in Abbildung 12 gegenübergestellt. Eine eindeutige Abhängigkeit von Schüttdichte und Partikeldichte (Abbildung 12) sowie zwischen Partikeldichte und mechanischer Festigkeit scheint nicht gegeben zu sein.

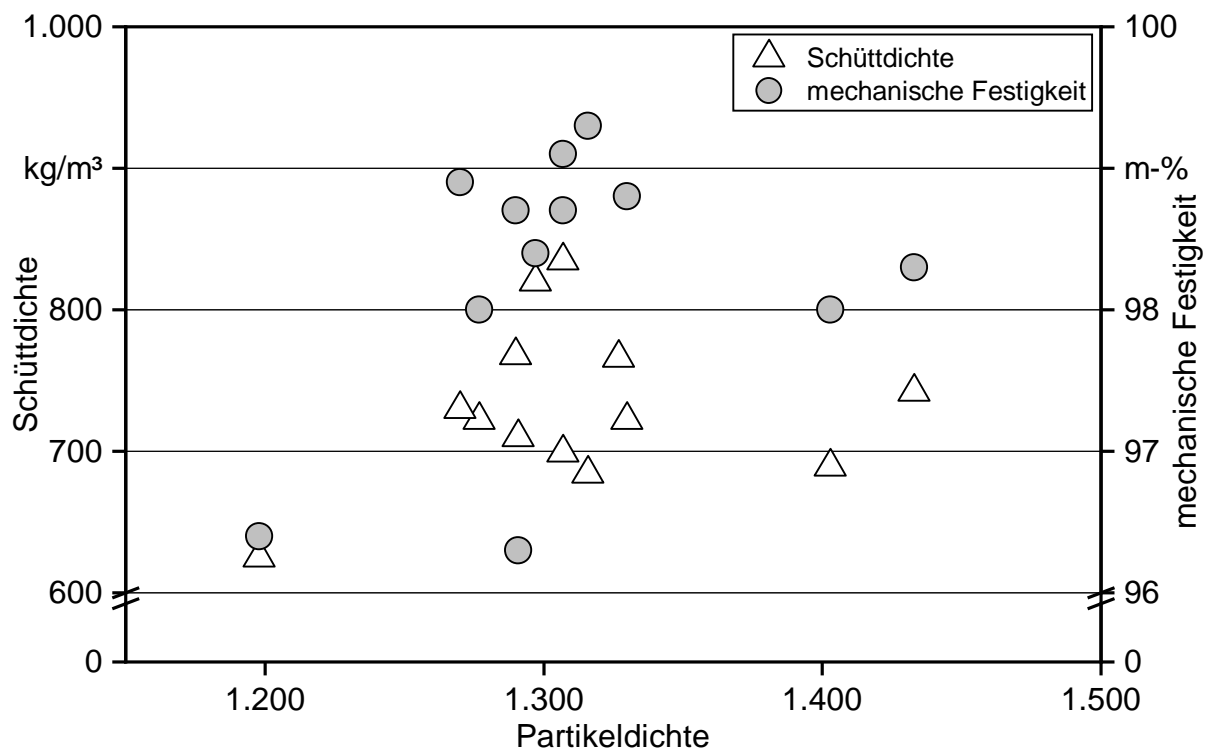


Abbildung 12: Gegenüberstellung von Schüttdichte und mechanischer Festigkeit in Abhängigkeit von der Partikeldichte

Hinsichtlich der mittleren Pelletlänge weisen die hergestellten Brennstoffe je nach Zusammensetzung, Mischungsverhältnis bzw. Additivanteil Unterschiede auf. Ein weiterer Einflussfaktor auf die mittlere Pelletlänge ist die verwendete Matrize (Tabelle 15). Die kleinste mittlere Pelletlänge weisen die vom Markt bezogenen Holzpellets mit 12,3 mm auf, die minimale Länge beträgt 5,2 mm und die maximale Länge 32,2 mm (Tabelle 17). Am längsten wurden die Pellets bei reinem Gras mit durchschnittlich 23,5 mm, einer minimalen Länge von 5,9 mm und einer maximalen Länge von 32 mm. Alle hergestellten Pellets liegen innerhalb der für ENplus-Pellets geforderten Grenzen von $3,15 < L \leq 40$ mm. Der Pelletdurchmesser der hergestellten Brennstoffe liegt ebenfalls im Bereich von 6 ± 1 mm.

Tabelle 17: Ergebnisse der Untersuchungen zu Pelletlänge und Durchmesser nach DIN EN ISO 17829 [33]

	Länge				Durchmesser			
	Mittelwert	Min	Max	SD	Mittelwert	Min	Max	SD
W	12,3	5,2	32,2	5,83	6,1	5,9	6,3	0,07
W90WS 10	17,2	3,6	27,5	5,89	6,0	5,9	6,1	0,04
W75WS 25	15,9	6,4	25,7	5,20	6,0	5,9	6,3	0,08
W50WS 50	14,0	3,4	25,5	5,87	6,1	5,9	6,3	0,08
WS	13,0	3,5	23,2	5,20	6,2	6,0	6,4	0,12
WS3,45 K	15,4	3,4	24,1	5,25	6,1	6,0	6,3	0,06
P	14,8	6,3	24,2	4,98	6,0	5,9	6,1	0,04
P1,5K	14,2	3,9	24,8	5,62	6,1	5,9	6,3	0,08
Sf	13,0	5,6	20,6	4,12	6,1	5,9	6,3	0,08
Sf2,8K	10,4	4,4	19,5	4,01	6,1	6,0	6,5	0,07
G	23,5	5,9	32,0	6,61	6,1	5,9	6,2	0,05
G8,1K	21,7	11,5	27,6	3,52	6,0	5,5	6,1	0,10
G10,5K	21,7	8,5	26,9	3,26	6,0	5,9	6,1	0,05

5.3 Zusätzliche Versuche mit direkter Additivzugabe und Mischen von Pellets

Um die Wirksamkeit einer Additivzugabe ohne anschließende Pelletierung zu untersuchen, wurden reine Pappelpellets hergestellt und erst nach der Pelletierung in einer Tonne mit Kaolin vermischt. Weiterhin wurde der Effekt der direkten Kaolinzugabe ohne Pelletierung an Pappelhackschnitzeln unmittelbar vor dem Eintritt des Brennstoffs in den

Kessel untersucht. Hierzu wurde das Kaolin mit einer Dosierschnecke in die Brennstoffförderscheibe des Austragbehälters hinzudosiert. Für den dritten Zusatzversuch wurde aus bereits hergestellten Weizenstrohpellets und den Holzpellets eine Mischung im Verhältnis 50/50 hergestellt, d. h., statt des gemahlene Rohstoffs wurden reine Pellets vermischt.

5.4 Beurteilung der Brennstoffe hinsichtlich der verbrennungstechnischen Eigenschaften (Brennstoffindizes)

Aus den Mischungsverhältnissen und der Elementaranalyse der Rohmaterialien und des Kaolins wurde die Elementarzusammensetzung der Brennstoffmischungen berechnet. Tabelle 18 zeigt die zur Berechnung der Brennstoffindizes benötigten Neben- und Spurenelementkonzentrationen der hergestellten Brennstoffe. Die Indizes dieser Brennstoffe sind in Tabelle 19 zusammengestellt.

Tabelle 18: Elemente der pelletierten Brennstoffe

Parameter	Si	P	K	Ca	Mg	Al	Cl
Einheit	[mg/kg, d]	[mg/kg, d]	[mg/kg, d]	[mg/kg, d]	[mg/kg, d]	[mg/kg, d]	[mg/kg, d]
W	166	54,7	414	811	131	25,1	64,3
W90WS10*	1.095	113	1.218	1.016	194	37,1	267
W75WS25*	2.489	200	2.423	1.323	290	55,1	571
W50WS50*	4.813	346	4.432	1.836	449	85,1	1.077
WS	9.460	638	8.450	2.860	767	145	2.090
WS3,45K*	17.037	616	8.559	2.811	761	6.531	2.018
P	211	873	3.070	6.010	554	31,2	75,0
P1,5K*	3.644	860	3.198	5.941	555	2.809	73,9
Sf	490	752	7.450	3.810	1.910	27,8	383
Sf2,8K*	6.891	731	7.567	3.743	1.873	5.214	372
G	9.630	3.610	21.200	7.560	3.350	988	3.600
G8,1K*	27.407	3.318	20.424	7.063	3.128	15.912	3.308
G10,5K*	32.674	3.231	20.194	6.916	3.062	20.334	3.222

* Die Konzentrationen der Elemente wurden aus den Elementgehalten der Rohmaterialien und des Additivs gemäß Mischungsregel berechnet.

Ascheerweichung (Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)-Verhältnis: Hinsichtlich der Ascheerweichung der reinen Versuchsbrennstoffe weisen Gras (2,8) und vor allem reines Weizenstroh (5,3) Werte über 2,5 auf. Für diese Brennstoffe sind daher eine niedrige Ascheschmelztemperatur und damit ein erhöhtes Risiko für Schlackebildung während der Verbrennung zu erwarten [77]. Durch die Zugabe von Kaolin und die damit bedingte Erhöhung des Aluminiumgehalts wird der Ascheerweichungsindex für die meisten Brennstoffe deutlich abgesenkt. Die Ausnahme ist hier die Pappel, hier wird der Ascheerweichungsindex durch die Zugabe von 1,5 m-% Kaolin um ca. 0,2 leicht erhöht. Die Mischung von Weizenstroh mit Holz führt zu der angestrebten Absenkung des Ascheerweichungsindex, verglichen mit reinem Stroh. Allerdings wird der Schwellenwert von 2,5 erst bei dem hohen Holzbeimischungsverhältnis von W90WS10 unterschritten.

Hochtemperaturkorrosion 2S/Cl-Verhältnis: Laut diesem Index ist lediglich für Pappel und Sonnenblumenspelzen mit einer niedrigen Wahrscheinlichkeit für Hochtemperaturkorrosion zu rechnen. Alle Brennstoffe, die Weizenstroh sowie Gras enthalten, weisen ein erhöhtes Risiko der Hochtemperaturkorrosion nach diesem Index auf. Dies würde auch für Holzpellets zutreffen, allerdings sind hier die Schwefel- und Chlorkonzentrationen im Brennstoff so niedrig, dass vermutlich mit keiner solchen Gefahr zu rechnen ist. Gemäß diesem Index hat weder die Additivierung der Brennstoffe noch eine Mischung von Weizenstroh mit Holz einen wesentlichen Einfluss auf die Hochtemperaturkorrosion.

K-Freisetzung Cl/Si-Verhältnis: Das höchste Cl/Si-Verhältnis der untersuchten Brennstoffe weisen die Sonnenblumenspelzen mit 0,62 auf. Durch die Additivierung mit 2,8 m-% Kaolin lässt sich der Index von 0,62 auf 0,04 deutlich absenken. Dies konnte für alle additivierten Brennstoffe festgestellt werden. Bei Graspellets wird der K-Freisetzungindex von 0,30 auf 0,10 mit Zugabe von 8,3 m-% Kaolin und sogar auf 0,08 mit Zugabe von 10,5 m-% Kaolin abgesenkt. Die Mischung von Weizenstroh mit Holz führt hinsichtlich des Cl/Si-Verhältnisses zu keiner Verbesserung, da der Index für die untersuchten Holzpellets höher als der von Weizenstroh ist. Dadurch erhöht sich der Index sogar für das Mischungsverhältnis W90WS10.

K-Freisetzung der reinen Brennstoffe Si/K-Verhältnis: Für die reinen Brennstoffe lässt sich auch das molare Si/K-Verhältnis vergleichen. Diese liegen für Sonnenblumenspelzen mit 0,09, Pappel mit 0,1, Holz mit 0,56 und Gras mit 0,63 alle deutlich unter 1 und deuten auch auf eine erhöhte Kaliumfreisetzung in die Gasphase hin [59]. Weizenstroh dagegen liegt mit 1,56 schon deutlich höher, allerdings auch nicht über 2,5. Das Si/K-Verhältnis wird durch die Zugabe von Kaolin zwar erhöht, aber nicht in einem Maß, das auf massive Kaliumeinbindung in die Asche schließen lässt, weshalb sich dieser Index auch nicht für additivierte Brennstoffe eignet.

Summe der Aerosolbildner (K, Na, Zn): Die Summe der Aerosolbildner beträgt 438 mg/kg für Holzpellets, 3.132 mg/kg für Pappel, 7.471 für Sonnenblumenspelzen, 8.499 für Weizenstroh und 21.597 mg/kg für Gras. Den Hauptanteil macht dabei jeweils das Kalium aus (siehe Unterkapitel 5.1). In dieser Reihenfolge sollte auch mit einem Anstieg der Aerosolbildung und damit der Gesamtstaubemissionen zu rechnen sein.

Tabelle 19: Berechnete Brennstoffindizes der pelletierten Versuchsbrennstoffe

Parameter	(Si+P+K)/ (Ca+Mg+Al)	Cl/Si	2S/Cl	Si/K	Σ (K, Na, Zn)
Einheit	[mol/mol]	[mol/mol]	[mol/mol]	[mol/mol]	[mg/kg, d. b.]
W	0,69	0,31	1,79	0,56	438
W90WS10*	2,12	0,19	0,98	1,25	1.244
W75WS25*	3,34	0,18	0,85	1,43	2.453
W50WS50*	4,39	0,18	0,79	1,51	4.468
WS	5,29	0,18	0,76	1,56	8.499
WS3,45K*	2,46	0,09	0,76	2,77	8.607
P	0,66	0,28	11,32	0,10	3.132
P1,5K*	0,87	0,02	11,32	1,59	3.259
Sf	1,33	0,62	8,6	0,09	7.471
Sf2,8K*	1,27	0,04	8,6	1,27	7.587
G	2,76	0,30	1,39	0,63	21.597
G8.1K*	1,79	0,10	1,39	1,87	20.789
G10.5K*	1,70	0,08	1,39	2,25	20.550

* Die Konzentrationen der Neben- und Spurenelemente wurden aus den Elementgehalten der Rohmaterialien und des Additivs berechnet.

5.5 Verschleiß an der Pelletieranlage

Nach der Herstellung der Versuchsbrennstoffe wurde ein erhöhter Verschleiß an den Matrizen sowie am Kollerkopf der Pelletieranlage festgestellt (siehe Abbildung 13). Diese Abnutzung erscheint in Anbetracht der insgesamt produzierten Menge von ca. 7 t Pellets, die sich auf drei Matrizen verteilt, von denen zwei beidseitig benutzt wurden, relativ hoch. Zum Vergleich liegt die Standzeit für Matrizen und Koller bei Praxisanlagen üblicherweise bei 300 bis 4.000 h [58]. Die Anlage am TFZ hatte nach den Versuchen ca. 90 Betriebsstunden inklusive Zerkleinerung, aufgeteilt auf fünf Matrizen, von denen drei beidseitig benutzt wurden.

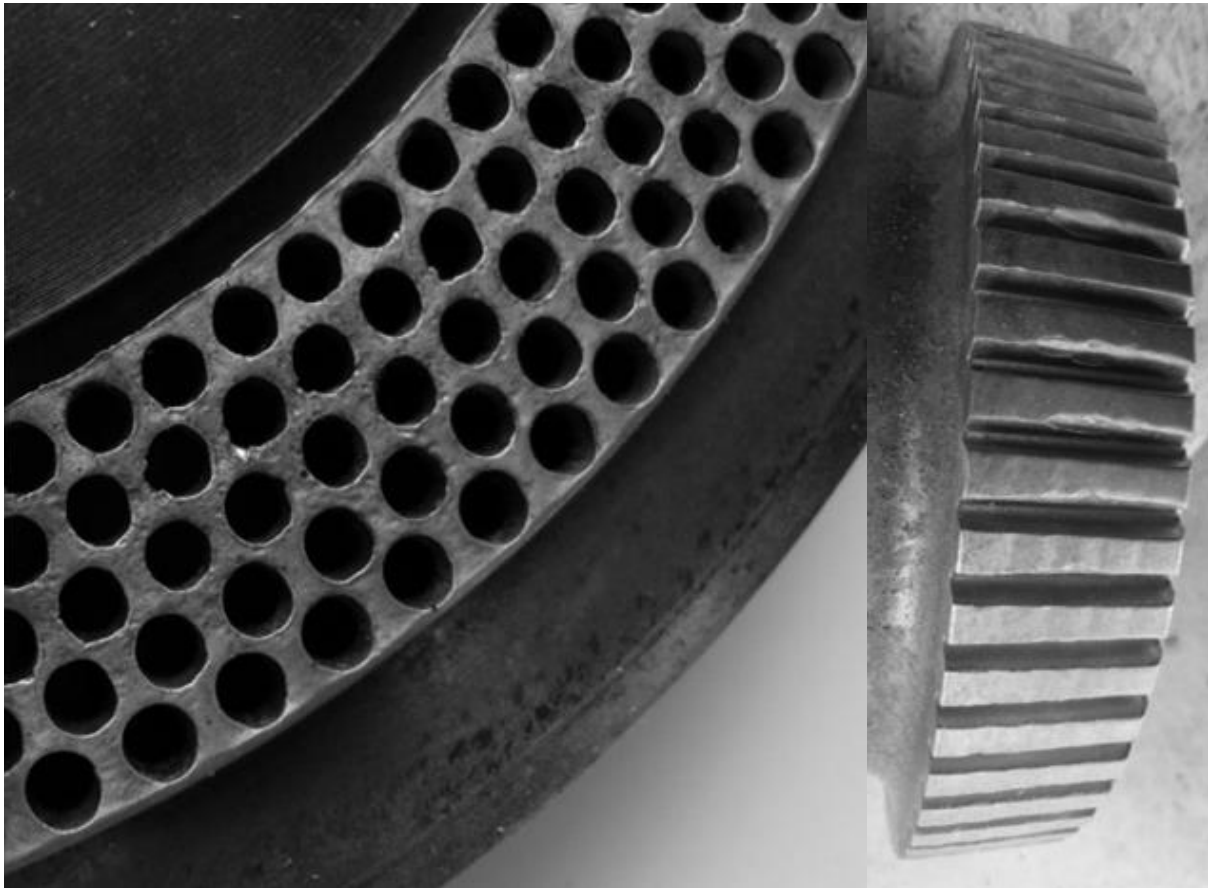


Abbildung 13: Verschleiß an einer der verwendeten Matrizen (links) und am Kollerkopf (rechts) der Pelletieranlage am TFZ

Zum einen muss erwähnt werden, dass hier 13 verschiedene Brennstoffe teilweise auf mehrere Chargen bzw. Arbeitstage verteilt in eher geringen Mengen produziert wurden. Hierdurch sind häufige An- und Abfahrprozesse der Anlage notwendig, bei denen der Rest der Biomasse am Ende immer mit einer Mischung aus Sand und Rapsöl aus der Matrize gepresst wurde. Hier wurde nach diesen Versuchen auf eine Mischung aus Sojabohnen, gemahlenem Holz und Rapsöl umgestellt. Diese An- und Abfahrprozesse selbst führen (auch durch die dann nicht kontinuierliche Materialzufuhr) bereits zu einem höheren Verschleiß, verglichen mit einer kontinuierlich betriebenen Anlage. Zudem sollte erwähnt werden, dass die verwendeten Matrizen aus der weichsten der von der Firma Amandus Kahl GmbH & Co. KG angebotenen Stahllegierungen (AKN 2/7) bestehen. Dies entspricht dem Werkstoff 50CrV4 mit einer Zugfestigkeit von $900\text{--}1.200\text{ N/mm}^2$ [70], was ca. einer Vickers-Härte von $280\text{--}370$ bzw. einer Brinellhärte von $266\text{--}351$ entspricht [51]. In der Regel werden für die Pelletierung von Biomasse Matrizen aus X46Cr13 empfohlen. Dieser Stahl kann bis zu einer Vickers-Härte von ca. 600 bzw. einer Brinellhärte von ca. 570 gehärtet werden [14] [51].

I wieweit der erhöhte Verschleiß auch teilweise auf die hohen Kaolinzugaben sowie die pelletierte Biomasse selbst zurückzuführen ist, bleibt somit unklar. Einige Hersteller und Pelletproduzenten berichten von erhöhtem Verschleiß bzw. kürzeren Standzeiten der Matrizen und Koller bei höherem Aschegehalt der Biomasse. Allerdings gibt es hierzu

wenig systematisch erarbeitete oder belastbare Informationen und auch keine Methode zur Bestimmung bzw. Quantifizierung von Verschleiß an Matrizen und Kollern. Folgende Informationen sind bisher aus der Literatur bekannt:

- Silizium erhöht den Abrieb und den Verschleiß der Pressen (Koller, Matrizen) und Fördersysteme [44].
- Erhöhter Verschleiß entsteht durch das abrasive Verhalten von Rinde [44].
- Mit einem Anstieg des Wassergehalts (Zugabe von Wasser oder Dampf) im Pelletierprozess erhöht sich die Gleitfähigkeit des Pressguts und der Materialverschleiß nimmt ab. Ab einem vom zu pelletierenden Material abhängigen kritischen Wassergehalt nimmt jedoch auch die mechanische Festigkeit der Pellets ab [58].
- Hohe Temperaturen durch Reibung und/oder Konditionierung mit Heißdampf erhöhen den Verschleiß [58].
- Die Dosierung und Verteilung des Materials auf der Matrize hat einen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Abnutzung einer Matrize (bei Ringmatrize besser als bei Flachmatrize) [58].
- Verunreinigungen der Biomasse durch metallische oder mineralische Störstoffe erhöhen den Verschleiß [44] [58].

Grundsätzlich unterscheidet man üblicherweise folgende Verschleißarten nach dem zugrunde liegenden physikalischen Mechanismus [69]:

- **Abrasiver Verschleiß:** tritt bei Kontakt zweier Körper mit wesentlich unterschiedlicher Härte bzw. mit einer Zwischenschicht, die harte Teilchen enthält, auf.
- **Adhäsiver Verschleiß:** tritt bei Kontakt zwischen Körpern mit gleicher oder ähnlicher Härte auf.
- **Korrosiver Verschleiß:** chemische Modifizierung der Oberfläche mit einer abschließenden Abtragung der Oberflächenschicht.
- **Oberflächenermüdung:** verursacht durch mehrmalige Beanspruchung der Oberfläche, entweder durch Gleiten oder durch Rollen. Dabei treten bei jeder einzelnen Beanspruchung keine offensichtlichen Änderungen der Oberfläche auf.

Beim Pelletieren können generell vermutlich alle der hier genannten Verschleißarten auftreten. Für den hier feststellbaren erhöhten Verschleiß kann allerdings davon ausgegangen werden, dass es sich zum Großteil um adhäsiven Verschleiß (Koller läuft beim An- oder Abfahren der Anlage auf der Matrize bzw. auf der Materialschicht je nach Härte) und um abrasiven Verschleiß (Schicht aus Biomasse, Additiv oder Sand-Rapsöl-Gemisch beim An- und Abfahren zwischen Koller und Matrize) handelt. Im Folgenden soll auf die abrasiven und adhäsiven Eigenschaften des zu pelletierenden Materials eingegangen werden.

Unter abrasivem Verschleiß versteht man das Eindringen der Rauigkeitsspitzen des härteren Materials in das weichere Material, das dadurch geschnitten wird. Eine Sonderform des abrasiven Verschleißes ist der Verschleiß von Körpern in Anwesenheit harter abrasiver Teilchen im Zwischenmedium (z. B. Additiv oder mineralische Verunreinigungen in der Biomasse). Hier spricht man vom Drei-Körper-Verschleiß. Die Verschleißgeschwindigkeit wird dabei weniger von der Härte des Abrasivs als von der Härte des weicheren Materials (Matrize und Koller) sowie der Fähigkeit des Abrasivs, scharfe, schneidende Kanten zu bilden, bestimmt [69].

Haben die Reibpartner vergleichbare Härten, so beginnt der adhäsive Verschleiß die Hauptrolle zu spielen. Der Mechanismus des adhäsiven Verschleißes kann näherungsweise als das Zusammenschweißen von Mikrorauigkeiten gefolgt vom Herauslösen oberflächennaher Volumenelemente (Verschleißteilchen) beschrieben werden. Metallische Stoffe (Matrize und Koller) besitzen die Grundeigenschaft, sich nach Überschreiten einer gewissen kritischen Spannung plastisch zu deformieren. Bei einer Zugbelastung folgt nach einer kritischen Deformation der Bruch. Beim Überschreiten der plastischen Grenze bei einer Druckbelastung (Pelletierung) verschweißen metallische Partner dagegen und es können bei darauffolgender Zugbelastung (z. B. Koller rollt über Matrize) Verschleißteilchen aus dem Material herausgelöst werden. Hierdurch können Vertiefungen im Material entstehen, die die Rauigkeit der Oberflächen erhöhen [69].

Vereinfacht ausgedrückt muss das zu pelletierende Material verglichen mit dem Material der Matrize bzw. dem Koller entweder härter (abrasiver Verschleiß) oder zumindest ähnlich hart (adhäsiver Verschleiß) sein, um einen erhöhten Verschleiß zu verursachen.

Die Brinellhärte von Fichte liegt beispielsweise bei ca. 12, die von Buche bei 34 und die von Bambus bei > 38 [54]. Die Vickers-Härte von Kaolin liegt bei ca. 42 [74] und kann näherungsweise mit dem Faktor 0,95 (für Stahl) [27] in eine Brinell-Härte von 39,9 umgerechnet werden. Damit liegt die Härte von Kaolin sehr nahe an derjenigen von Buchenholz. Die Vickers-Härte von Korund, das als Schleifmittel (Abrasive) verwendet wird, liegt dagegen bei 2.433 [74].

Die zum Pelletieren verwendeten Materialien sind also deutlich weicher als die eingesetzten Matrizen, weshalb die Vermutung nahe liegt, dass der erhöhte Verschleiß größtenteils auf die häufigen An- und Abfahrprozesse zurückzuführen ist. In diesem Zusammenhang ist vor allem auch das verwendete Sand-Rapsöl-Gemisch zu erwähnen. Für eine endgültige Bewertung des durch die Additivierung zusätzlich verursachten Verschleißes sind weitere Untersuchungen sowie eine geeignete Methode zur Quantifizierung des Verschleißes mittels eines geeigneten Messverfahrens erforderlich.

6 Ergebnisse der Feuerungsversuche

Im Rahmen der Untersuchungen wurden umfangreiche Emissionsmessungen während des Brennstoffeinsatzes im Kessel durchgeführt. Ebenfalls erfolgte eine ausführliche Beurteilung bezüglich der Verschlackungsneigung der hergestellten Brennstoffe nach dem Feuerungsversuch im Kessel sowie anhand der zwei vorgestellten Labormethoden.

Insgesamt wurden inklusive der in Unterkapitel 5.3 beschriebenen zusätzlichen Versuche 17 Feuerungsversuche bei Nennlast mit unterschiedlichen Brennstoffen (siehe Unterkapitel 5.2, Tabelle 14) an 17 Versuchstagen durchgeführt.

6.1 Betriebserfahrungen und allgemeine Betriebsparameter (Übersicht)

Nur in einem Fall konnten die Feuerungsversuche nicht über die volle Dauer von 8 h im stationären Betriebszustand bei Nennlast störungsfrei durchgeführt werden: Im Versuch mit den reinen Weizenstrohpellets musste nach der zweiten Staubmessung (180 min) wegen extremer Schlackebildung (siehe Abbildung 14) abgebrochen werden. Ein direkter Vergleich der Emissionen von reinen Weizenstrohpellets (in den Diagrammen markiert) und den additivierten Brennstoffen bzw. Mischungen mit Weizenstroh ist daher nur sehr eingeschränkt möglich.



Abbildung 14: Schlackebrocken verstopfen die Entschungsöffnung bei der Verbrennung reiner Weizenstrohpellets im 30-kW-Kessel

Abgesehen von der vorgenannten Einschränkung ließen sich aber mit allen übrigen Brennstoffen belastbare und störungsfreie Versuche durchführen. Die allgemeinen Betriebsparameter wie Brennstoffmassenstrom, Kesselwärmeleistung, Wirkungsgrad (η), Lambda sowie die relevanten Gaskomponenten zeigt Tabelle 20.

Die Wärmeleistung lag während des Vollastbetriebs für alle Brennstoffe über dem vom Hersteller angegebenen Nennwärmeleistungswert von 30 kW_{th}. Der Brennstoffmassenstrom wurde durch die Kesselregelung aufgrund der Regelgröße Feuerraumtemperatur mit steigendem Aschegehalt bzw. sinkendem Energiegehalt automatisch angepasst und steigt durch die Additivierung mit Kaolin in allen Fällen an. Die Mischung von Holz mit Weizenstroh scheint einen leicht positiven Einfluss auf den Kesselwirkungsgrad zu haben. Die Additivierung mit Kaolin wirkt sich teilweise positiv für Graspellets mit einer Steigerung von 82 auf 88 % aus, während die Additivierung eine Wirkungsgradreduktion von 85 auf 78 % für Pappel und von 86 auf 84 % für die Sonnenblumenspelzenpellets bewirkt. Eine Additivierung von Weizenstroh zeigte keine Veränderung beim Wirkungsgrad auf. Die Luftverhältniszahl betrug bei allen Versuchen zwischen 1,7 und 1,8.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Betriebsparameter und gasförmigen Emissionen für die untersuchten Brennstoffe (zu den Heizwerten, Asche- und Wassergehalten vgl. Tabelle 16)

Brennstoff	Brennstoffmassenstrom kg/h _{ar} ^b	Kesselwärmeleistung kW ^b	η % ^b	λ –	O ₂ Vol-%, d	mg/Nm ³ , STP, d, 13 % O ₂				
						CO	Org. C	NO _x	SO ₂	HCl
W	9,3	38,7	86	1,7 ± 0,03	8,9 ± 0,23	17 ± 5	0,5 ± 0,3	104 ± 1	2 ± 1	2 ± 0
W90WS10	9,2	37,5	85	1,8 ± 0,01	9,2 ± 0,09	6 ± 3	1,2 ± 1,1	147 ± 1	14 ± 2	7 ± 1
W75WS25	9,2	37,9	86	1,8 ± 0,05	9,4 ± 0,32	6 ± 2	0,6 ± 0,3	199 ± 2	24 ± 2	38 ± 2
W50WS50	9,4	37,9	87	1,8 ± 0,08	9,2 ± 0,49	5 ± 0	0,6 ± 0,2	262 ± 6	46 ± 0	87 ± 5
W50+WS50	9,6	38,4	87	1,7 ± 0,04	8,6 ± 0,36	54 ± 25	9,9 ± 6,8	229 ± 5	38 ± 0	54 ± 5
WS	9,6	35,0	84	1,9 ± 0,17	9,6 ± 1,01	16 ± 7	1,4 ± 0,4	364 ± 14	80 ± 1	118 ± 12
WS3,45K	10,4	37,4	84	1,7 ± 0,02	8,6 ± 0,17	97 ± 48	7,6 ± 3,8	298 ± 2	109 ± 1	171 ± 11
P	9,8	39,2	85	1,7 ± 0,04	8,6 ± 0,28	1389 ± 104	14,6 ± 2,2	215 ± 6	16 ± 15	< 1,1
P1,5K	11,8	41,9	78	1,7 ± 0,03	8,8 ± 0,25	886 ± 93	5,1 ± 1,7	261 ± 8	0 ± 0	< 1,1
P+1,5K	9,6	37,3	84	1,8 ± 0,03	9,2 ± 0,19	118 ± 9	3 ± 1	228 ± 3	5 ± 1	< 1,1
PC	9,4	37,5	87	1,8 ± 0,05	9,1 ± 0,34	355 ± 116	2,9 ± 1,2	230 ± 8	10 ± 0	< 1,1
PC+1,5K	10,4	40,9	84	1,8 ± 0,03	9,1 ± 0,18	47 ± 7	< 0,5	268 ± 4	0 ± 0	< 1,1
Sf	9,2	38,2	86	1,7 ± 0,02	8,4 ± 0,16	1935 ± 131	18,8 ± 4,1	255 ± 5	11 ± 2	< 1,1
Sf2,8K	9,2	36,3	84	1,7 ± 0,03	8,6 ± 0,25	607 ± 134	45,1 ± 11,9	290 ± 9	148 ± 1	13 ± 1
G	10,4	35,9	82	1,7 ± 0,01	8,6 ± 0,06	1715 ± 335	17 ± 9,1	371 ± 13	24 ± 13	< 1,1
G8,1K	11,6	39,4	88	1,7 ± 0,01	8,4 ± 0,08	113 ± 27	2,6 ± 1	445 ± 8	285 ± 3	92 ± 11
G10,5K	12,0	38,9	88	1,7 ± 0,01	8,5 ± 0,05	88 ± 32	9,7 ± 7,5	468 ± 13	290 ± 5	227 ± 186

d: bezogen auf Trockensubstanz; STP: Standard Temperature and Pressure (0 °C, 1013 hPa); Mittelwert aus 30 min Messungen und Standardabweichung (vier Wiederholungen) im stationären Vollastbetrieb; ar „as received“ – d. h. bezogen auf jeweilige Feuchtsubstanz; b Mittelwert für stationären Vollastbetrieb über komplette Messdauer (8 h)

6.2 Gasförmige Emissionen

6.2.1 CO-Emissionen

Sowohl die CO-Emissionen der Holzpellets als auch der Mischungen aus Holz mit Weizenstroh liegen auf einem niedrigen Niveau (Abbildung 15), sie nehmen im Mittel mit

steigendem Weizenstrohanteil von 17 mg/Nm³ (W) auf 5 mg/Nm³ (W50WS50) signifikant ab ($p < 0,05$). In einer früheren Untersuchung am DBFZ (Zeng et al. 2016 [84]) mit einer baugleichen Feuerung hatten die CO-Emissionen bei einem Mischungsverhältnis von 50 m-% Weizenstroh mit 50 m-% Holz auf dem gleichen Niveau wie die dort untersuchten Holzpellets gelegen, und bei einem Mischungsverhältnis von 30 % Weizenstroh mit 70 % Holz deutlich niedriger.

Die Grenzwerte der 1. BImSchV bezüglich CO konnten mit den pelletierten Holz-Weizenstroh-Mischungen eingehalten werden. Wurden jedoch die bereits pelletierten Weizenstrohpellet mit Holzpellets vermischt (W50+WS50), stiegen die CO-Emissionen von 5 auf 54 mg/Nm³ signifikant ($p < 0,05$) an und wiesen zudem eine sehr hohe Messwertstreuung auf. Die Additivierung mit 3,45 m-% Kaolin führte verglichen mit den Mischungen (signifikant) und den Holzpellets (im Trend) zu höheren CO-Emissionen von 97 mg/Nm³.

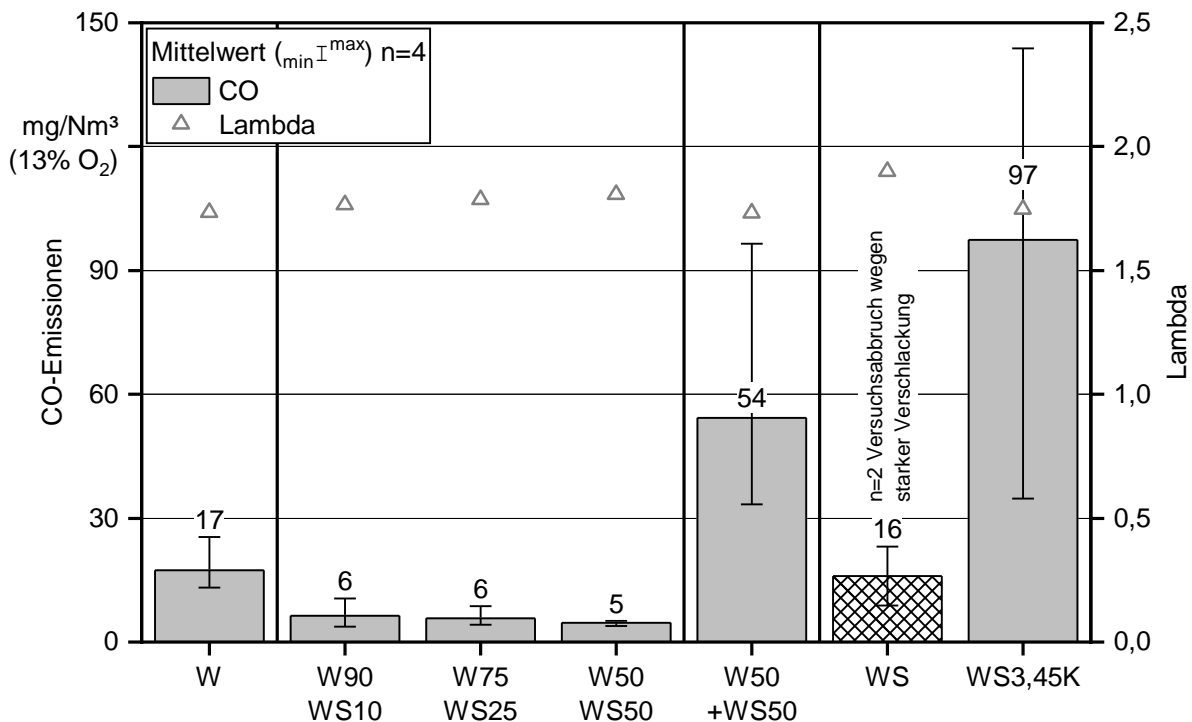


Abbildung 15: CO-Emissionen aller Brennstoffe mit Weizenstroh (WS) im Vergleich zu Holzpellets (W) im 30-kW-Kessel (Erläuterungen vgl. Tabelle 14)

Vergleicht man für die beiden Brennstoffe den in Abbildung 16 dargestellten CO-Konzentrationsverlauf über die gesamte Versuchsdauer, so fällt auf, dass sowohl die CO-Grundkonzentration als auch die Konzentrationsspitzen für die Pelletsmischung (W50+WS50) um ein Vielfaches höher sind. Diese Konzentrationsspitzen betragen für W50WS50 max. 300 ppm und treten während des gesamten Nennlastbetriebs über 8 h nur fünfmal auf (siehe Abbildung 16, schwarze Kurve). Bei Verwendung der gleichen Mischung aus reinen Holz- und reinen Strohpellets liegen die hohen CO-Peaks zwischen > 1.000 und 5.000 ppm und treten sechsmal auf, während niedrigere Peaks zwischen

150 und 1.000 ppm mindestens zweimal pro Stunde auftreten. Der direkte Kontakt der Rohmaterialien durch das Pelletieren scheint also notwendig zu sein, um die Verbrennung hinsichtlich der CO-Emissionen positiv zu beeinflussen. Als mögliche Ursache werden bei der Mischung der reinen Pellets lokale Schlackebildung (Strohpellets) vermutet, wodurch sich eventuell Strömungskanäle im Glutbett ausbilden, die sich ungünstig auf die CO-Emissionen auswirken. Leider kann aufgrund des Versuchsabbruchs für reines Weizenstroh keine Aussage darüber getroffen werden, ob sich das Mischen der pelletierten Brennstoffe evtl. sogar negativ auf die CO-Emissionen auswirkt.

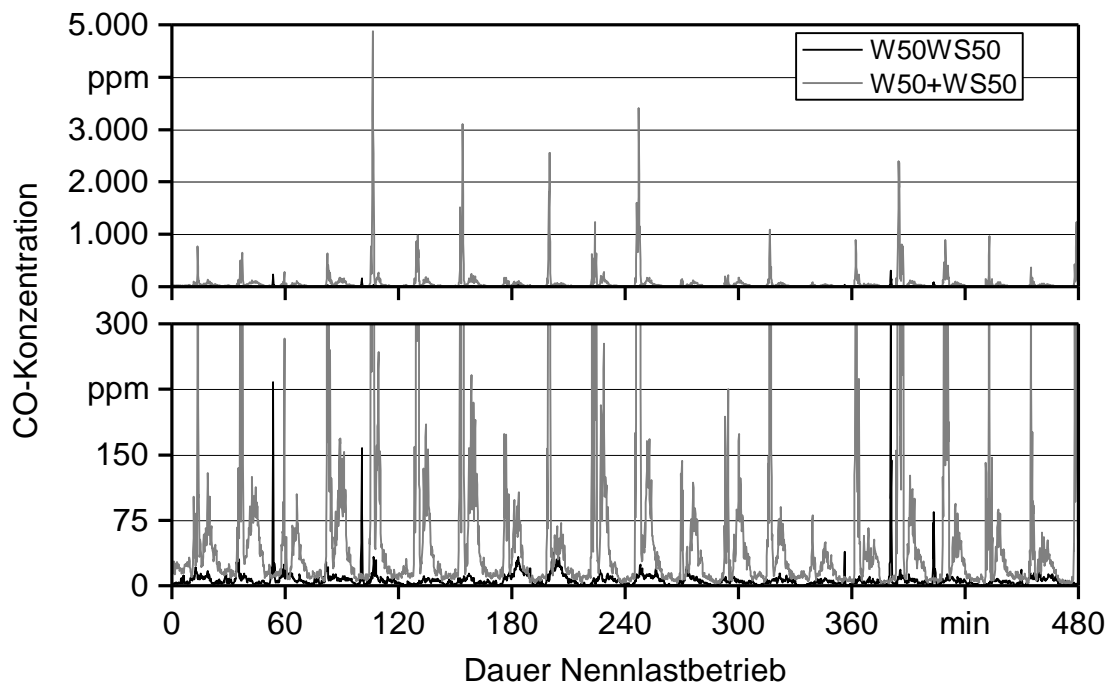


Abbildung 16: Vergleich des CO-Konzentrationsverlaufs von W50WS50 und W50+WS50 von 0 bis 5.000 ppm (oben) und 0 bis 300 ppm (unten)

Die Verbrennung reiner Papppellets verursachte die für Kleinfeuerungsanlagen mit diesem Brennstoff typischen hohen CO-Emissionen (vgl. [61]), die bei durchschnittlich 1.389 mg/Nm^3 lagen (Abbildung 17). Diese liegen deutlich über dem Grenzwert von 400 mg/Nm^3 der 1. BImSchV. Durch Additivierung (vor der Pelletierung) mit 1,5 m-% Kaolin lassen sich die CO-Emissionen auf 118 mg/Nm^3 und damit um 92 % signifikant ($p < 0,05$) absenken. Die Zugabe von 1,5 m-% Kaolin nach dem Pelletieren (P+1,5K) führt hingegen zu einer geringeren Absenkung, jedoch ist sie mit 355 mg/Nm^3 immer noch signifikant ($p < 0,05$) niedriger (d. h. -74 %) als bei Pellets ohne Kaolin. Bei der Verbrennung der Pappelhackschnitzel betragen die CO-Emissionen 886 mg/Nm^3 und lagen somit signifikant ($p < 0,05$) niedriger als bei den reinen Papppellets, die aus dem gleichen Ausgangsmaterial hergestellt worden waren. Hier könnte sich ausgewirkt haben, dass der Guntamatic PowerChip 20/30 als Hackschnitzelkessel auf diese Brennstoffform optimiert ist. Durch die Zugabe von ca. 1,5 m-% Kaolin über die Schnecke der

Brennstoffzufuhr reduzierten sich die CO-Emissionen signifikant ($p < 0,05$) auf 47 mg/Nm^3 und damit um 95 % verglichen mit reinen Pappelhackschnitzeln. Somit konnten sowohl für Pappelpellets als auch für Pappelhackschnitzel die CO-Emissionen durch Additivierung vor der Pelletierung und durch einfache Zugabe von Kaolin vor der Verbrennung unter den Grenzwert von 400 mg/Nm^3 (Stufe 2 der 1. BImSchV) verringert werden.

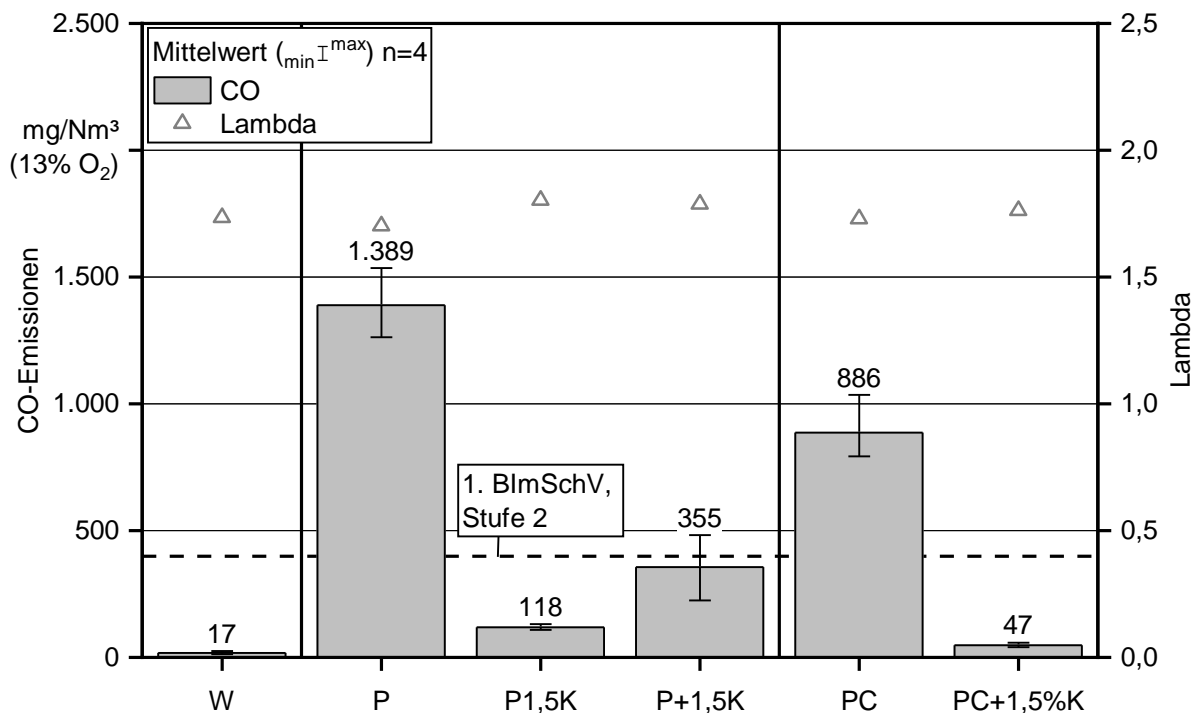


Abbildung 17: CO-Emissionen aller Brennstoffe aus Pappel im Vergleich zu Holzpellets (W) (Erläuterungen vgl. Tabelle 14)

Die CO-Emissionen reiner Sonnenblumenspelzenpellets mit 1.935 mg/Nm^3 und reiner Graspellets mit 1.715 mg/Nm^3 fielen nochmals höher aus als die für die Verbrennung reiner Pappelpellets. Durch die Additivierung mit Kaolin ließen sich die CO-Emissionen für Sf2,8K auf 607 mg/Nm^3 signifikant ($p < 0,05$) senken und lagen damit knapp oberhalb des Grenzwerts der Stufe 2 der 1. BImSchV. Für die additivierten Graspellets verringerten sich die CO-Emissionen signifikant ($p < 0,05$) auf 113 mg/Nm^3 für G8,1K bzw. auf 88 mg/Nm^3 für G10,5K, was einer Reduktion von mehr als 90 % entspricht.

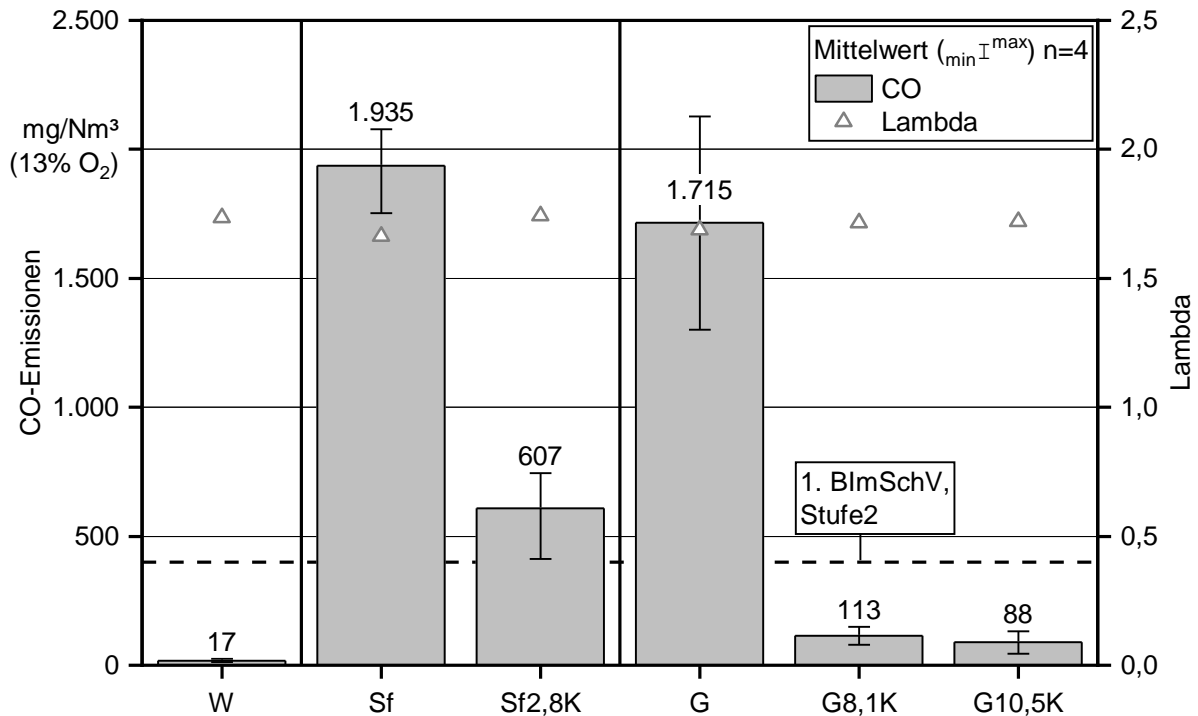


Abbildung 18: CO-Emissionen aller Brennstoffe aus Sonnenblumenspelzen und Gras im Vergleich zu Holzpellets

Der Grund für diese drastische CO-reduzierende Wirkung des Kaolins ist noch nicht abschließend geklärt. Ähnliche Beobachtungen wurden schon von anderen Forschern beschrieben (Topfbrenner, Getreidefeuerung, bewegter Treppenrost) [6] [82] [2]. Lediglich in einer Veröffentlichung wurden erhöhte CO-Emissionen beschrieben (Getreidefeuerung) [79]. Eine mögliche Erklärung könnte ein katalytischer Effekt des Kaolins sein, da es in anderen Anwendungsgebieten (Synthese von 1,5-Benzodiazepin, fotokatalytische CO₂-Reduktion) bereits auch als Katalysator getestet wurde [60] [53]. Eine weitere denkbare Erklärung wäre möglicherweise der positive Effekt des Kaolins auf die Glutbettstruktur durch verringerte Schlackebildung, durch die die Porosität günstig beeinflusst wird. Hierdurch werden eventuell weniger Luftzuführungen blockiert und es könnte somit eine gleichförmigere Sauerstoffverteilung im Brennraum erreicht werden.

6.2.2 Org.-C-Emissionen

Die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen (Org.-C) der Holzpellets und Holz-Weizenstroh-Mischungen lagen auf dem sehr niedrigen Niveau von unter 1,2 mg/Nm³ (Abbildung 19). Für die Org.-C-Emissionen der Mischung aus Weizenstrohpellets und Holzpellets (W50+WS50) zeigte sich wie auch schon für CO ein signifikanter ($p < 0,05$) Anstieg auf 9,9 mg/Nm³ gegenüber W50WS50, mit einer sehr hohen Streuung (siehe Tabelle 20). Die Additivierung von Weizenstroh mit Kaolin führte im Trend (nicht signifikant) auch zu einem Anstieg der Org.-C-Emissionen auf durchschnittlich 7,6 mg/Nm³.

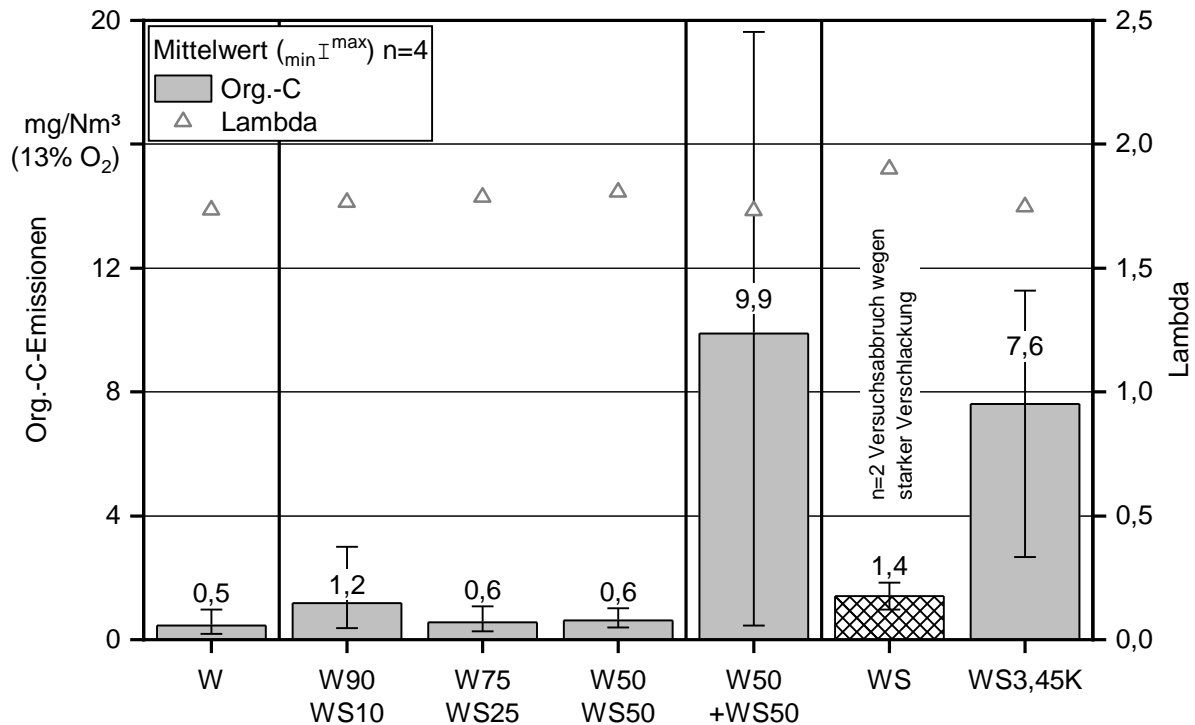


Abbildung 19: Org.-C-Emissionen aller Brennstoffe aus Weizenstroh im Vergleich zu Holzpellets

Bei der Verbrennung von reinen Pappelpellets wurden durchschnittlich 14,6 mg/Nm³ Org.-C freigesetzt. Im Gegensatz dazu führte eine Verbrennung reiner Pappelhack-schnitzel zu einer signifikant ($p < 0,05$) geringeren Org.-C-Bildung von 5,1 mg/Nm³. Somit bestätigt sich hier auch die schon bei den CO-Emissionen gemachte Beobachtung.

Die Additivierung mit Kaolin führte bei den Pappelbrennstoffen in allen Fällen zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen. Hierbei ist die Art der Kaolinzugabe, d. h. ob vor oder nach dem Pelletieren, offenbar irrelevant, denn in beiden Fällen konnten die Org.-C-Emissionen signifikant auf ca. 3 mg/Nm³ verringert werden.

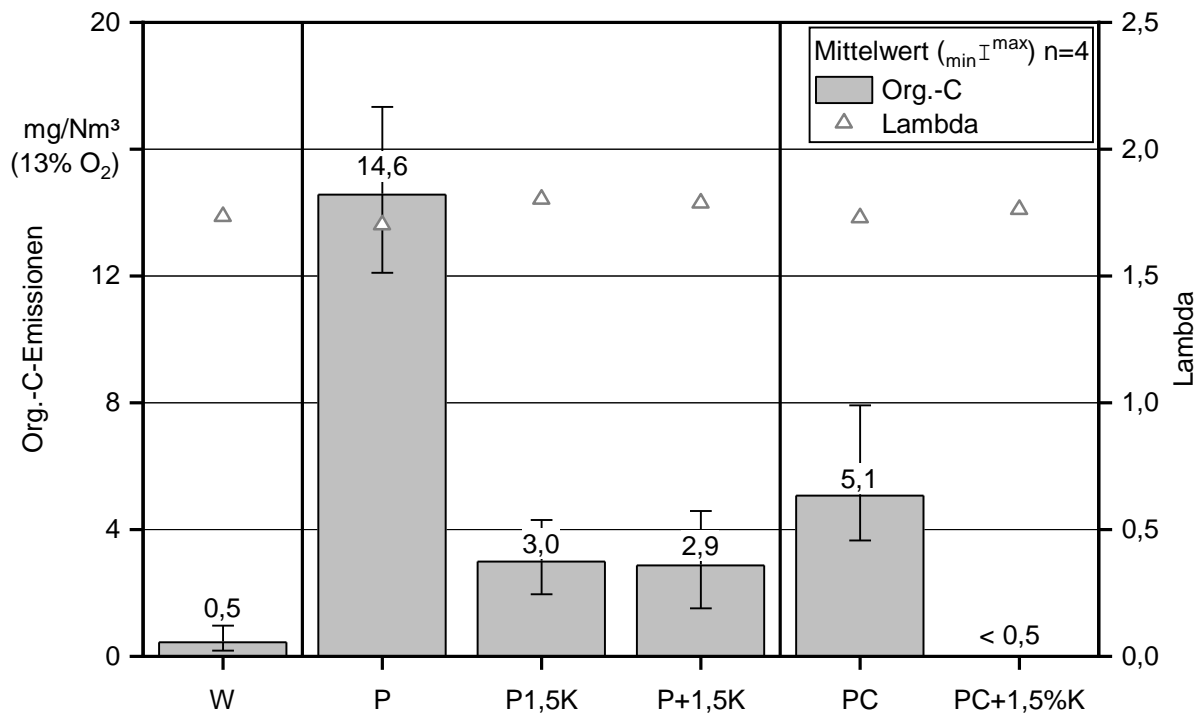


Abbildung 20: Org.-C-Emissionen aller Brennstoffe aus Pappel im Vergleich zu Holzpellets

Bei der Verbrennung reiner Sonnenblumenspelzenpellets und reiner Graspellets wurden ca. 18 mg/Nm^3 an Org.-C-Emissionen freigesetzt. Durch die Additivierung der Sonnenblumenspelzen erhöhten sich die Org.-C-Emissionen signifikant ($p < 0,05$) auf 45 mg/Nm^3 . Bei den Graspellets reduzierten sich die Org.-C-Emissionen im Trend um 85 % für die Additivierungsstufe mit 8,1 m-% Kaolin und um 43 % mit 10,5 m-% Kaolin.

Ein einheitlicher Trend durch Additivzugabe konnte bei den Org.-C-Emissionen nicht identifiziert werden. Außerdem wiesen die Emissionen organischer Kohlenwasserstoffe von reinem Gras und G10,5K eine wesentlich höhere Streuung auf als bei G8,1K.

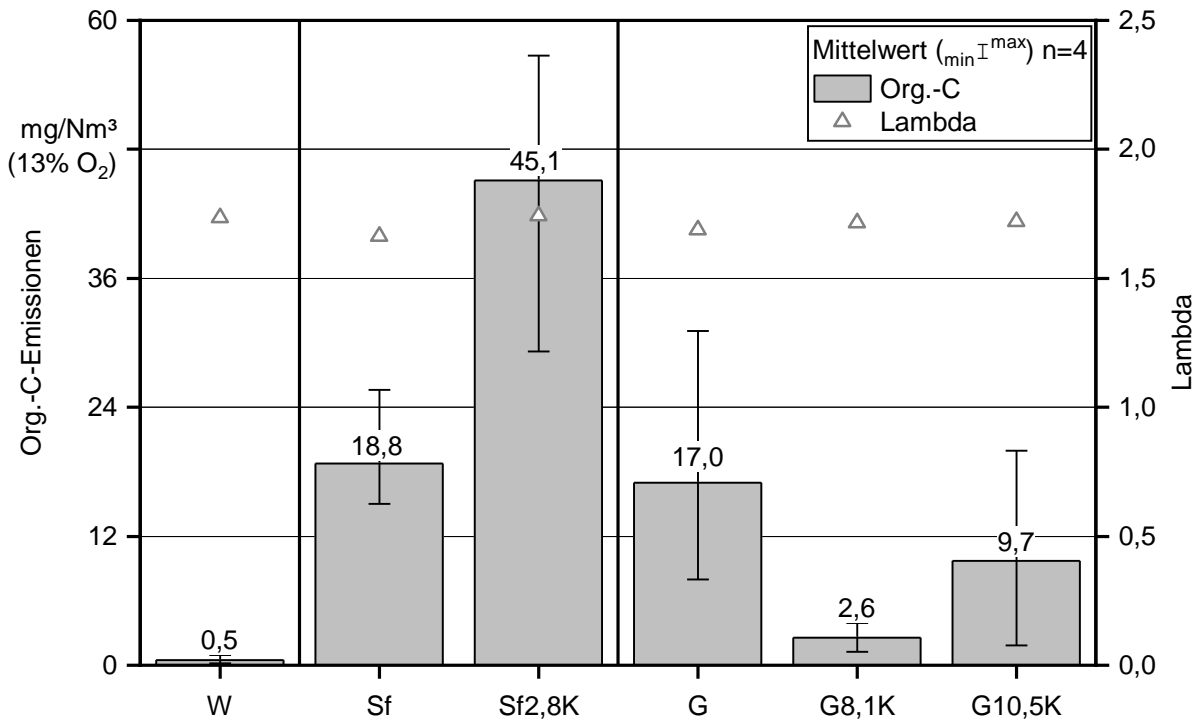


Abbildung 21: Org.-C-Emissionen aller Brennstoffe aus Sonnenblumenspelzen und Gras im Vergleich zu Holzpellets

6.2.3 NO_x-Emissionen

Vergleicht man die NO_x-Emissionen der untersuchten Brennstoffe unter Berücksichtigung des jeweiligen Brennstoffstickstoffgehalts (Abbildung 22), zeigt sich für die reinen Brennstoffe ein Anstieg der NO_x-Emissionen mit zunehmendem Brennstoffstickstoffgehalt bis zu reinen Sonnenblumenspelzenpellets mit einem Stickstoffgehalt von 0,6 m-%. Danach scheint der Anstieg der NO_x-Emissionen bis zu reinen Graspellets mit einem Stickstoffgehalt von 2,5 m-% flacher zu werden. Dies liegt daran, dass mit zunehmendem Stickstoffgehalt im Brennstoff die Konversionsrate von Stickstoff zu NO_x abnimmt [71]. Die reinen Weizenstrohpellets mit einem Stickstoffgehalt von 0,4 m-% weichen hier bedingt durch die Verschlackung und damit ungünstigen Verbrennungsbedingungen stark nach oben ab.

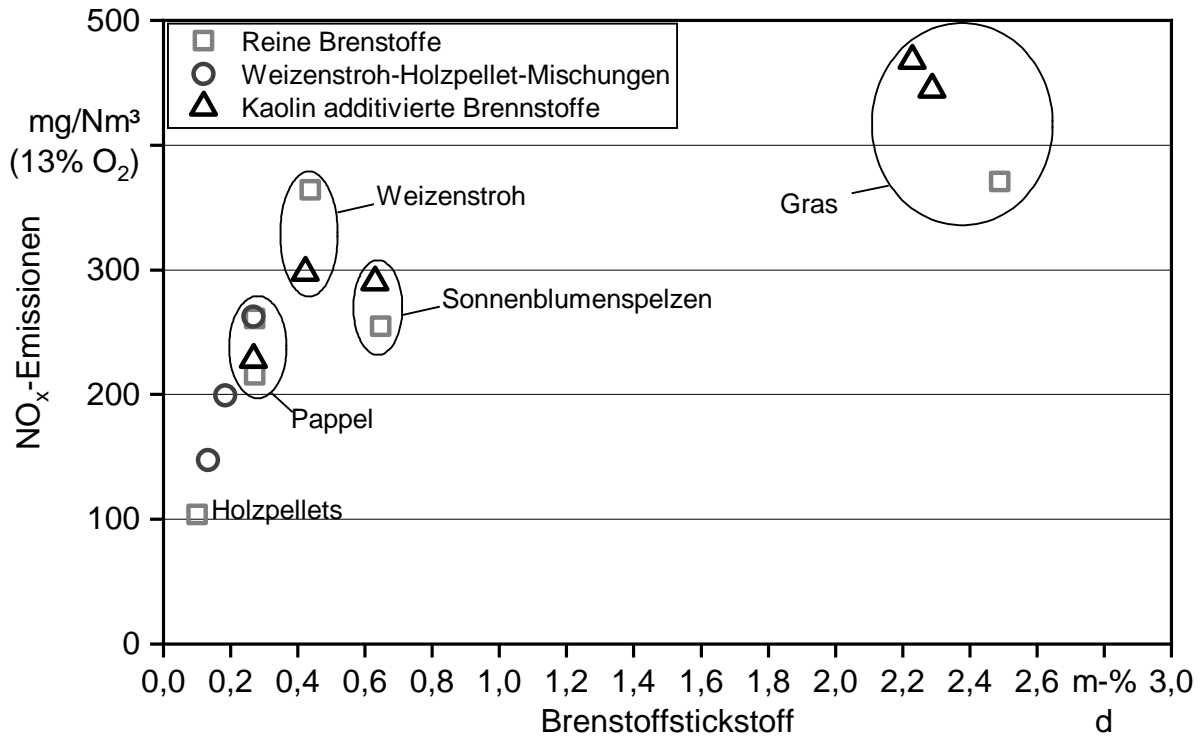


Abbildung 22: Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom Brennstoffstickstoffgehalt der untersuchten Brennstoffe

Erwartungsgemäß sinken die NO_x-Emissionen mit steigendem Holzanteil bei den Weizenstroh-Holzpellet-Mischungen (Abbildung 23) aufgrund der Verdünnung des Brennstoffstickstoffs. Interessanterweise liegen die NO_x-Emissionen der Pelletsmischung W50+WS50 (Mischung nach dem Pelletieren) um ca. 13 % signifikant niedriger als für die Mischung W50WS50, bei der die gemahlene Brennstoffe vor dem Pelletieren vermischt wurden. Bei den Weizenstrohpellets führte die Additivierung mit Kaolin zu einer Reduzierung (nicht signifikant, da für WS nur n = 2) der NO_x-Emissionen, allerdings sind aufgrund der extremen Verschlackung bei den reinen Weizenstrohpellets die Verbrennungsbedingungen nicht vergleichbar.

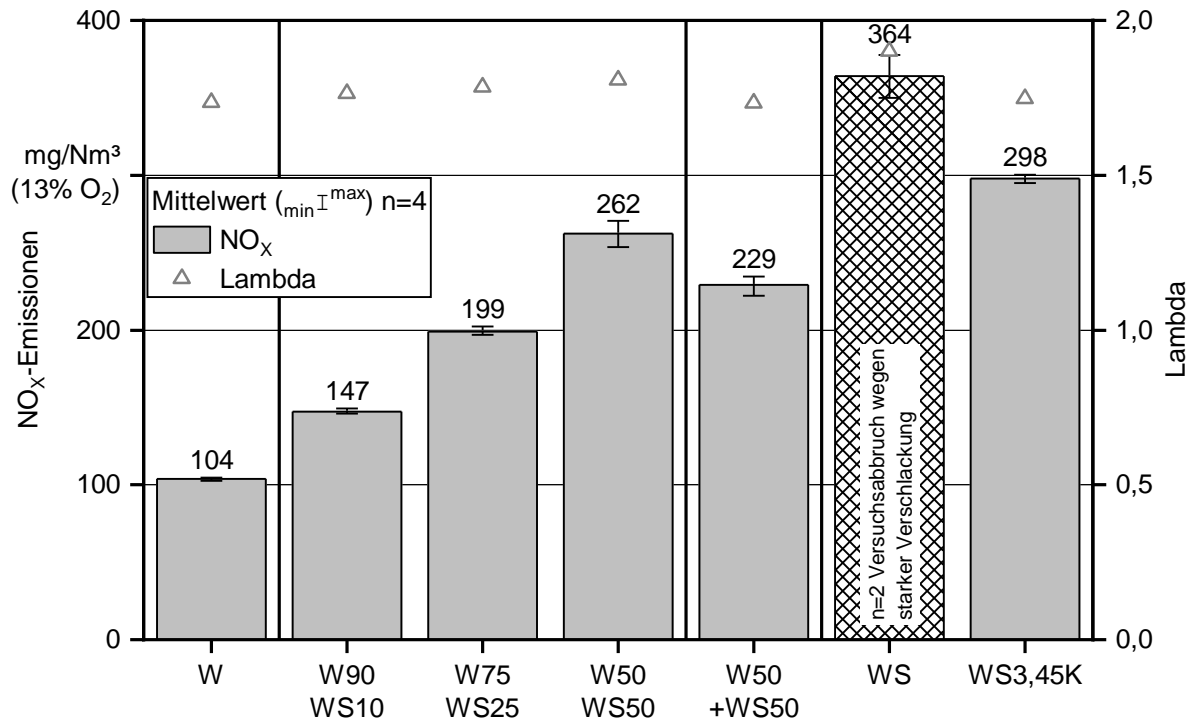


Abbildung 23: NO_x-Emissionen aller Brennstoffe aus Weizenstroh im Vergleich zu Holzpellets

Für alle additivierten Brennstoffe außer Weizenstroh (siehe Abbildung 22) liegen die NO_x-Emissionen (teilweise im Trend, teilweise signifikant) etwas höher als für die reinen Brennstoffe, außer bei den Pappelhackschnitzeln. Bei der Verbrennung reiner Pappel pellets werden 215 mg/Nm³ NO_x emittiert, während bei Hackschnitzeln aus dem gleichen Pappelmaterial mit 261 mg/Nm³ signifikant höhere NO_x-Emissionen auftreten. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die bei Hackschnitzeln höhere Brennraumbelastung, also das im Brennraum befindliche Brennstoffvolumen im Verhältnis zum Brennraumvolumen sein [58]. In der Praxis wird bei einer höheren Brennraumbelastung häufig ein Anstieg der NO_x-Emissionen beobachtet (z. B. im Vergleich von Volllast und Teillast). Für Pappel pellets steigen die NO_x-Emissionen durch die Zugabe von 1,5 m-% Kaolin im Trend um 13 mg/Nm³ bei anschließender Pelletierung und um 15 mg/Nm³, wenn das Kaolin nach der Pelletierung hinzudosiert wird (Abbildung 24).

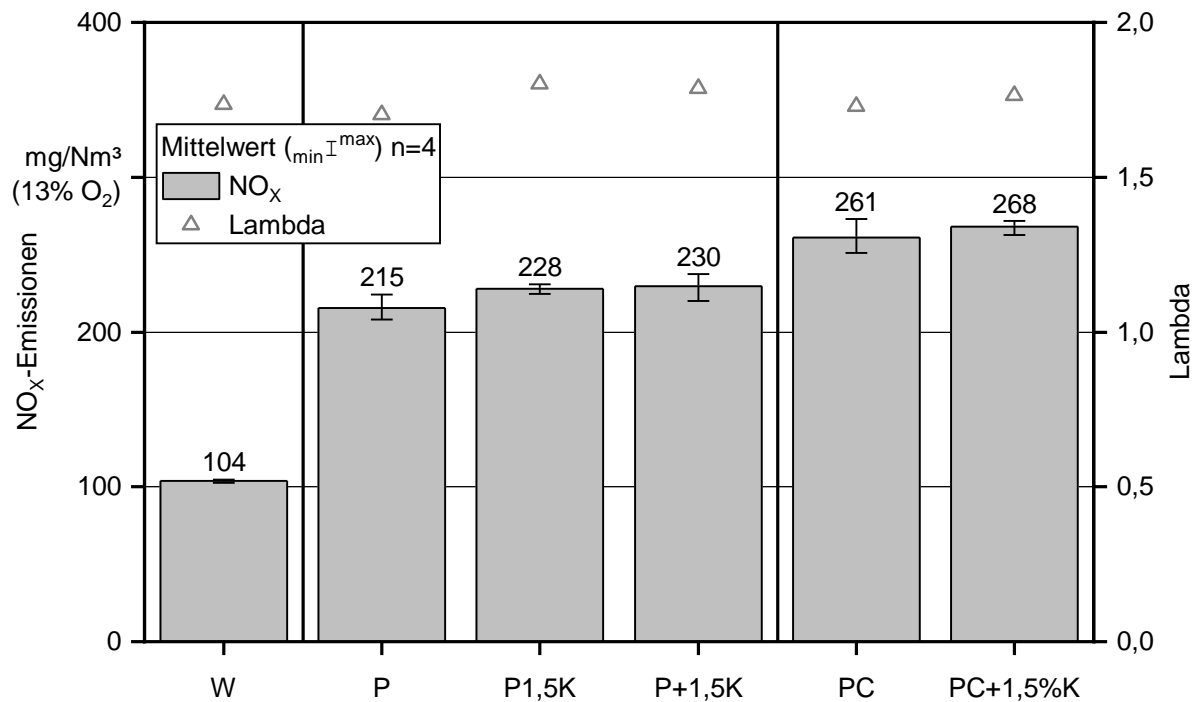


Abbildung 24: NO_x-Emissionen aller Brennstoffe aus Pappel im Vergleich zu Holzpellets

Für die Sonnenblumenspelzenpellets (Abbildung 25) steigen die NO_x-Emissionen durch die Zugabe von 2,8 m-% Kaolin signifikant von 255 auf 290 mg/Nm³. Am stärksten steigen die NO_x-Emissionen bei den Graspellets, die gleichzeitig auch den höchsten Stickstoffgehalt (2,5 m-%) im Brennstoff aufweisen. Bei einer Zugabe von 8,1 m-% Kaolin steigen hier die NO_x-Emissionen signifikant von 371 auf 445 mg/Nm³ und bei 10,5 m-% sogar signifikant auf 468 mg/Nm³.

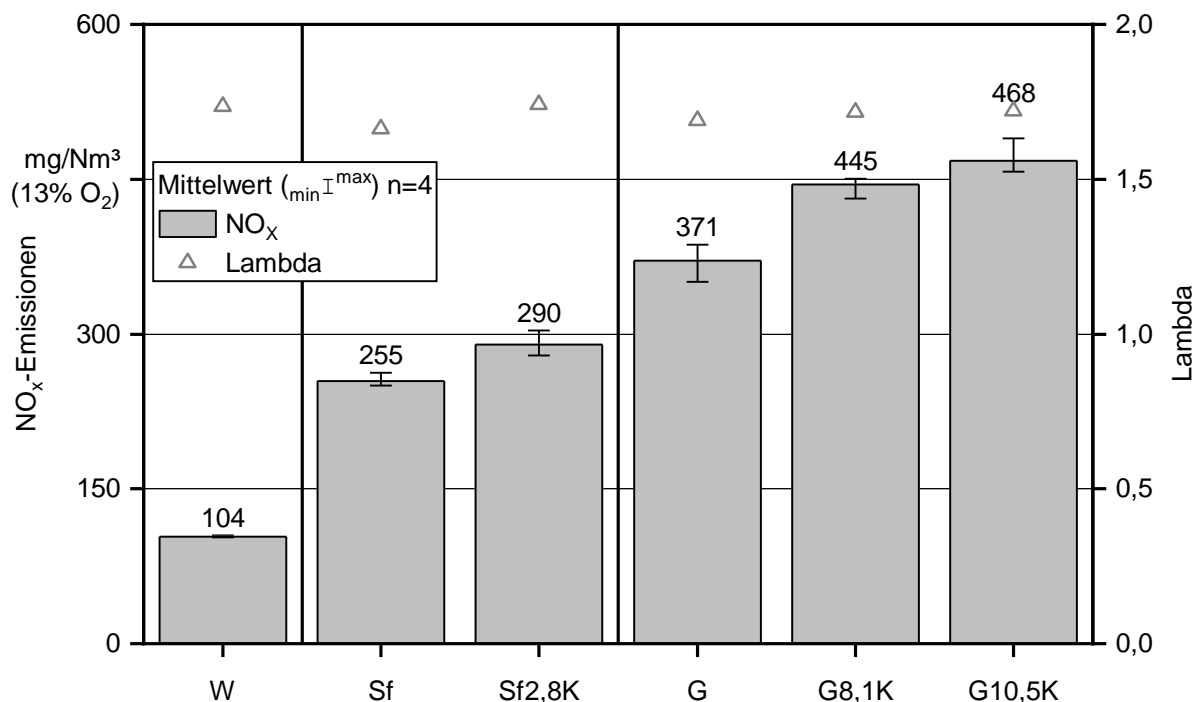


Abbildung 25: NO_x-Emissionen aller Brennstoffe aus Sonnenblumenspelzen und Gras im Vergleich zu Holzpellets

Dieser Anstieg der NO_x-Emissionen wurde auch in der Literatur [82] [2] sowie in einem vorangegangenen Projekt am TFZ bei Kaolin-additiven Buchenpellets beobachtet. In einer anderen Untersuchung von Sereika et al. [75] ließ sich ein Zusammenhang zwischen den CO-Emissionen und den NO_x-Emissionen nachweisen. Dabei sanken die NO_x-Emissionen bei steigenden CO-Emissionen. Daher könnte eine mögliche Erklärung für den Anstieg der NO_x-Emissionen in der starken CO-Minderung bei den additiven Brennstoffen, aber auch im Vergleich von W50WS50 und W50+WS50 liegen. Als Mechanismus hierfür kommen stickstoffverbrauchende Reaktionen (Formeln (6.1)–(6.4)) infrage [58]. Ist weniger CO verfügbar, kann nach dieser Reaktion weniger NO zu N₂ reduziert werden.





Der Grenzwert für die NO_x-Emissionen gemäß der 1. BImSchV (siehe Unterkapitel 2.3) für nicht holzartige Biomasse in Kleinfeuerungsanlagen bis 100 kW liegt bei 500 mg/Nm³ und kann somit mit allen hier untersuchten Brennstoffen eingehalten werden. Den Grenzwert des Referentenentwurfs der 44. BImSchV von umgerechnet 400 mg/Nm³ bei der Verbrennung nicht holzartiger Biomasse in Anlagen mit 100 kW bis 1 MW lässt sich mit allen Brennstoffen außer den reinen Graspellets einhalten. Hier liegt reines Gras mit 371 mg/Nm³ noch knapp unterhalb des Grenzwerts. Die additvierten Graspellets überschreiten mit 445–468 mg/Nm³ allerdings den Grenzwert.

6.2.4 HCl und SO₂-Emissionen

Sind im Brennstoff ausreichende Mengen an Schwefel und Chlor vorhanden, so würden die Emissionen an HCl (Abbildung 26) bzw. SO₂ (Abbildung 27) durch eine Additivierung mit Kaolin signifikant ansteigen (siehe Tabelle 20 in Unterkapitel 6.1). Dies zeigte sich vor allem für die Brennstoffe Sf2,8K und G8,1K sowie G10,5K. Der Anstieg der HCl- und SO₂-Emissionen lässt sich durch die Wirkungsweise des Kaolins (siehe Unterkapitel 2.3) erklären. Durch die Einbindung des Kaliums aus dem Brennstoff in die Asche in Form von Kalium-Aluminium-Silikaten bewirkt die Additivierung, dass für den Schwefel und das Chlor nunmehr kein – oder nur noch wesentlich weniger – Kalium zur Verfügung steht, um zu festem KCl und K₂SO₄ zu reagieren [6]. Folglich entweichen diese Elemente nun als gasförmige Schadstoffe.

Der geplante Grenzwert nach dem Referentenentwurf der 44. BImSchV (siehe Unterkapitel 2.5) für Anlagen von > 100 kW bis < 20 kW läge umgerechnet bei 107 mg/Nm³ für SO₂ und bei 16 mg/Nm³ für HCl. Demnach wären die Brennstoffe WS3,45K, Sf2,8K, G8,1K und G10,5K problematisch hinsichtlich der SO₂-Emissionen. Die Brennstoffe W75WS25, W50WS50, W50+WS50, WS, WS3,45K, G8,1K und G10,5K wären problematisch hinsichtlich der HCl-Emissionen. Für Anlagen < 100 kW ist derzeit kein Grenzwert für SO₂ und HCl vorgesehen.

Bei Betrachtung des S/Cl-Verhältnisses (siehe Unterkapitel 2.4) dürfte eine Additivierung mit Kaolin keinen Einfluss auf die Hochtemperaturkorrosion haben. Dies steht allerdings im Widerspruch mit dem hier beobachteten Anstieg der SO₂- und HCl-Emissionen mit additvierten Brennstoffe aus Gras und Sonnenblumenspelzen.

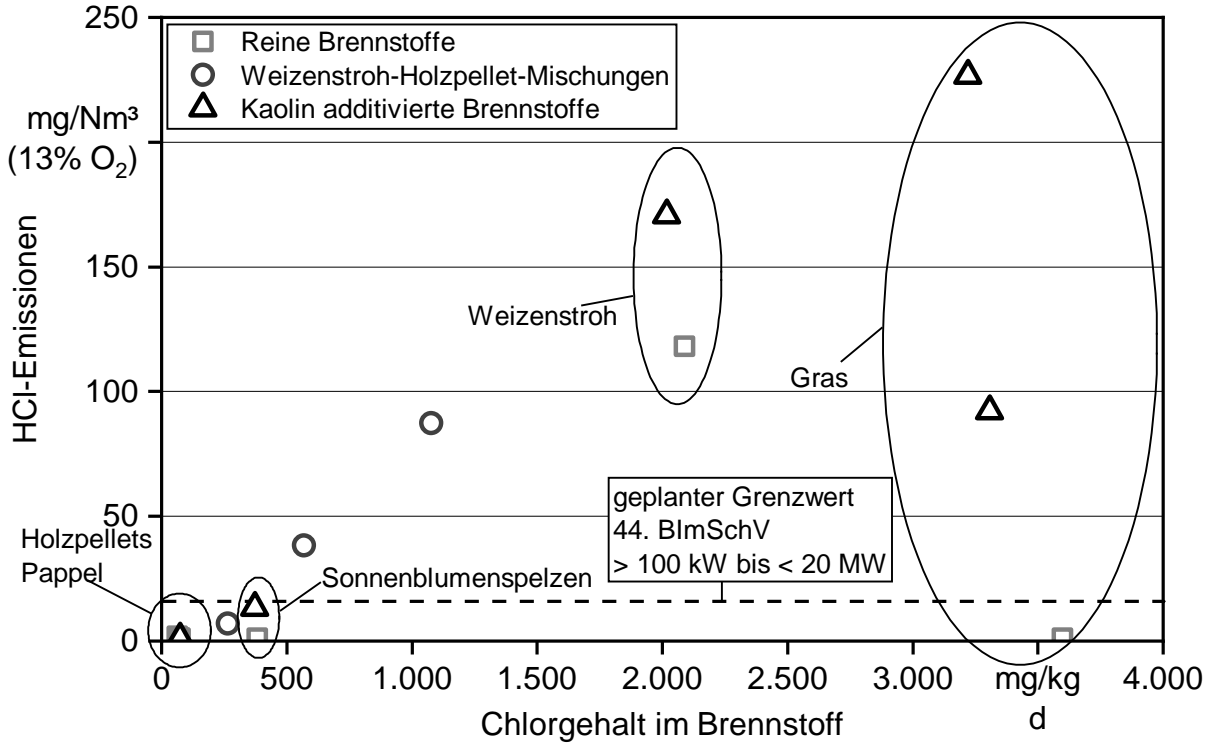


Abbildung 26: HCl-Emissionen der untersuchten Brennstoffe in Abhängigkeit vom Chlorgehalt im Brennstoff und von den Additivierungsstufen

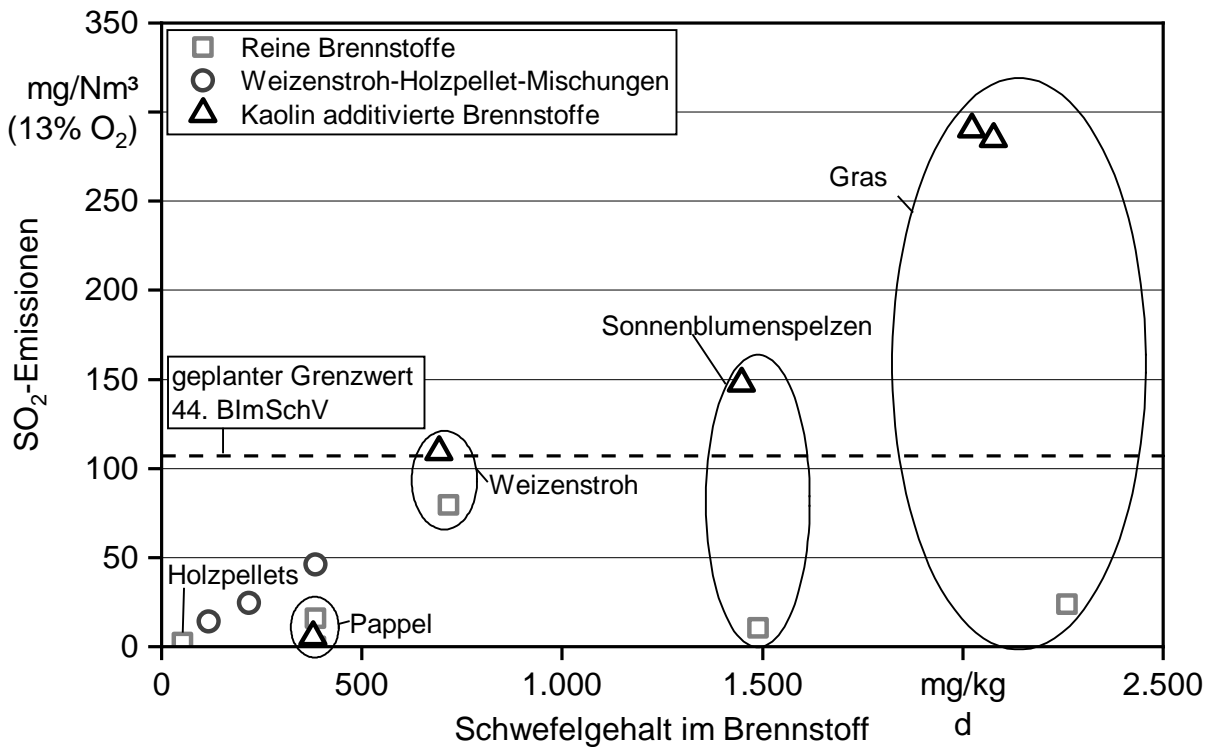


Abbildung 27: SO₂-Emissionen der untersuchten Brennstoffe in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff und von den Additivierungsstufen

6.3 Partikelförmige Emissionen

6.3.1 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen wurden gravimetrisch bestimmt und lagen bei den Holzpellets mit 24 mg/Nm^3 (Abbildung 28) knapp über dem Grenzwert der 2. Stufe der 1. BImSchV von 20 mg/Nm^3 (holzartige und nicht holzartige Biomasse) und damit auch über den für größere Feuerungen gültigen Grenzwerten (siehe Unterkapitel 2.5). Die Mischpellets aus 10 m-% Weizenstroh mit 90 m-% Holz erzeugten die gleichen Gesamtstaubemissionen wie die reinen Holzpellets. Mit höheren Strohanteilen stiegen die Gesamtstaubemissionen signifikant auf 35 mg/Nm^3 für W75WS50 bzw. 42 mg/Nm^3 für W50WS50 an.

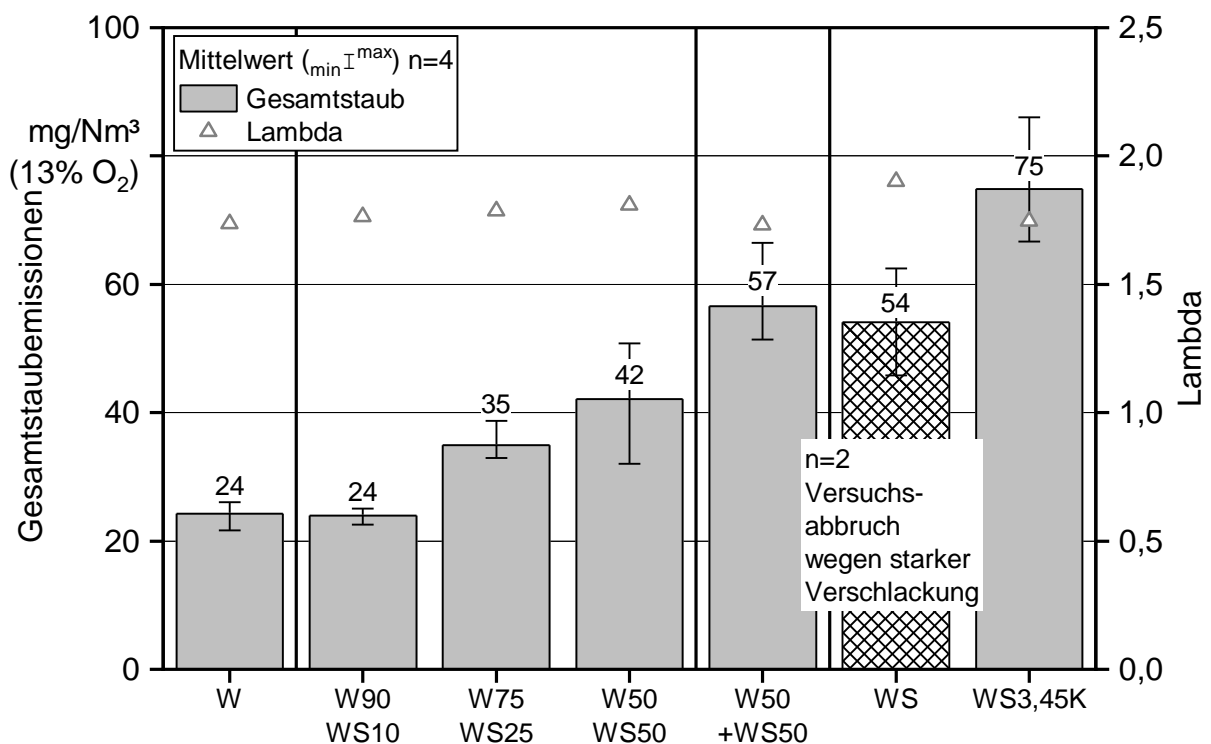


Abbildung 28: Gesamtstaubemissionen der Weizenstrohbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets (W)

Wie schon bei den CO-Emissionen zeigte sich auch für die Gesamtstaubemissionen ein signifikanter Unterschied zwischen der pelletierten Mischung W50WS50 und der Mischung der Pellets W50+WS50. Im Vergleich stiegen hier die Gesamtstaubemissionen um ca. 36 % an. Die höchsten Gesamtstaubemissionen bei den Weizenstrohbrennstoffen wurden für die mit Kaolin additivierte Weizenstrohpellets mit 75 mg/Nm^3 gemessen. Allerdings war hier ein direkter Vergleich mit reinem Weizenstroh wegen der extremen Verschlackung in dem Versuch mit 100 % Strohpellets nicht möglich. Hinsichtlich der Gesamtstaubemissionen schnitten die Mischungen aus Holz und Weizenstroh dennoch besser ab. Der positive Einfluss einer Zumischung von Holz zu Weizenstroh hinsichtlich der gasförmigen Emissionen und der Gesamtstaubemissionen wurde auch von Zeng et

al. [84] beobachtet. Im Vergleich mit den reinen Weizenstrohpellets konnten die Versuche mit allen Mischungen und den additivierten Weizenstrohpellets über die komplette Versuchsdauer von 8 h Volllastbetrieb störungsfrei durchgeführt werden.

Im Gegensatz zu Weizenstroh zeigte sich für die Pappelbrennstoffe eine erhebliche Reduktion der Gesamtstaubemissionen durch die Additivierung mit Kaolin (Abbildung 29). Die Gesamtstaubemissionen der reinen Pappelpellets lagen mit 156 mg/Nm^3 auf einem hohen Niveau und entsprechen dem 6,5-fachen Wert, der für normkonforme Holzpellets gemessen wurde. Bei der Additivierung mit anschließender Pelletierung (P1,5K) ließen sich die Gesamtstaubemissionen signifikant auf nur noch 46 mg/Nm^3 (P1,5K) und damit um ca. 71 % reduzieren. Eine nachträgliche Additivierung der Pappelpellets (P+1,5K) war dagegen nicht ganz so wirksam, dennoch betragen die Gesamtstaubemissionen nur noch 69 mg/Nm^3 und lagen immer noch um ca. 56 % (signifikant) niedriger als bei reinen Pappelpellets. Bei der Verwendung reiner Pappelhackschnitzel lagen die Gesamtstaubemissionen bei 179 mg/Nm^3 und damit in einer bei Kleinanlagen für diesen Brennstoff bereits bekannten Größenordnung [61]. Ebenfalls fällt auf, dass die Gesamtstaubemissionen der Pappelhackschnitzel (PC) signifikant höher ausfallen als bei der Verbrennung der reinen Pappelpellets (P). Durch die Zugabe von 1,5 m-% Kaolin (PC+1,5K) über die Brennstoffförderschnecke konnten die Gesamtstaubemissionen auf 101 mg/Nm^3 signifikant gesenkt werden. Möglicherweise könnten die Gesamtstaubemissionen der Pappelhackschnitzel durch Zugabe von mehr Kaolin weiter gesenkt werden, da die über die Taktung der Dosierschnecke zugegebene Menge eventuell etwas unter den angestrebten 1,5 m-% lag und es durch Ablagerung des Kaolins auch zu Verlusten während der Brennstoffzufuhr zum Kessel kommen kam.

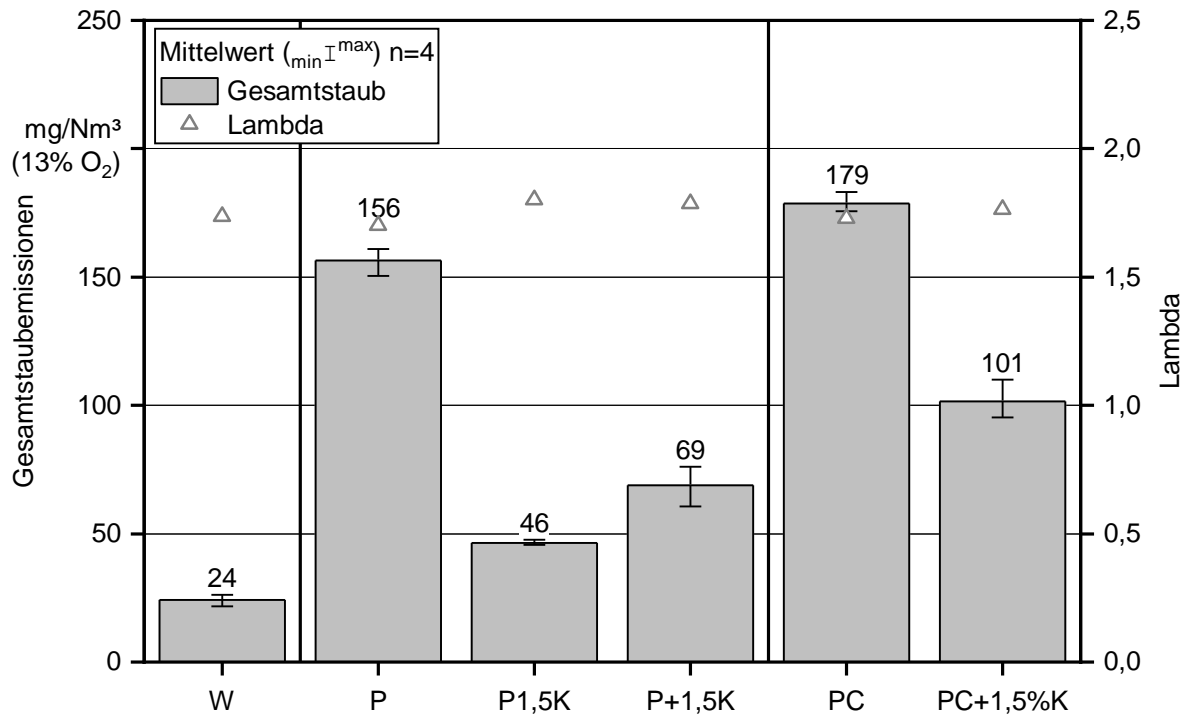


Abbildung 29: Gesamtstaubemissionen der Pappelbrennstoffe im Vergleich zu Holzpellets (W)

Die in Abbildung 30 für Sonnenblumenspelzen und Graspellets dargestellten Gesamtstaubemissionen liegen auf einem nochmals deutlich höheren Niveau als die für Pappel pellets. Die Gesamtstaubemissionen reiner Sonnenblumenspelzenpellets lagen bei 525 mg/Nm³ und konnten durch die Additivierung mit 2,8 m-% Kaolin auf 121 mg/Nm³ signifikant gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduzierung der Gesamtstaubemissionen von rund 77 %. Bei reinen Graspellets lagen die Gesamtstaubemissionen bei 854 mg/Nm³. Durch die Additivierung mit 8,1 m-% Kaolin ließen sich diese um 53 % auf 398 mg/Nm³ und um 62 % auf 326 mg/Nm³ bei der Additivierung mit 10,5 m-% Kaolin signifikant reduzieren. Hierdurch zeigt sich im Trend (nicht signifikant), dass trotz der bereits überstöchiometrischen Dosierung des Kaolins ein weiterer Effekt auf die Gesamtstaubemissionen durch noch höhere Kaolinmengen erzielt werden kann. Jedoch führt eine Additivzugabe zu höheren Aschegehalten und erhöht den Brennstoffpreis. Somit ist die Beimengung auch wirtschaftlich begrenzt.

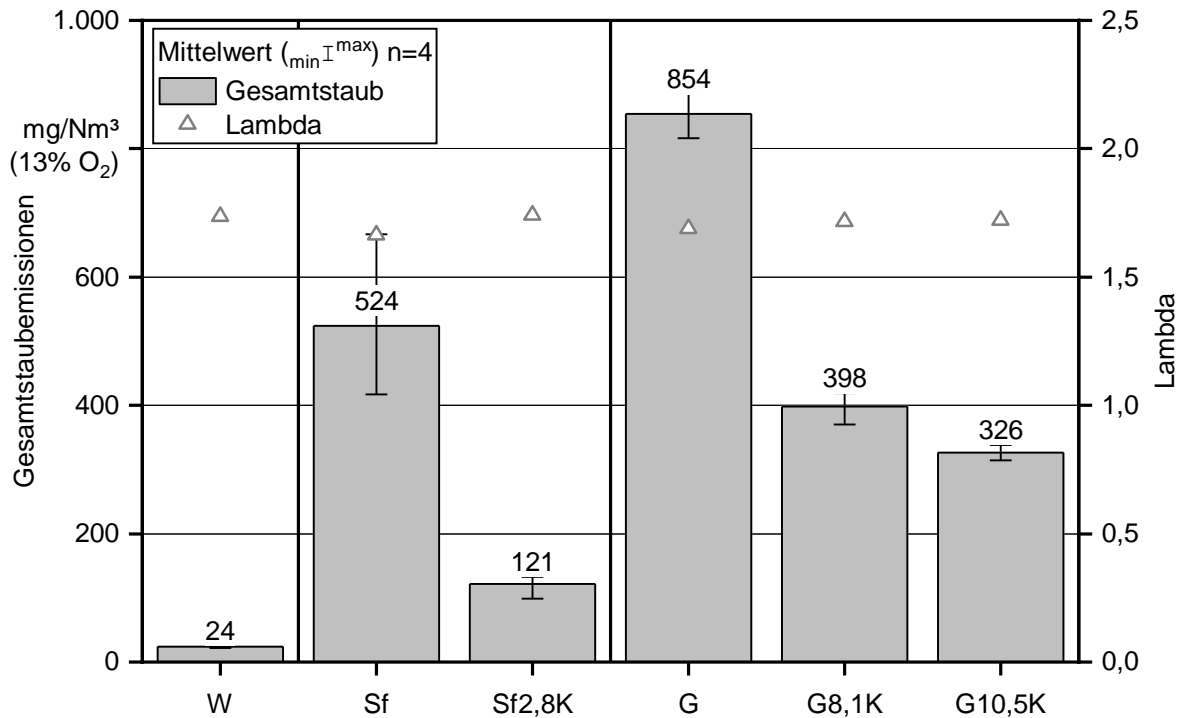


Abbildung 30: Gesamtstaubemissionen der Sonnenblumenspelzen- und Grasbrennstoffe im Vergleich zu Holzpellets (W)

Insgesamt liegen dennoch alle Gesamtstaubemissionen mit diesen beiden Brennstoffen oberhalb des Grenzwerts der 1. BImSchV von 20 mg/Nm^3 sowie derjenigen der zukünftigen 44. BImSchV. Demnach müsste zusätzlich z. B. ein Elektroabscheider nachgerüstet werden. Hinsichtlich der gasförmigen Emissionen sowie einer Entlastung des Elektroabscheiders bei derartig hohen Staubkonzentrationen wäre eine Kombination aus Additivierung und Elektroabscheider dennoch ein denkbarer Lösungsansatz, um Brennstoffe wie Pappel aus dem Kurzumtrieb in Kleinf Feuerungsanlagen nutzen zu können.

Insgesamt decken sich die Beobachtungen der Staubemissionen mit den Änderungen des molaren Cl/Si-Verhältnisses (Kaliumfreisetzung) in Unterkapitel 2.3.

6.3.2 Partikelgrößenverteilung und Partikelanzahl

Die Ergebnisse aus den Messungen zur gravimetrischen Partikelgrößenverteilung mit dem Kálmán Impaktor sind in Tabelle 21 bzw. die zur Anzahlverteilung mit dem ELPI+ in Tabelle 22 dargestellt. Aufgrund der niedrigen Stichprobenanzahl (Einzelmessungen) konnte für diese Untersuchungen keine statistische Auswertung durchgeführt werden. Daher kann bei den folgenden Ergebnissen keine Aussage zur Signifikanz getroffen werden.

Dabei zeigen die Werte für die Summe aller mit dem Kálmán gemessenen Fraktionen ähnliche Tendenzen wie die der Gesamtstaubmessungen. Allerdings konnte mit dem Kálmán Impaktor bei diesen Staubkonzentrationen nur über sehr kurze Zeitspannen (5–

10 min) parallel zur Staubmessung über 30 min gemessen werden, wodurch Abweichungen zustande kommen können. Generell zeigt sich für alle Brennstoffe, dass der Hauptteil der Gesamtstaubemissionen aus Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von $< 1 \mu\text{m}$, also der PM_{10} -Fraktion besteht. Die größeren Fraktionen machen hier, bis auf die Messungen mit Graspellets, lediglich einen sehr kleinen Teil aus. Bei Pappelhackschnitzeln mit Kaolin (PC+1,5K) scheinen sich durch die Zugabe des Kaolin die groben Fraktionen zu erhöhen, während die PM_{10} -Fraktion abnimmt.

Tabelle 21: Gravimetrische Partikelgrößenverteilung gemessen mit dem Kálmán Impaktor

	$< 1 \mu\text{m}$	1–2,5 μm	2,5–10 μm	$> 10 \mu\text{m}$	Summe	n
	mg/Nm ³ , 13 % O ₂ , 0 °C, 1013 hPa, d. b.					
W	18	4	0	0	22	2
W90WS10	15	1	0	1	17	2
W75WS25	26	0	1	0	27	2
W50WS50	30	1	1	1	33	2
W50+WS50	39	1	1	0	41	2
WS	33	1	1	0	35	1
WS3.45K	59	2	1	0	62	2
P	123	3	1	2	129	2
P1.5K	39	0	0	0	39	2
P+1.5K	59	1	2	0	62	2
PC	104	2	1	3	110	2
PC+1,5%K	51	6	11	11	79	2
Sf	354	5	6	0	365	2
Sf2.8K	89	0	0	0	89	1
G	800	23	20	10	853	2
G8.1K	378	11	6	2	397	2
G10.5K	285	5	4	2	296	2

Die Gesamtanzahl der Partikel (siehe Summe Tabelle 22) lag bei den Messungen zwischen $2,92 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ (G10.5K) und $1,27 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ für reines Gras (G). Die Anzahl der Partikel bei Holzpellets lag im Vergleich dazu bei $7,59 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$. Die Mischung von Holz und Weizenstroh zeigt hinsichtlich der gesamten Partikelanzahl keinen eindeutigen Effekt. Bis auf die Pappelhackschnitzel (hier waren die Messwerte gleichbleibend) zeigt sich durchweg für alle Brennstoffe eine Reduzierung der gesamten Partikelanzahl durch die Additivierung mit Kaolin.

Tabelle 22: Anzahlbezogene Partikelgrößenverteilung gemessen mit dem ELPI+

	9,1 nm	16,4 nm	25,2 nm	40,5 nm	69,0 nm	126,9 nm	229,6 nm	430,1 nm	731,3 nm	Summe*	n
	1/cm ³ ; 0 °C; 1013 hPa; d, b,										-
W	1,77E+06	2,48E+06	8,40E+06	2,18E+07	2,94E+07	1,05E+07	1,48E+06	0,00E+00	0,00E+00	7,59E+07	4
W90WS10	1,15E+06	1,88E+06	8,60E+06	3,54E+07	4,04E+07	1,48E+07	1,74E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,04E+08	4
W75WS25	3,08E+05	1,48E+06	6,19E+06	2,85E+07	3,87E+07	1,76E+07	2,92E+06	2,29E+03	0,00E+00	9,58E+07	4
W50WS50	0,00E+00	1,38E+06	4,74E+06	2,90E+07	4,32E+07	2,25E+07	4,14E+06	6,89E+04	0,00E+00	1,05E+08	4
W50+WS50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WS	0,00E+00	6,84E+05	2,76E+06	1,52E+07	3,73E+07	2,38E+07	8,76E+06	4,95E+05	0,00E+00	8,89E+07	2
WS3.45K	2,70E+06	3,44E+03	1,97E+06	1,10E+07	3,37E+07	2,47E+07	1,08E+07	6,67E+05	0,00E+00	8,55E+07	4
P	2,32E+05	1,10E+06	2,03E+06	1,88E+07	4,67E+07	4,28E+07	1,08E+07	1,42E+06	0,00E+00	1,24E+08	3
P1.5K	1,43E+06	3,85E+05	2,17E+06	1,28E+07	3,17E+07	2,02E+07	7,51E+06	3,65E+05	0,00E+00	7,66E+07	2
P+1.5K	1,37E+06	4,42E+05	1,68E+06	1,00E+07	3,41E+07	2,57E+07	8,63E+06	7,13E+05	0,00E+00	8,26E+07	4
PC	2,01E+06	6,24E+05	2,62E+06	1,02E+07	3,87E+07	3,76E+07	1,77E+07	1,81E+06	0,00E+00	1,11E+08	4
PC+1.5%K	2,02E+06	7,94E+05	3,64E+06	2,98E+07	4,59E+07	2,68E+07	7,02E+06	4,15E+05	0,00E+00	1,16E+08	2
Sf	1,57E+06	7,45E+04	3,86E+05	2,71E+06	2,36E+07	5,55E+07	3,22E+07	4,84E+06	4,53E+05	1,21E+08	1
Sf2,8K	6,03E+05	3,01E+05	2,09E+06	1,46E+07	3,17E+07	3,05E+07	2,04E+07	1,31E+06	6,38E+03	1,02E+08	4
G	2,29E+06	7,94E+04	7,42E+04	8,98E+05	1,31E+07	4,40E+07	5,52E+07	1,03E+07	1,18E+06	1,27E+08	1
G8.1K	1,70E+06	0,00E+00	3,11E+04	1,15E+04	2,38E+05	5,38E+06	3,49E+07	7,04E+05	1,37E+02	4,29E+07	1
G10.5K	2,33E+06	0,00E+00	0,00E+00	7,60E+04	6,72E+04	4,36E+06	2,17E+07	6,31E+05	1,66E+04	2,92E+07	1

* Summe von 9,1 nm bis 7,3 µm (die Tabelle zeigt nur 9,1–731,3 nm, da die anderen Fraktionen annähernd null Partikel beinhalten)

Betrachtet man die Partikelanzahlverteilung zu den Weizenstrohbrennstoffen innerhalb der PM₁-Fraktion (Abbildung 31) im Vergleich zu der von Holzpellets, so scheint der prozentuale Anteil der ultrafeineren Partikel, d. h. Partikel bis 100 nm, mit zunehmendem Strohanteil abzunehmen, während der Anteil an größeren Partikeln zunimmt.

Auch die Gesamtzahl der ultrafeinen Partikel (< 100 nm) sinkt mit steigendem Strohanteil von 8,74E+07 (W90WS10) auf 7,83E+07 #/cm³ (W50WS50) leicht ab (Tabelle 22). Durch die Additivierung mit Kaolin erhöht sich zwar die Anzahl der Partikel mit einem Durchmesser von 126,9, 229,6 und 430,1 nm, während die Anzahl der Partikel mit 69, 40,5 und 25,2 nm abnimmt, allerdings scheint sich dabei auch die Anzahl der feinsten Partikel mit 9,1 nm zu erhöhen (Tabelle 22).

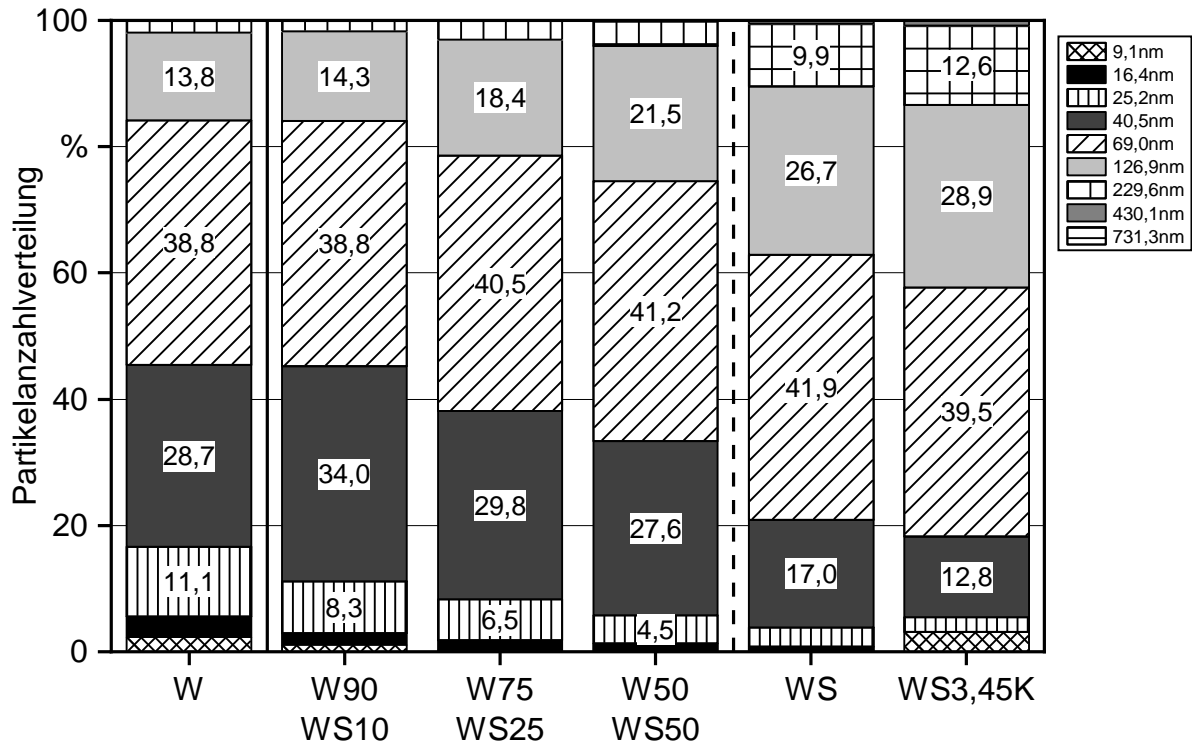


Abbildung 31: Prozentuale Partikelanzahlverteilung innerhalb der PM_1 -Fraktion für alle Weizenstrohbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets

Bei den Pappelpellets (Abbildung 32) lässt sich eine leichte Verschiebung in Richtung der feineren Partikel für die vor der Pelletierung additvierten (PC1,5K) Pellets feststellen. Bei einer Additivierung nach der Pelletierung beschränkt sich diese Beobachtung auf die Fraktionen 9,1 und 69 nm, wobei gleichzeitig die Fraktion mit 16,4 und 126,9 nm leicht abnimmt und die mit 731,3 nm etwas zunimmt.

Für Pappel-Hackschnitzel zeigt sich hinsichtlich der Partikelanzahl eine deutliche Verschiebung innerhalb der PM_1 -Fraktion in Richtung der feineren Partikel durch die Zugabe von Kaolin.

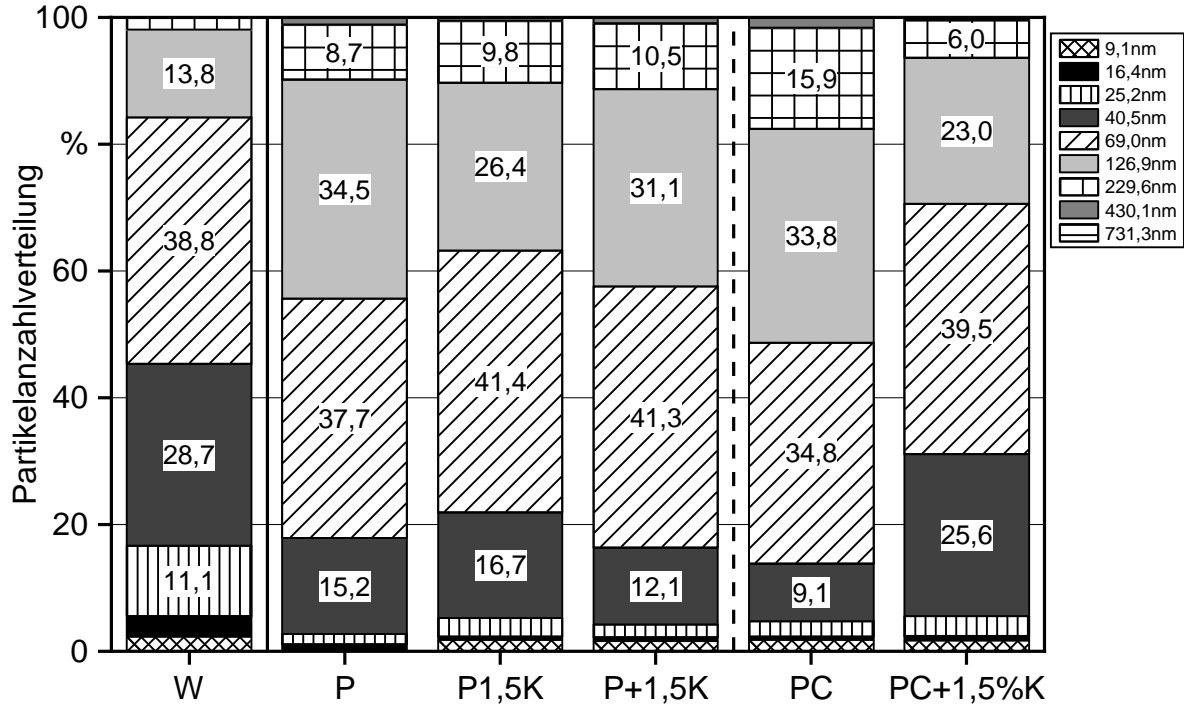


Abbildung 32: Prozentuale Partikelanzahlverteilung innerhalb der PM₁-Fraktion für alle Pappelbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets

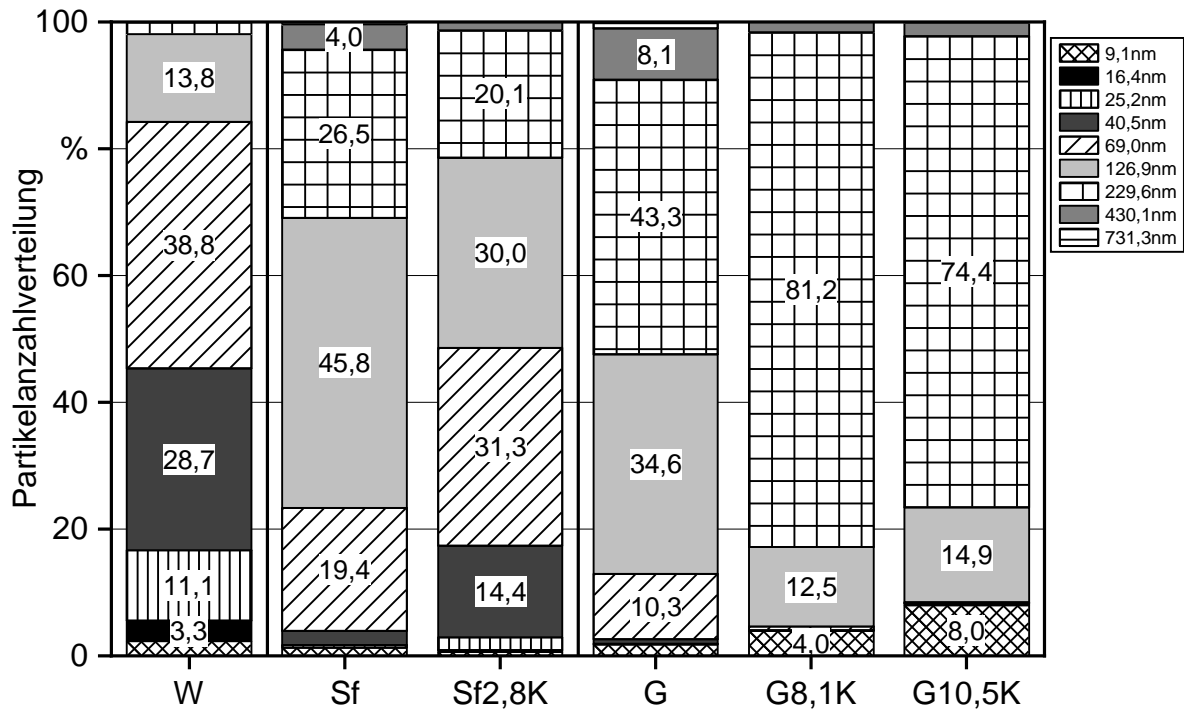


Abbildung 33: Prozentuale Partikelanzahlverteilung innerhalb der PM₁-Fraktion für alle Sonnenblumenspелzen- und Grasbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets

Für die Sonnenblumenspelzen-Pellets zeigte sich bei der additivierten Variante ebenfalls eine deutliche Verschiebung hin zu feineren Partikeln innerhalb der PM₁-Fraktion gegenüber reinen Sonnenblumenspelzen-Pellets (Abbildung 33). Für die Graspellets zeigt sich eine starke Zunahme der Anzahl von Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von 229,6 nm, während die Anzahl der Partikel mit 430,1, 126,9 und 69 nm deutlich abnahm. Gleichzeitig nahmen die feinsten Partikel (< 9,1 nm) mit zunehmender Additivierung deutlich zu.

7 Ergebnisse der Untersuchungen zur realen Verschlackung im Kessel und bei den Labormethoden

Da die Anzahl der Stichproben (Einzelmessungen) zur Beurteilung der Brennstoffe ($n = 2$) bzw. Kesselaschen ($n = 1$) hinsichtlich der Verschlackung zu gering ist, konnte für diese Untersuchungen keine statistische Auswertung durchgeführt werden. Hierzu werden also im Folgenden lediglich beobachtende Aussagen getroffen.

7.1 Allgemeine Beobachtungen zu Ascheanfall und Ablagerungen

Um die Brennstoffe hinsichtlich eines störungsfreien Anlagenbetriebs zu beurteilen, wurde der Versuchszeitraum von 8 h stationärer Vollastbetrieb zuzüglich einer zweistündigen Aufheizzeitphase des Kessels gewählt. Wie bereits in Kapitel 6 beschrieben musste der Feuerungsversuch mit reinem Weizenstroh bereits nach der zweiten Staubmessung (180 min zuzüglich der Aufheizphase) abgebrochen werden, da sich der Kessel aufgrund extremer Verschlackung bereits nach dieser kurzen Zeit nicht mehr in einem stationären Betriebszustand befand. Dagegen ließ sich der stationäre Vollastbetrieb mit allen anderen Brennstoffen über 8 h aufrechterhalten.

Des Weiteren wurde beobachtet, dass der Aschekasten (60 l) bei den Grasbrennstoffen aufgrund des erhöhten Aschegehalts von über 8,8 m-% nicht mehr ausreichte, um die Asche über die komplette Versuchsdauer aufzunehmen. Hier musste für die reinen Graspellets einmal und für die additivierten Grasbrennstoffe sogar zweimal während des Versuchs der Aschekasten geleert werden. Allgemein wäre für Brennstoffe mit so hohen Aschegehalten eine automatische Ascheaustragung mit einem deutlich größeren Aschebehälter sinnvoll bzw. notwendig. Kessel mit Topfbrenner (Abwurffeuerungen) könnten diese Aschemenge vermutlich nicht mehr zuverlässig abführen, sodass sich zu viel Asche im Brennraum ansammeln würde und eine ausreichende und homogene Luftzufuhr aufgrund der Aschemenge nicht mehr gewährleistet wäre. Dies würde in der Regel zu einer Kesselabschaltung führen.

Bei den Grasbrennstoffen und den Sonnenblumenspelzen ohne Kaolin kam es zu massiven mineralischen Ablagerungen im Bereich des Wärmetauschers (Abbildung 34) und am Kesselauslass, sodass auch die ca. 4 m hinter dem Abgasstutzen des Kessels im Abgasrohr eingebaute Gasprobenahme betroffen war (Abbildung 35). Bei den Grasbrennstoffen waren diese Ablagerungen weiß, bei den reinen Sonnenblumenspelzenpellets bläulich grau und deutlich schwächer ausgeprägt. In beiden Fällen wäre der Reinigungsaufwand des Kessels, aber auch des Schornsteins erheblich höher als bei Holzbrennstoffen.



Abbildung 34: Ablagerungen am Wärmetauscher des Kessels nach einem Versuchstag (8 h Vollastbetrieb + 2 h Aufheizdauer) mit reinen Graspellets



Abbildung 35: Ablagerungen an dem Filter der Abgasprobenahmesonde (links) und der Staubprobenahmesonde (rechts) nach einem Versuchstag (8 h Volllastbetrieb + 2 h Aufheizdauer) mit reinen Graspellets

7.2 Ergebnisse zur Beurteilung der Kesselaschen

Die Aschen aus den Feuerungsversuchen wurden wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben untersucht. Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der visuellen Beurteilung (Kategorisierung nach [66]) und der Siebanalyse. Zusätzlich wurden die größten Schlackebrocken für einen besseren Größenvergleich auf Millimeterpapier fotografiert.

Tabelle 23: Ergebnisse der visuellen Beurteilung (Kategorie) und der granulometrischen Untersuchung aller Kesselaschen nach den Feuerungsversuchen

	Visuelle Beurteilung/ Kategorie	Korngrößenklassen der Aschen (mm)					Asche gesamt
		> 3,15	≤ 3,15 > 2,0	≤ 2,0 > 1,0	≤ 1,0 > 0,5	≤ 0,5	
	–	m-%					g
W	2a	19	16	50	10	5	202
W90WS10	4	43	9	39	7	2	519
W75WS25	4	71	6	16	5	2	978
W50WS50	4	79	5	11	3	1	1.847
WS	4	81	9	8	2	0	2.421*
WS3,45K	3	59	14	14	9	5	6.081
P	2a	73	7	13	5	2	1.420
P1,5K	2b	50	11	32	6	2	2.479
Sf	2b	71	9	10	6	4	1.696
Sf2,8K	2a	65	6	23	5	1	3.690
G	2a	61	10	15	7	7	6.081
G8,1K	3	72	5	7	6	10	13.458
G10,5K	3	85	2	2	3	7	16.637

* Geringere Aschemenge durch kürzere Versuchsdauer bei reinem Weizenstrohpellets wegen Versuchsabbruch; für W50+WS50, P+1.5K sowie die Pappelhackschnitzel erfolgte keine Untersuchung der Asche bezüglich der Verschlackung.



Abbildung 36: Fraktion > 1 mm der Bodenasche nach dem Versuch mit Holzpellets

Die Asche der Holzpellets war dunkelbraun bis schwarz mit teilweise unverbrannten Pellets (Abbildung 36). Da die Asche teilweise gesinterter Partikel enthielt, die auf leichten Druck zerfielen, wurde bei der Kategorie der visuellen Beurteilung auf „2a“ entschieden, gemäß den Erfahrungen im Projekt AshMeIT (Quelle: nicht veröffentlichte Messdaten TFZ). Die über den gesamten Versuchszeitraum angefallene Aschemenge betrug 202 g. 19 % der Aschepartikel waren hierbei größer als 3,15 mm und der Hauptanteil der Asche befand sich in der Fraktion zwischen 1,0 und 2,0 mm.

Für die Holz-Weizenstroh-Mischungen stieg der Anteil der Aschepartikel, die größer sind als 3,15 mm, mit zunehmendem Weizenstrohanteil von 43 % (W90WS10) bis auf 79 % (W50WS50) an. Bei reinen Weizenstrohpellets waren 81 % der Aschepartikel größer als 3,15 mm, das trug zu den instationären Bedingungen im Kessel und somit zum Versuchsabbruch bei. Dies deckt sich mit Beobachtungen aus einer anderen Studie, bei der eine deutliche Reduzierung der Verschlackung ebenfalls bei Mischungen mit mindestens 70 % Holz festgestellt worden war [83].

Die Aschemenge stieg von 519 g (W90WS10) auf 2.421 g für reine Weizenstrohpellets. Da bei allen Mischungsverhältnissen sowie dem reinen Weizenstroh vollständig gesinterter Schlackebrocken vorkamen (Abbildung 37), fallen diese alle in die 4. Kategorie nach der visuellen Beurteilung (vgl. Abschnitt 4.3.3). Bei reinem Weizenstroh betrug die Länge des größten Schlackebrocks ca. 16 cm und die Breite ca. 8 cm (siehe Abbildung 37, WS). Mit zunehmendem Anteil an Holz wurden die Schlackebrocken kleiner: bei 50 %

Weizenstroh (siehe Abbildung 37, W50WS50) ca. 10 × 10 cm, bei 25 % Weizenstroh ca. 5 × 5 cm und bei 10 % Weizenstroh noch ca. 4,5 × 3 cm.

Durch die Additivierung mit Kaolin (siehe Abbildung 37, WS3.45K) sank der Anteil der Aschepartikel > 3,15 mm auf 59 %, wobei sich aber die Gesamtmenge der Asche im Vergleich mit den Weizenstroh-Holz-Mischungen deutlich auf 6.081 g erhöhte. Der größte Schlackebrocken hatte hier eine Länge von ca. 8,5 cm und eine Breite von ca. 5 cm, er unterschied sich aber farblich deutlich von den dunkelgrauen bis schwarzen Schlackebrocken der übrigen Weizenstrohbrennstoffe. Sie waren beigefarben und deutlich poröser und ließen sich mit der Hand zerbröseln, weshalb sie in die Kategorie 3 fallen.

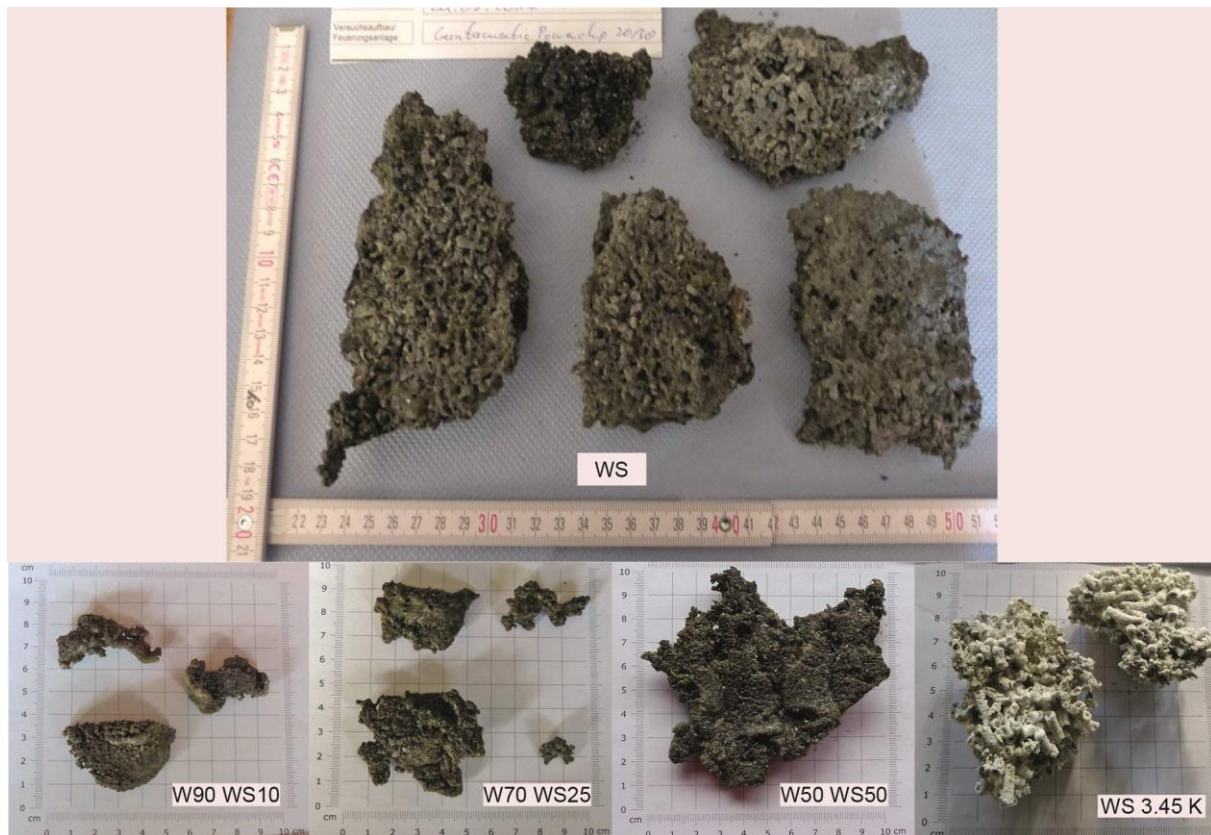


Abbildung 37: Größte aus dem Kessel entnommene Schlackebrocken der Weizenstrohbrennstoffe im Vergleich

Bei den Pappelpellets stieg die gesamte Aschemenge durch die Additivierung von 1.420 g auf 2.479 g an, wobei sich der Anteil der Aschepartikel > 3,15 mm von 73 % auf 50 % reduzierte. Allerdings kam es durch die Additivierung teilweise zu einer Versinterung der Asche zu relativ stabilen Agglomeraten, die bei Berührung nicht zerbrachen; deshalb wurde die Asche der reinen Pappelpellets in Kategorie 2a und die Asche der additivierten Pappelpellets in die Kategorie 2b eingestuft. Die dabei entstandenen versinterten Aschestücken (Abbildung 38, P1,5K) wiesen für die additivierten Pappelpellets eine maximale Größe von 3 × 2 cm auf. Diese Beobachtung deckt sich mit der in Unter-

kapitel 5.4 für Pappel beschriebenen Zunahme des Index zur Ascheerweichung durch die Additivierung.



Abbildung 38: GröÙte aus dem Kessel entnommene Schlackebrocken der Pappel- (obere Zeile), Sonnenblumenspelzen- (mittlere Zeile) und Grasbrennstoffe (untere Zeile) im Vergleich

Bei den Sonnenblumenspelzenpellets sank der Anteil der Aschepartikel > 3,15 mm aufgrund der Additivierung von 71 % auf 65 %, während die Gesamtmenge der Asche von 1.696 g auf 3.690 g zunahm. Die gesinterten Brocken zerfielen bei den reinen Sonnenblumenspelzenpellets bei Berührung nicht (daher Kategorie „2b“), bei den additivierten Sonnenblumenspelzenpellets hingegen zerfielen sie bei leichter Berührung (Kategorie „2a“). Die farblich sehr ähnlichen Brocken wiesen bei den reinen Pellets (Sf) eine maximale GröÙe von ca. 3 × 1,5 cm und bei den additivierten Pellets von ca. 3 × 3 cm auf (siehe Abbildung 38), d. h., sie wurden somit durch die Additivzugabe tendenziell etwas größer.

Für Graspellets scheint sich die Additivierung hinsichtlich der Schlackebildung negativ auszuwirken, denn der Anteil der Aschepartikel > 3,15 mm nahm von 61 % bei reinen Graspellets auf 72 % (G8,1K) und sogar auf 85 % (G10,5K) zu. Die Gesamtmenge der Asche betrug dabei ca. 6,1 kg für reine Graspellets und stieg durch die Additivierung bis auf 16,6 kg (G10,5K) an. Die visuelle Beurteilung der Aschen ergab für reine Graspellets die Kategorie 2a (versinterte Asche, die bei Berührung zerbrach) und stieg auf die Kate-

gorie 3 (vollständig gesintert und teilweise geschmolzen, kann aber mit der Hand zerbrochen werden) für beide Additivierungsstufen an. Die in Abbildung 38 dargestellten größten Teile der Asche liegen für reine Graspellets (G) in Form von kleinen, leicht zerbrechlichen Plättchen vor, während für die additivierten Graspellets (G8,1K und G10,5K) eher große Klumpen zusammengesinterteter Aschepellets zu sehen sind. Diese wiesen eine maximale Größe von ca. 6 × 6 cm (G8,1K) bzw. ca. 3,5 × 6 cm (G10,5K) auf. Diese Beobachtungen befinden sich im Widerspruch zu dem mit der Additivierung sinkenden Index zur Ascheerweichung bei den Grasbrennstoffen (siehe Unterkapitel 5.4).

7.3 Ergebnisse der Versuche mit der PASSA-Methode

Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben wurde mit allen pelletierten Brennstoffen die PASSA-Methode (Abschnitt 4.3.1) zur Beurteilung der Brennstoffe hinsichtlich ihrer Verschlackungsneigung durchgeführt. Abbildung 39 zeigt die mit der Probe gefüllten Glühschalen nach der thermischen Behandlung im Muffelofen für alle pelletierten Brennstoffe. Bei den Holzpellets sind pelletförmige, leicht versinterte Ascheablagerungen, die bei leichter Berührung zerfallen, zu sehen. Es fällt weiterhin auf, dass sowohl die Aschen aus reinen Weizenstrohpellets als auch aus Weizenstroh-Holz-Mischungen komplett geschmolzen werden, wobei die Tropfen mit zunehmendem Holzanteil kleiner werden. Die reinen Gras-, Sonnenblumenspelzen- und Pappelpellets behalten dagegen ansatzweise ihre Pelletform bei, bilden jedoch relativ fest versinterte Haufen. Bei allen mit Kaolin additivierten Pellets ändert sich die Farbe hin zu weiß bis gelblich. Die Asche liegt dabei immer in gesintertem zylindrischer „Pelletform“ vor, die bei Berührung nicht sofort zerbricht, sich aber zwischen den Fingern zerbröseln lässt und dann als lose Schüttung im Tiegel liegt.

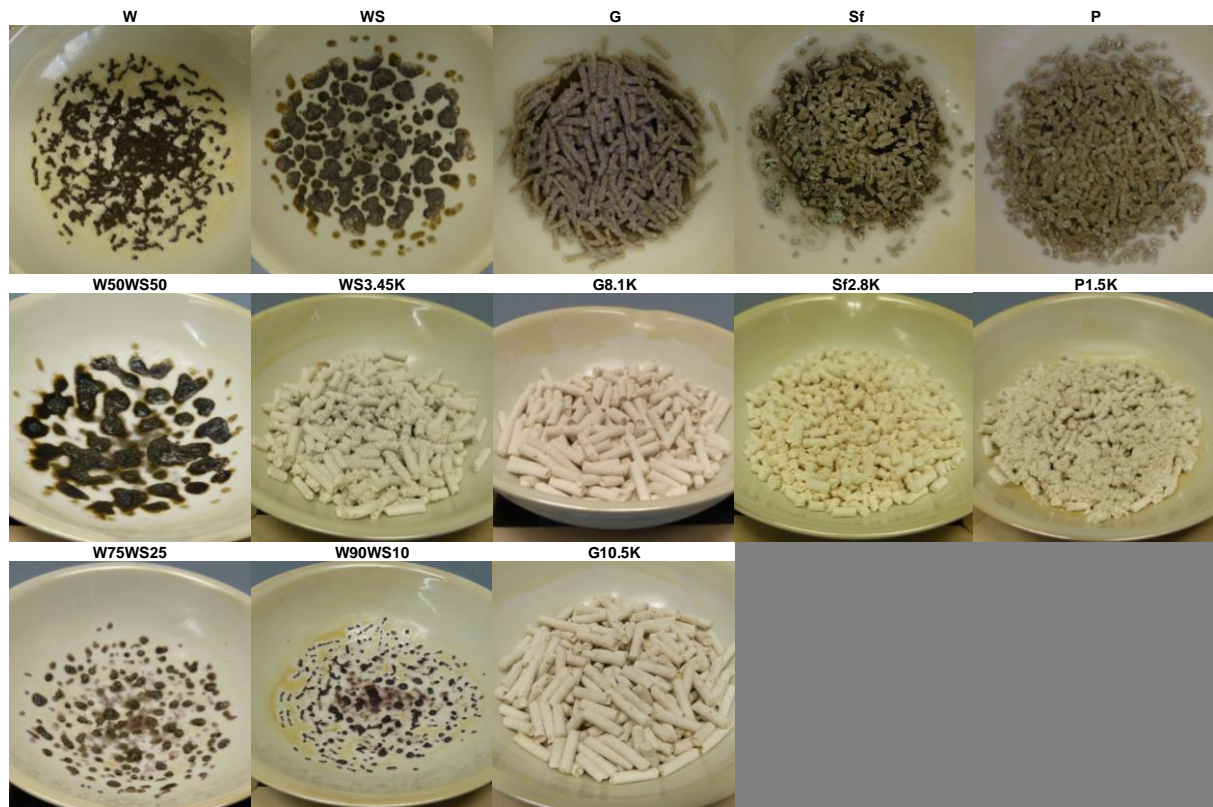


Abbildung 39: Optischer Vergleich der Glühschalen mit Proben aller pelletierten Brennstoffe nach thermischer Behandlung (definierte Veraschung) gemäß der PASSA-Methode

Die Glühschalen nach der Entnahme der Probe mit einem Pinsel sind in Abbildung 40 dargestellt. Während sich die Proben der reinen Holzpellets annähernd rückstandslos entfernen lassen, hinterlassen die reinen Pappel- und Sonnenblumenspelzenpellets bereits deutliche Ablagerungen an den Glühschalen. Die versinterte Asche der Graspellets und die verglaste Asche der Weizenstrohpellets und Weizenstroh-Holz-Mischungen haften dagegen vollständig an der Glühschale fest. Alle mit Kaolin additiven Pellets ließen sich wie reine Holzpellets annähernd rückstandsfrei aus der Glühschale entfernen.

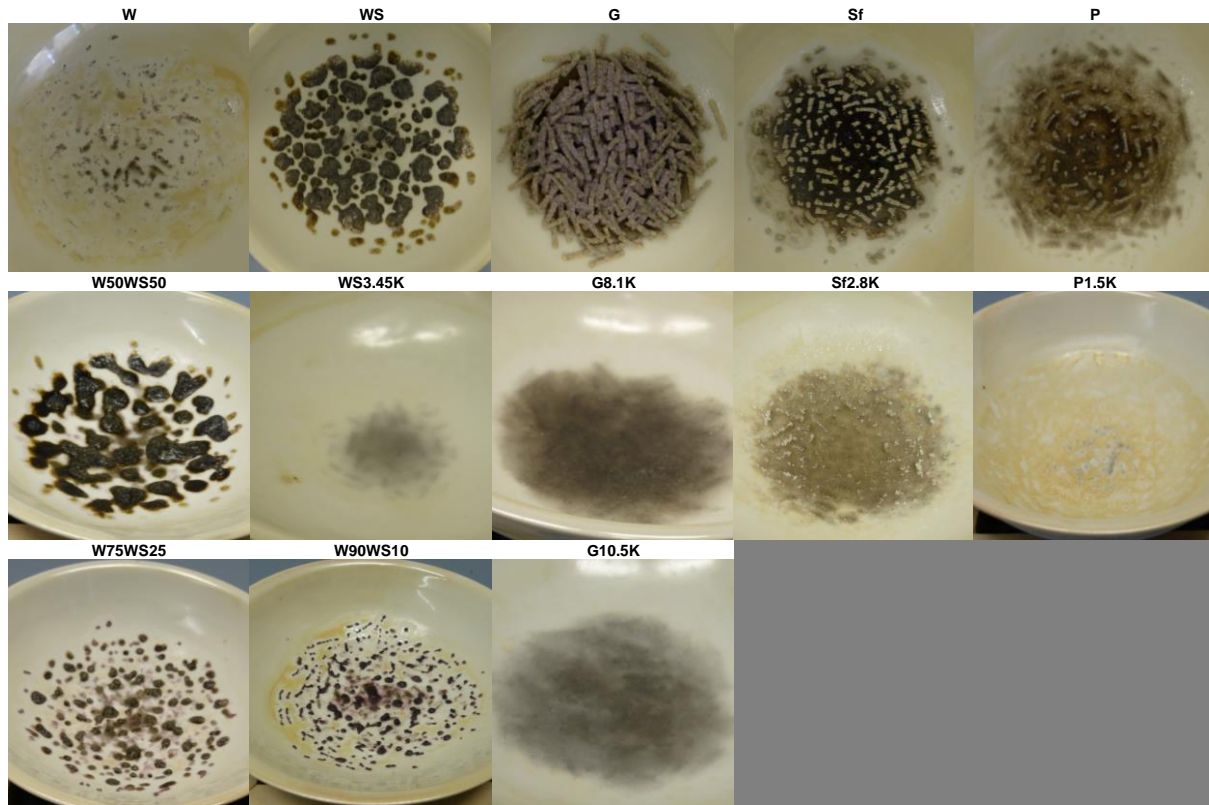


Abbildung 40: Optischer Vergleich der Glühschalen aller pelletierten Brennstoffe nach der thermischen Behandlung (definierte Veraschung) gemäß der PASSA-Methode und Entnahme der Proben mit einem Pinsel

Dies wird auch nochmals deutlich, wenn man die in Tabelle 24 dargestellten prozentualen Anteile der an der Glühschale (Tiegel) anhaftenden Rückstände betrachtet. Dieser liegt für Holzpellets bei 19 % der gesamten erzeugten Aschemenge, für reine Pappelpellets bei 24 %, für reine Sonnenblumenspelzenpellets bei 26 % und für reines Weizenstroh, alle Weizenstroh-Holz-Mischungen und reine Graspellets bei 100 %. Für die mit Kaolin additvierten Brennstoffe liegt der anhaftende Anteil zwischen 0 und 1 % der gesamten Aschemenge und damit sogar niedriger als bei den Holzpellets. Der berechnete Slag Index für die Aschepartikel $> 3,15$ mm liegt für Holzpellets bei 0,26, für reine Pappelpellets bei 0,49, für reine Sonnenblumenspelzenpellets bei 0,41 und für reine Graspellets bei 1,0. Für die additvierten Pellets liegt der Slag-Index zwischen 0,69 und 0,99 und steigt dabei in allen Fällen, außer für Weizenstroh, im Vergleich zu den reinen Brennstoffen an. Dies liegt offensichtlich daran, dass der Ascherückstand der additvierten Pellets bei der PASSA-Methode die Pelletstruktur beibehält und diese „fluffigen Aschepellets“ dabei so stabil bleiben, dass sie während des Siebens nicht zerfallen und somit der Fraktion $> 3,15$ mm zugeordnet werden müssen. Der geringe am Tiegel anhaftende Teil macht aber deutlich, dass es z. B. im Fall der Weizenstrohbrennstoffe durch die Additivierung mit Kaolin nicht zu einem Schmelzen der Asche kommt und wie beim Gras ein Zusammenbacken der Asche verhindert wird.

Tabelle 24: Slag Index der PASSA-Methode für die untersuchten Brennstoffe, berechnet für Aschepartikel > 3,15 mm, sowie Anteil der nach Veraschung an der Glühschale anhaftenden Probe

Brennstoff	Slag Index > 3,15 mm	Anhaftender Rückstand im Schmelztiegel m-%
W	0,26	19
W90WS10	1,00	100
W75WS25	1,00	100
W50WS50	1,00	100
WS	1,00	100
WS3,45K	0,97	1
P	0,49	24
P1,5K	0,70	1
Sf	0,41	26
Sf2,8K	0,69	1
G	1,00	100
G8,1K	0,99	1
G10,5K	0,99	0

7.4 Ergebnisse der Versuche mit dem Slag Analyzer

Auch im Slag Analyzer wurden alle Brennstoffe hinsichtlich ihrer Verschlackungsneigung untersucht. Abbildung 41 zeigt die größten aus dem Slag Analyzer entnommenen Schlackebrocken der pelletierten Brennstoffe im Vergleich. Diese haben ein ähnliches Aussehen wie bei den reinen oder teilweise verdünnten Brennstoffen aus den Feuerungsversuchen am Kessel (vgl. Abbildung 37 und Abbildung 38). Die Schlackebrocken sind allerdings teilweise deutlich kleiner (Weizenstroh und Stroh-Holz Mischungen, v. a. W90WS10); bei den reinen Graspellets sind sie dagegen wesentlich größer und anders strukturiert (plättchenförmig bei der Schlacke aus dem Kessel). Für reine Sonnenblumenspelzen sind die Schlackebrocken in Form, Farbe und Größe nahezu gleich und bei reiner Pappel sind die Schlackebrocken aus dem Slag Analyzer farblich sehr ähnlich, aber wesentlich größer im Vergleich mit der Asche aus dem Kessel.

Im Unterschied zu den Kesselaschen liegen die versinterten Aschepartikel der additivierten Brennstoffe aus dem Slag Analyzer bis auf Pappel immer in zylindrischer „Pelletform“ vor. Auch sind diese stets kleiner als bei den untersuchten Kesselaschen, was eventuell darauf zurückzuführen ist, dass die Methode des Slag Analyzers bei solchen Brennstoffen mit mehr als 3 m-% Aschegehalt eine Verdünnung mit Holzpellet vorsieht (siehe Abschnitt 4.3.2).

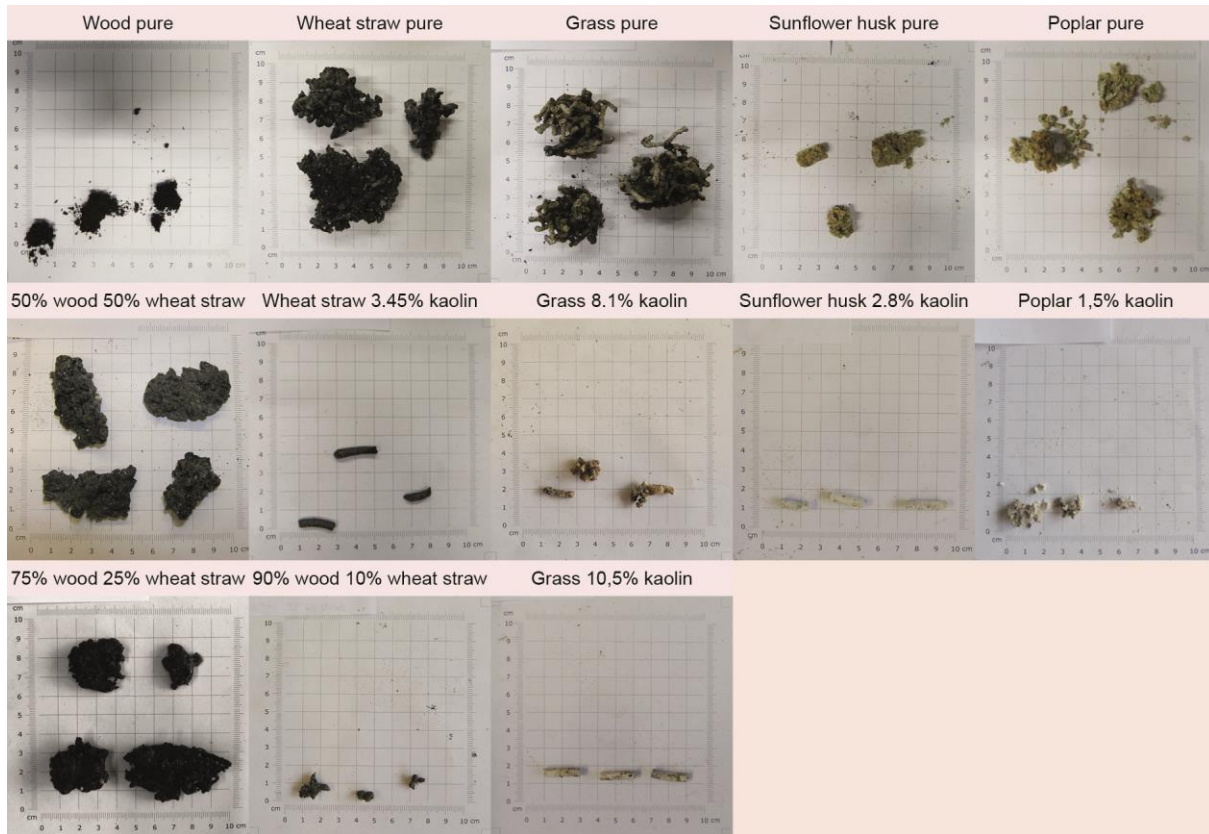


Abbildung 41: Größte aus dem Slag Analyzer entnommene Schlackebrocken der pelletierten Brennstoffe im Vergleich (* Brennstoffe, deren Aschegehalt mit Holzpellets verdünnt wurde)

Die Ergebnisse der Versuche mit dem Slag Analyzer sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Ein Nachteil des Slag Analyzers ist bei Brennstoffen mit einem Aschegehalt von über 3 m-%, dass die eingesetzte Brennstoffmenge bei den additivierten Brennstoffen wegen der Verdünnung relativ niedrig im Vergleich zur Menge des Referenzbrennstoffs ist. Diese liegt beispielsweise bei WS3.45K bei 1.370 g Versuchsbrennstoff (verdünnt mit 1.630 g Referenzbrennstoff). Bei Graspellets mit 10,5 % Kaolin (G10.5K) liegt die Menge des Versuchsbrennstoffs lediglich bei 564 g zu 2.436 g Referenzbrennstoff. Bei diesen Mengenverhältnissen ist es fraglich, ob hier überhaupt noch eine zuverlässige Aussage zur Verschlackung des Versuchsbrennstoffs getroffen werden kann. Im Gesamtergebnis fallen nach der Auswertung der Aschen aus dem Slag Analyzer die Holzpellets in die Kategorie 1,5, W90WS10 und W75WS25 in die Kategorie 3 und W50WS50 in Kategorie 3,5. Reines Weizenstroh und additiviertes Weizenstroh fallen in Kategorie 4. Auch für Pappel bleibt die Additivierung hinsichtlich der zugeordneten Kategorie ohne Auswirkung, dieser Brennstoff liegt in beiden Fällen bei Kategorie 3. Bei den Sonnenblumenspelzenpellets führt die Additivierung zu einer Erhöhung der Kategorie von 3 auf 4 und bei Graspellets von 4,5 auf 5 für beide Additivierungsstufen. Ausschlaggebend für die hohe Einstufung der additivierten Brennstoffe ist in den meisten Fällen nicht die Größe der Schlackebrocken (Abbildung 41) sondern der Anteil der Siebfraktion der Asche > 2 mm. Dies liegt vermutlich wie bei der PASSA-Methode daran, dass die Asche der

additivierten Brennstoffe nach der Verbrennung im Slag Analyzer ihre (lockere) Pelletstruktur beibehält.

Tabelle 25: *Ergebnisse der Untersuchungen aller pelletierten Brennstoffe mit dem Slag Analyzer*

Brennstoff	Verwendete Brennstoffmasse*	Referenzbrennstoff*	Anhaftend am Rost	Summe Schlacke > 2,0 mm	Schlacke inkl. Agglomerate	Schlackegröße	Gesamtergebnis
–	g	g	1–5	1–5	1–5	1–5	1–5
W	3.000	0	1	1,5	1	1,5	1,5
W90WS10	3.000	0	1	3	1	2	3
W75WS25	3.000	0	1	3	2	3	3
W50WS50	3.000	0	1	3,5	2,5	3,5	3,5
WS	2.222	778	1	4	3	3,5	4
WS3,45K	1.370	1.630	1	4	4	2	4
P	3.000	0	1	3	1,5	2	3
P1,5K	2.857	143	1	3	2	2	3
Sf	3.000	0	1,5	3	2	2,5	3
Sf2,8K	1.860	1.140	1	4	2,5	2	4
G	1.027	1.973	2	4,5	4	3	4,5
G8,1K	648	2.352	1	5	5	2	5
G10,5K	564	2.436	1	5	5	2	5

* Die an 3.000 g fehlende Probenmasse wurde mit Referenzbrennstoff aufgefüllt.

7.5 Vergleich der Labormethoden mit den Feuerungsversuchen am Kessel

Um die Ergebnisse der PASSA-Methode und des Slag Analyzers besser mit den Ergebnissen der Feuerungsversuche vergleichen zu können, wurde für alle Methoden der Slag-Index für alle Aschepartikel > 3,15 mm berechnet (Tabelle 26). Bei der PASSA-Methode und dem Slag Analyzer wurde die am Rost bzw. der Glühschale anhaftende Aschemenge zur Fraktion > 3,15 mm addiert.

Abbildung 42 zeigt den Slag-Index der Labormethoden im Vergleich zu den Feuerungsversuchen. Für Holzpellets liegt die PASSA-Methode sehr nahe an den realen Feuerungsversuchen, beim Slag Analyzer liegen die Index-Werte deutlich darunter. Bei den Weizenstrohbrennstoffen liegt die PASSA-Methode aufgrund der komplett an der Glühschale anhaftenden Probe immer bei 1,0 und damit deutlich über den Aschen aus den Feuerungsversuchen. Auch lässt die PASSA-Methode keine Differenzierung zwischen den Holz-Weizenstroh-Mischungen zu. Der Slag Analyzer bildet hier die Realität deutlicher ab und liegt für W90WS10 und WS sehr nahe an den Aschen aus dem Kessel, für

W75WS25 und W50WS50 wird die Verschlackung im Vergleich zum Kessel dagegen unterschätzt. Dies deckt sich auch mit der optischen Bewertung der Schlackebrocken (siehe Abbildung 37 und Abbildung 41). Auch für die additivierten Weizenstrohpellets (WS3,45K) liegt der Slag Analyzer näher an der Asche aus den Feuerungsversuchen, mit einer leichten Überschätzung der Verschlackung. Für reine Pappel- und Sonnenblumenspelzenpellets (P, Sf) liegen die PASSA-Methode und der Slag Analyzer beim Slag-Index sehr nahe beieinander, jedoch deutlich niedriger als bei den Aschen aus den Feuerungsversuchen. Für Pappel mit Kaolin (P1,5K) liegt der Slag Analyzer deckungsgleich mit der Asche aus dem Kessel, die PASSA-Methode überschätzt hier die Verschlackungsneigung deutlich. Für die Sonnenblumenspelzen mit Kaolin liegen beide Methoden relativ nahe an der Praxis. Bei den Grasbrennstoffen wird dagegen die Verschlackungsneigung mit beiden Methoden deutlich überschätzt.

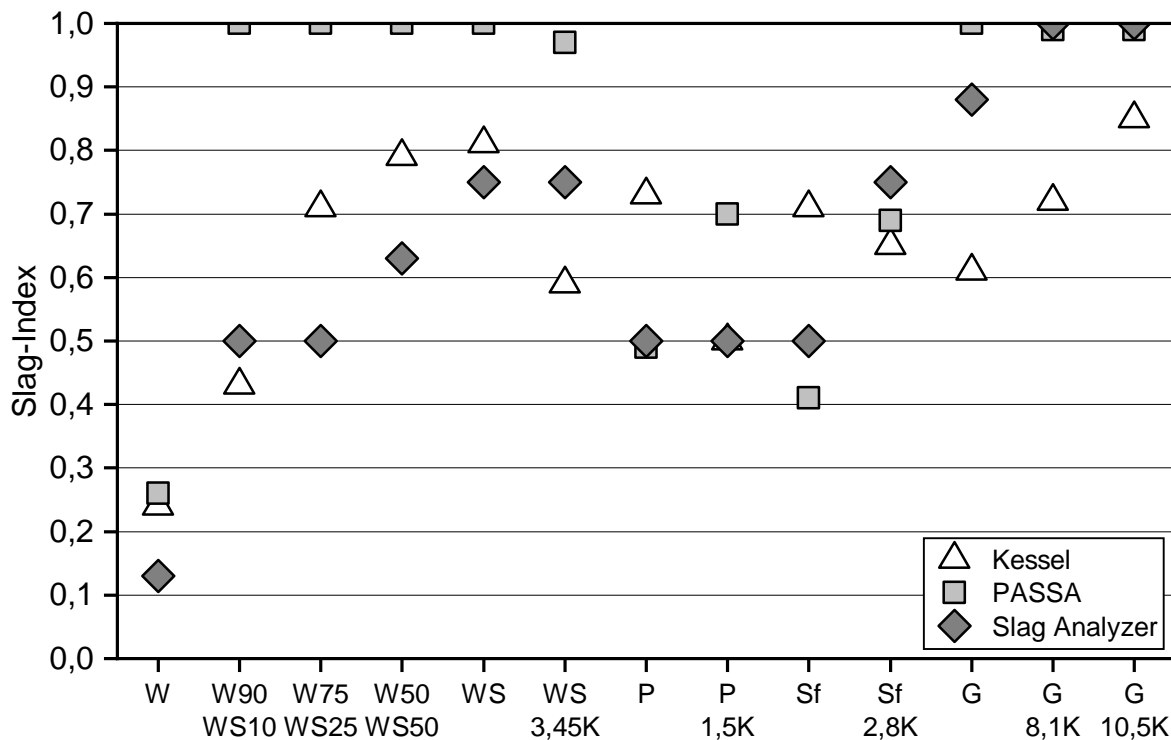


Abbildung 42: Vergleich des Slag-Index für Partikel > 3,15 mm der Labormethoden im Vergleich mit den Aschen aus den Feuerungsversuchen

Insgesamt liegt der Slag Analyzer für diese Feuerung also deutlich näher an der Realität, die Messung erfordert allerdings auch einen deutlich höheren Aufwand. Die PASSA-Methode ist in jedem Fall geeignet, Brennstoffe mit niedriger Verschlackungsneigung, wie z. B. Holzpellets, von anderen Brennstoffen, wie z.B. Strohpellets, zu unterscheiden. Durch das Anhaften der Probe am Tiegel sowie die versinterten Pelletstrukturen der additivierten Brennstoffe, die zur Fraktion > 3,15 mm hinzugezählt werden, kommt es aber zu einer deutlichen Überbewertung des Verschlackungsgrads bei solchen „schwierigen“ Brennstoffen. Es bleibt zu untersuchen, ob eine Anpassung der Haltedauer bei 1.000° C

oder der maximalen Temperatur zu einer besseren Differenzierbarkeit zwischen solchen Brennstoffen sowie zwischen den reinen und additivierten Brennstoffen führen kann. Auch eine zusätzliche Bewertung der mechanischen Festigkeit der erzeugten Aschepartikel wäre ein denkbarer Ansatz zur Optimierung der PASSA-Methode.

Tabelle 26: Slag-Index der Labormethoden im Vergleich zu den Feuerungsversuchen am Kessel

Brennstoff	Kessel-Bettasche	PASSA-Methode	Slag Analyzer
W	0,24	0,26	0,13
W90WS10	0,43	1,00	0,50
W75WS25	0,71	1,00	0,50
W50WS50	0,79	1,00	0,63
WS	0,81	1,00	0,75
WS3,45K	0,59	0,97	0,75
P	0,73	0,49	0,50
P1,5K	0,50	0,70	0,50
Sf	0,71	0,41	0,50
Sf2,8K	0,65	0,69	0,75
G	0,61	1,00	0,88
G8,1K	0,72	0,99	1,00
G10,5K	0,85	0,99	1,00

7.6 Glühverluste der Aschen aus den Feuerungsversuchen

Zur Untersuchung der Aschen aus den Feuerungsversuchen wurde von jeder Asche eine repräsentative Probe genommen und anschließend auf 0,5 mm vermahlen. Mit der gemahlene Probe wurde zunächst der Glühverlust bei 550 °C und anschließend mit derselben Probe – durch erneutes Aufheizen – bei 815 °C bestimmt (siehe auch Abschnitt 4.1.3). Der Glühverlust bei 550 °C resultiert größtenteils aus dem Verglühen restlicher organischer Bestandteile (Kohlenstoffverbindungen) der Asche, während der Glühverlust bei 815 °C sich vor allem aus dem Verlust flüchtiger anorganischer Verbindungen, der weiteren Oxidation anorganischer Verbindungen und einer Aufspaltung der Carbonate unter Freisetzung von CO₂ zusammensetzt [58]. Für jeden Brennstoff wurde je eine Doppelbestimmung durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 und Abbildung 43 dargestellt. Dabei weisen die reinen Holzpellets (13,9 m-%) sowie W90WS10 (14,9 m-%) für 550 °C die höchsten Glühverluste und damit einen hohen Anteil an Restkohlenstoff der Asche auf. Der Glühverlust bei 815 °C erhöht sich bei den Holzpellets um weitere 11,6 m-% und liegt auch hier am

höchsten. Dies deutet auf einen erhöhten Anteil an Carbonaten in der Asche hin. Bei der Mischung W90WS10 fällt dieser Anteil bereits auf 0,8 m-% der Ascheprobe ab, was auf eine Verringerung des Anteils an Carbonaten und flüchtigen anorganischen Verbindungen hindeutet. Der Glühverlust bei 550 °C nimmt bei einer Erhöhung des Weizenstrohanteils auf 4,9 m-% (W75WS25) und 4,3 m-% (W50WS50) ab und könnte auf eine Verbesserung des Kohleabbrands hindeuten. Der Anteil des Glühverlusts zwischen 550 °C und 815 °C bleibt hingegen von der weiteren Erhöhung des Weizenstrohanteils nahezu konstant. Reines Weizenstroh weist trotz der starken Verschlackung und des damit bedingten Versuchsabbruchs im Vergleich zu Holzpellets einen deutlich niedrigeren Glühverlust bei 550 °C (5,7 m-%) und auch bei Erhöhung der Temperatur auf 815 °C von 2,5 m-% auf. Durch die Additivierung des Weizenstrohs mit 3,45 m-% Kaolin reduziert sich der Glühverlust bei 550 °C auf 0,4 m-%, was für einen sehr vollständigen Kohleabbrand spricht. Dies deckt sich auch mit der beobachteten deutlich helleren Farbe der Asche (siehe Unterkapitel 7.2).

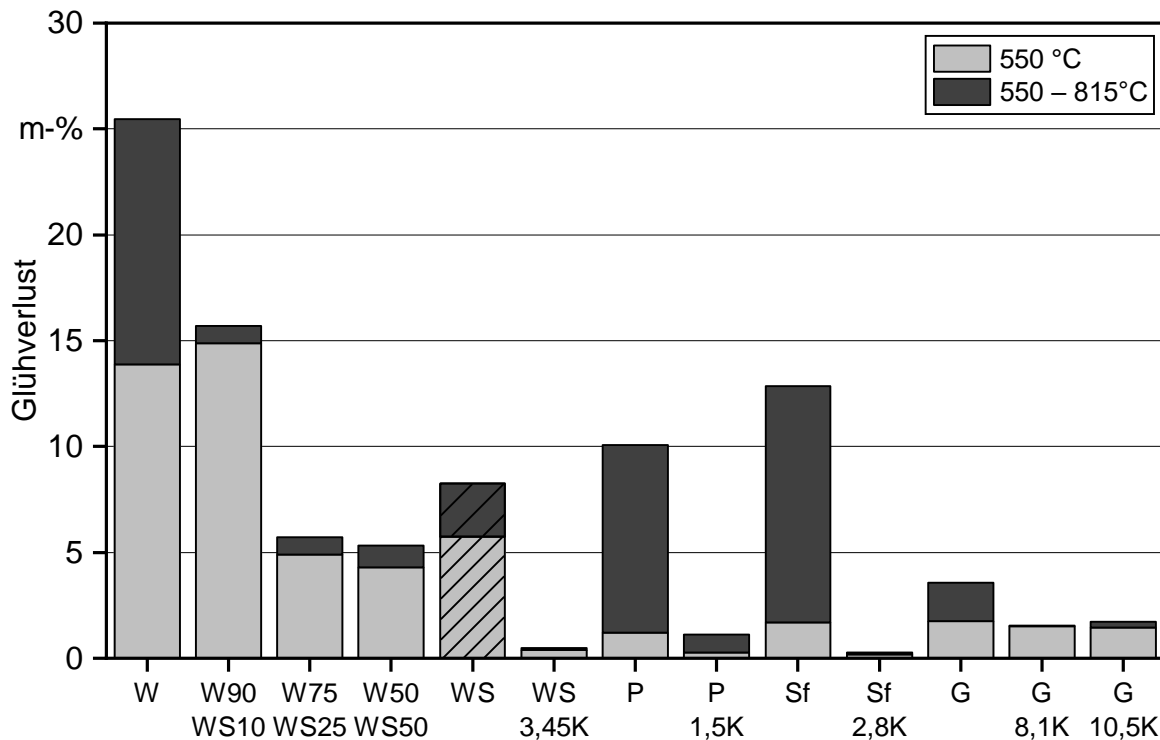


Abbildung 43: Kumulierte Glühverluste der Aschen aus den Feuerungsversuchen bei 550 °C und 815 °C

Die Reduzierung des Glühverlusts bei 550 °C durch die Zugabe von Kaolin zeigt sich für alle Brennstoffe außer für Graspellets, hier bleibt der Glühverlust bei 550 °C nahezu gleich. In allen Fällen zeigt sich aber eine deutliche Abnahme des Anteils am Glühverlust zwischen 550 °C und 815 °C, sobald Kaolin zugegeben wird. Dies könnte unter anderem auf eine – bedingt durch die Einbindung des Kaliums in stabile Kalium-Aluminium-Silikate – verminderte Carbonatbildung zurückzuführen sein. Somit könnte die Additivie-

zung auch einen positiven Nebeneffekt auf den verbesserten Ausbrand der Brennstoffe haben, der sich bei den reduzierten Kohlenmonoxidemissionen bereits angedeutet hat (vgl. Abschnitt 6.2.1).

Tabelle 27: Glühverluste der Aschen aus den Feuerungsversuchen bei 550 °C und 815 °C

Brennstoff	550 °C	550–815 °C	815 °C
	m-%, d		
W	13,9	11,6	25,5
W90WS10	14,9	0,8	15,7
W75WS25	4,9	0,8	5,7
W50WS50	4,3	1,0	5,3
WS	5,7	2,5	8,2
WS3,45K	0,4	0,1	0,5
P	1,2	8,9	10,1
P1,5K	0,3	0,8	1,1
Sf	1,7	11,2	12,9
Sf2,8K	0,2	0,1	0,3
G	1,7	1,8	3,6
G8,1K	1,5	0,1	1,6
G10,5K	1,4	0,3	1,7

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Additivierung mit Kaolin kann eine effektive Maßnahme darstellen, schwierige Agrar-brennstoffe auch für Kleinfeuerungsanlagen nutzbar zu machen. Hierdurch lassen sich diverse neue Brennstoffe feuerungstechnisch so verbessern, dass sie für eine emissionsarme Wärmebereitstellung in Zentralheizungen und Nahwärmenetzen verwendbar werden. Das liegt daran, dass die Kaolin-Additivierung auf die Einbindung der Störstoffe Kalium und Natrium in den Asche-/Schlackerrückstand abzielt. Dadurch soll einerseits die Freisetzung von Kalium-/Natrium-Aerosolen als Feinstaub verhindert und andererseits die Konsistenz des Ascherückstands verbessert werden (d. h. Schlackevermeidung). Folglich richtet sich die durch stöchiometrische Berechnungen bemessene Additivierungsmenge nach der jeweiligen Brennstoffzusammensetzung, insbesondere nach dem Kaliumgehalt. Im additivierten Brennstoff können somit aber auch, je nach Rohstoffart, zum Teil sehr hohe bis teilweise extrem hohe Aschegehalte zustande kommen (bis zu 25-mal höher als bei Holz). Für solche Brennstoffe ist daher häufig eine hierfür geeignete Feuerungsanlagentechnik (z. B. bewegter Stufenrost, ausreichend kurze Entaschungsintervalle) erforderlich.

Am TFZ wurden diverse Verfahrensschritte einer Additivnutzung zur Ertüchtigung schwieriger Brennstoffe wie Pappelholz, Weizenstroh, Sonnenblumenspelzen und Gras erprobt. Die Brennstoffe wurden in der eigenen Versuchspelletieranlage unter definierten Bedingungen aus den genannten Rohstoffen bzw. auch aus definierten Rohstoffmischungen (Holz/Stroh) hergestellt, wobei neben dem Reinbrennstoff (Referenzpellets) auch Pellets mit einer oder mehreren Kaolin-Konzentrationsstufen erzeugt wurden. Das gewählte Pappelholzsortiment (aus dem Kurzumtrieb) wurde zusätzlich auch unpelletiert in Form von Hackschnitzeln bereitgestellt und getestet, wobei auch hier das Additiv Kaolin in gleicher Konzentration unmittelbar vor der Verbrennung automatisch zur Stokerschnecke beigemischt wurde. Die verbrennungstechnische Erprobung erfolgte anschließend in einer 30-kW-Vorschubrostfeuerung, die für aschereiche Brennstoffe geeignet ist.

Bei der Pelletierung der Ausgangsmaterialien ließen sich hinsichtlich der mechanischen Festigkeit und des Feinanteils hochwertige Pellets herstellen, die bei diesen Parametern, bis auf wenige Ausnahmen, innerhalb der Anforderungen für das ENplus-Zertifikat lagen. Dies ließ sich auch bei der Zugabe teils sehr hoher Kaolingehalte bis 10,5 m-% realisieren, solange die hierfür optimale Matrizierung verwendet wurde. Naturgemäß lag der Aschegehalt der hergestellten Pellets – bis auf die Mischung von Holz mit 10 m-% Weizenstroh (ENplus A1) – deutlich über den nach ENplus für Holzpellets geforderten Werten von 0,7 m-% (ENplus A1) bzw. 1,2 m-% (ENplus A2). Die Schüttdichte der hergestellten Pellets lag wiederum größtenteils innerhalb der ENplus-Anforderungen, sie ist hauptsächlich abhängig von der Partikeldichte und der Länge der Pellets. Es wurde ein hoher Verschleiß an den Matrizen und am Kollerkopf der Pelletieranlage festgestellt, was allerdings nicht eindeutig auf die Additivierung mit Kaolin zurückzuführen ist. Aufgrund des verwendeten Materials der Matrizen sowie der eingesetzten Pelletiertechnik (Flachmatrizierung) wäre die Übertragbarkeit auf Holzpellet-Industrieanlagen in Deutschland (meist Ringmatrizen) nur bedingt gegeben.

Durch die Zugabe von Kaolin kam es in allen auswertbaren Versuchen (d. h. ohne Stroh) zu einer deutlichen Reduzierung der CO-Emissionen (minus 69–95 %). Dies kann möglicherweise durch einen katalytischen Effekt des Kaolins und/oder durch einen möglichen positiven Effekt des Kaolins auf die Glutbettstruktur (Porosität) erklärt werden, ist aber noch nicht abschließend zu beantworten. Der positive Effekt des Kaolins konnte auch nachgewiesen werden, wenn das Additiv separat nach der Pelletierung zugemischt worden war, und er trat auch auf, wenn das Additiv über eine Dosierschnecke in die automatische Zufuhr von Pappelhackschnitzel beigemischt worden war. In diesen beiden Fällen war der Effekt jedoch nicht ganz so stark ausgeprägt. Hinsichtlich der Einhaltung von CO-Grenzwerten könnte Kaolin z. B. bei der Verbrennung von Pappelbrennstoffen eine mögliche Verbesserungsmaßnahme sein.

Auch eine Zumischung von Holz zu Weizenstroh führte zu niedrigeren CO-Emissionen, die sogar noch unter denen reiner Holzpellets lagen. Eine Pellet-Mischung aus reinen Holz- und Weizenstrohpellets führte allerdings im Vergleich zur Pelletierung der gleichen Rohstoffe im gleichen Mischungsverhältnis zu einer deutlichen Erhöhung der CO-Emissionen.

Bei den Org.-C-Emissionen konnte kein allgemeiner Trend festgestellt werden. Während diese für Pappel und Gras durch Zugabe von Kaolin sanken, wurde für Weizenstroh und Sonnenblumenspelzen eine Zunahme der Org.-C-Emissionen beobachtet.

Für manche Brennstoffe hingegen kann die Kaolinzugabe zu einer signifikanten Erhöhung häufig weniger beachteter Schadstoffkomponenten führen. Denn sind im Brennstoff ausreichend Schwefel und Chlor vorhanden, so kommt es infolge der Kaolin-Additivierung zu einer erhöhten HCl- und SO₂-Freisetzung. Weil das Kaolin die Einbindung des Kaliums in die Asche durch Bildung von Kalium-Aluminium-Silikaten bewirkt, steht für den Schwefel und das Chlor nunmehr kein – oder nur noch wesentlich weniger – Kalium zur Verfügung, um festes KCl bzw. K₂SO₄ zu bilden. Indem also durch Additivierung die Bildung solcher Kaliumsalze zur Feinstaubminderung bewusst vermieden wird, gelangen Chlor und Schwefel als gasförmige Verbindungen in die Atmosphäre. Dieser Effekt wurde bei Weizenstroh, Gras und Sonnenblumenspelzen deutlich festgestellt, nicht jedoch bei Pappel-Pellets.

Auch bei den NO_x-Emissionen wurde ein (geringer) Anstieg bei den additivierten Brennstoffen festgestellt, der mutmaßlich auf die deutliche Abnahme der CO-Konzentrationen in der Brennkammer zurückzuführen ist. Für Kleinfeuerungsanlagen im Gültigkeitsbereich der 1. BlmSchV konnten die Anforderungen an die NO_x-Emissionen von 500 mg/Nm³ aber eingehalten werden. Bei größeren Anlagen könnte mit einigen der Brennstoffe jedoch durch die Additivierung ein Anstieg in die Nähe der NO_x-Grenzwerte bewirkt werden.

Die Gesamtstaubemissionen ließen sich in allen auswertbaren Versuchen (d. h. ohne Stroh) durch eine Kaolin-Additivierung erheblich – d. h. um 53 bis 77 % – reduzieren. Wie bei den CO-Emissionen zeigte sich auch hier, dass der staubmindernde Effekt größer ist, wenn das Kaolin schon vor der Pelletierung hinzuzugemischt wird (minus 71 %),

anstelle einer nachträglichen Beimischung zu den Pellets (minus 56 %). Das wurde bei den pelletierten Pappelbrennstoffen sichtbar. Aber auch mit additivierten Pappelhackschnitzeln war dieser Effekt noch erheblich (minus 44 %). Bei Weizenstroh scheint sich eine Mischung mit Holz besser auszuwirken als die Additivierung mit Kaolin, allerdings ist der direkte Vergleich zu reinem Weizenstroh aufgrund des schlackebedingten Versuchsabbruchs nicht möglich. Trotz der erheblichen Minimierung der Gesamtstaubemissionen liegen die gemessenen Werte mit Stroh aber stets über dem Grenzwert von 20 mg/Nm^3 der Stufe 2 der 1. BImSchV für Holz- und Nicht-Holzbrennstoffe. Um diesen Grenzwert sicher zu unterschreiten, wäre mit den problematischen Brennstoffen ein Staubabscheider erforderlich. Dieser würde durch die Additivierung mit Kaolin aber entlastet und könnte eventuell kostengünstiger ausgelegt werden. Die staubreduzierende Wirkung des Kaolins lässt sich auch durch die Abnahme des berechneten molaren Cl/Si-Verhältnisses beschreiben (Index für die K-Freisetzung).

Die Messung der Staub-Partikelgrößenverteilung zeigt, dass der Hauptanteil der gemessenen Gesamtstaubemissionen aus der PM_{10} -Fraktion besteht. Bei der Additivierung der Brennstoffe mit Kaolin wird auch vorwiegend die PM_{10} -Fraktion vermindert, denn die Messung der Partikelanzahl zeigte hier eine Abnahme. Lediglich bei Pappelhackschnitzeln führte die Zugabe von Kaolin zu einer Erhöhung der Partikelanzahl. Die Verteilung der Partikelanzahl innerhalb der PM_{10} -Fraktion zeigte mit der Additivierung teilweise eine Zunahme der ultrafeinen Partikel bei gleichzeitiger Abnahme der gröbereren Partikel und umgekehrt. Hier konnte aber kein eindeutiger Trend festgestellt werden. Bei den Mischungen aus Holz und Weizenstroh zeigte sich dagegen eine prozentuale Verlagerung der Partikelanzahl in Richtung gröberer Partikel mit steigendem Strohanteil.

Ein störungsfreier Anlagenbetrieb war – außer mit reinem Weizenstroh – mit allen Brennstoffen über die 8 h Vollastbetrieb plus 2 h Aufheizphase gegeben. Bei reinem Weizenstroh musste der Versuch nach ca. 3 h wegen extremer Schlackebildung abgebrochen werden. Bei den Brennstoffen mit einem Aschegehalt von 4,8 m-% und darüber musste die Aschebox ein- bis zweimal pro Versuchstag entleert werden. Hier sollte der Kessel mit einer automatischen Ascheaustragung ausgestattet sein.

Die optische Bewertung der Kesselaschen zeigt eine starke Verschlackung für Weizenstroh und für Mischungen aus Holz und Weizenstroh. Eine deutliche Verbesserung wird nur bei einem sehr hohen Holzanteil erreicht. Sonnenblumenspelzen zeigten eine mäßige, Pappel und Gras eine geringe Neigung zur Verschlackung. Bei der optischen Bewertung der Kesselaschen hinsichtlich der Größe der Schlackepartikel zeigte sich ein deutlich positiver Effekt der Additivierung mit Kaolin bei Weizenstroh und Sonnenblumenspelzen, jedoch ein negativer Effekt bei Pappel und Gras. Zu demselben Ergebnis kommt auch die Bewertung des „Sintering Degree“ – eine Methode für die visuelle Klassifizierung des Verschlackungsgrads, bei der zusätzlich zur optischen Bewertung auch noch die Festigkeit der Schlackebrocken beurteilt wird. Die Rückstandsuntersuchung mittels Siebanalyse zeigt einen überwiegend positiven Effekt durch eine deutliche Abnahme bei den größten Schlacketeilchen, d. h. die Siebfraction $> 3,15 \text{ mm}$. Lediglich bei Gras erhöht sich der Anteil der Ascheagglomerate $> 3,15 \text{ mm}$ durch die Zugabe von

Kaolin. Bei Mischungen von Holz mit Stroh wurden die Schlackebrocken mit zunehmendem Holzanteil kleiner.

Neben der Charakterisierung der angefallenen Bettaschen wurden die Brennstoffe auch mittels zweier neuartiger Methoden zur direkten Bestimmung der Verschlackungsneigung bewertet: PASSA-Methode und Slag Analyzer. Beide Methoden sind derzeit noch nicht vollständig entwickelt. Die PASSA-Methode weist bei diesen „schwierigen“ Brennstoffen – insbesondere wenn sie additiviert sind – noch Schwächen auf. Beispielsweise wird durch die zwar versinterte, jedoch lose vorliegende „pelletförmige“ Asche schon ein „Slag-Index“ von 1 erreicht, obgleich gar kein verglaster Rückstand am Tiegel anhaftet. Hier könnte zukünftig durch eine Modifizierung der Methode hinsichtlich Haltedauer, Endtemperatur oder Bewertung des anhaftenden Anteils eine bessere Differenzierbarkeit bei der schlackebezogenen Brennstoffbeurteilung erreicht werden.

Der Slag Analyzer liefert hinsichtlich der optischen Rückstands-Bewertung der reinen Brennstoffe ähnliche Ergebnisse wie die Kesselversuche. Allerdings muss bei Brennstoffen mit hohen Aschegehalten, zu denen auch die additivierten Brennstoffe zählen, der Versuchsbrennstoff teilweise so stark mit dem Referenzbrennstoff (Holzpellets) verdünnt werden, dass die Bewertung des Versuchsbrennstoffs hier fragwürdig ist. Bei den additivierten Brennstoffen unterscheiden sich die Schlackebrocken meist deutlich von den Kesselaschen.

Vergleicht man den berechneten „Slag Index“ für Schlacketeilchen $> 3,15$ mm aus der PASSA-Methode und aus dem Slag Analyzer mit den realen Kesselaschen, so ist festzustellen, dass der Slag Analyzer die Realität des Versuchskessels besser abbildet. Die PASSA-Methode kann zwischen additivierten und stark verschlackenden Brennstoffen nicht unterscheiden. Und auch unter den stark verschlackenden Brennstoffen ist derzeit keine Differenzierung möglich. Allerdings ist der apparative und zeitliche Aufwand für den Slag Analyzer wesentlich größer als bei der PASSA-Methode, weshalb eine Weiterentwicklung der PASSA-Methode als die vielversprechendere Alternative anzusehen ist.

Der Vergleich der Glühverluste der Kesselaschen deutet darauf hin, dass die Additivierung den Kohleausbrand positiv beeinflusst und offenbar durch die Einbindung des Kaliums in Kalium-Aluminium-Silikaten eine Bildung von Carbonaten und flüchtigen anorganischen Verbindungen in der Asche vermindert wird. Auch bei der Mischung von Holz und Weizenstroh ließ sich eine Reduzierung des Glühverlusts bei 550 °C und 815 °C im Vergleich zu Holzpellets beobachten. Dieser Effekt war allerdings vor allem für den Glühverlust bei 550 °C nicht so stark ausgeprägt wie bei den additivierten Weizenstrohpellets.

Schlussfolgerungen. Aus den vorgestellten Ergebnissen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Additivierung problematischer Biomassebrennstoffe mit Kaolin stellt eine interessante Option für die Reduzierung von Staub- und CO-Emissionen und zur Reduzierung der Schlackeproblematik bei Agrarbrennstoffen dar.

- Eine Brennstoffadditivierung kann bei vielen Agrarbrennstoffen jedoch nicht als alleinige Maßnahme zur Unterschreitung der Emissionsgrenzwerte angesehen werden, insbesondere beim Staub. In der Kombination mit dem Kaolineinsatz kann eine nachgeschaltete Staubminderungseinrichtung allerdings besonders wirkungsvoll sein.
- Die CO- und Staubminderung durch Kaolin kann auch mit einigen Nachteilen verbunden sein. Kaolin hat den Effekt, dass eventuell im Brennstoff vorhandener Chlor und Schwefel weniger stark in die Asche eingebunden wird und somit verstärkt HCl bzw. SO₂ gebildet und freigesetzt werden können. Bei den chlor- und schwefelarmen Holzbrennstoffen tritt dieser Nachteil allerdings nicht auf.
- Der gegebenenfalls erhöhte HCl- und SO₂-Ausstoß erhöht bei den entsprechenden Brennstoffen auch das Risiko von Hochtemperaturkorrosion. Bei der Anlagenplanung für Kaolin-additivierte Brennstoffe sollte dies durch Wahl geeigneter korrosionsstabiler Materialien beachtet werden.
- Folglich sind die größten Einsatzvorteile für Kaolin bei den chlor- und schwefelarmen Kurzumtriebsplantagenhölzern zu suchen, die für ihre durchweg emissionskritische Verbrennung – insbesondere in kleineren Anlagen – bekannt sind [61].
- Bei Weizenstrohbrennstoffen erscheint es vorteilhafter, den Brennstoff mit Holz zu mischen, als Additive zu verwenden. Das liegt auch an den negativen Effekten beim HCl- und SO₂-Ausstoß. Auch andere Studien kommen zu diesem Schluss [83] [84].
- Die Zumischung von Holzpellets zu Strohpellets ist eine wenig wirksame Maßnahme zur Vermeidung von Schlackeproblemen. Nur bei sehr hohen Holzanteilen in der Mischung kann die Verschlackung wirksam begrenzt werden.
- Die Ergebnisse legen einen (sehr moderaten) Anstieg der NO_x-Emissionen durch Kaolinzugabe nahe, sobald beim Kohlenmonoxid nennenswerte Kaolin-bedingte Minderungseffekte eintreten. Mit Blick auf die neuen Emissionsgrenzwerte sollte dieser mögliche NO_x-Anstieg in die Planung einbezogen werden (z. B. beim Weiterbetrieb von älteren Heizwerken, die durch einen Kaolineinsatz die neuen Grenzwerte der 44. BImSchV oder MCPD einhalten sollen).
- Die Additivierung mit Kaolin reduziert die Probleme mit größeren Schlacke-Agglomerationen. Bei pelletierten Brennstoffen behält die verbliebene Asche aber ihre Original-Pelletform bei. Das mag in Vorschubrostfeuerungen mit leistungsstarker Entschung kein Problem darstellen, die weichen gesinterten „Pellets“ könnten aber in Abwurf Feuerungen (z. B. in Pelletöfen) oder in anderen Festbettfeuerungen Probleme mit der Luftzufuhr bereiten.
- Methoden, mit denen die Verschlackungsneigung von Brennstoffen direkt bestimmt werden, wie z. B. die PASSA-Methode, sollten dahingehend modifiziert werden, dass sie zwischen dem kompletten Aufschmelzen der Probe (Anteil der am Tiegel anhaftenden Schmelzmasse), wie z. B. bei Strohasche, und den losen, weniger kritischen Schlacke-Agglomeraten unterscheiden.

- Für den legalen Einsatz von Kaolin als Additiv zur Verbesserung der Verbrennungseigenschaften von Holz- und Agrarbrennstoffen muss in Deutschland noch ein eindeutiger rechtlicher Rahmen geschaffen werden (vgl. Unterkapitel 2.6).

Abstract

The aim of this study was the modification of agricultural biofuels to allow for low emission combustion in domestic biomass boilers without slagging or other ash related problems. Four agricultural biomasses were additivated with kaolin. Fuel blends were produced from wheat straw and woody biomass. All fuels were combusted in a 30 kW moving grate biomass boiler for ash rich fuels while emissions and slag formation were measured. Due to additivation or fuel blending, total particulate matter and CO emissions were reduced by 53 to 77 % and by 69 to 95 %, respectively. At the same time, slag formation (determined as the mass of agglomerates > 3.15 mm) strongly declined. For fuels containing high amounts of sulphur or chlorine, kaolin additivation may lead to increased HCl and SO_x emissions. Moreover, NO_x-formation may be higher during combustion of additivated fuels (up to 21 %). Overall, additivation with kaolin or blending of fuels might be an interesting option for the utilization of agricultural biomasses. The selection of the optimal upgrading method should consider the chemical and physical biomass properties and address the minimum amount of additive or blending ratio to achieve a sufficient reduction of emissions and slagging.

In a reviewed scientific journal paper, the authors of this study have made the major findings and methods applied available in English language (see reference [63]).

Quellenverzeichnis

- [1] AMANDUS KAHL GMBH & Co. KG (2014): Kahl Fachmatrizenpressen für unterschiedlichste Einsatzbereiche. Typenübersicht. Reinbek bei Hamburg: Amandus Kahl GmbH & Co. KG, 2 Seiten
- [2] BÄFVER, L. S.; RÖNNBÄCK, M.; LECKNER, B.; CLAEISSON, F.; TULLIN, C. (2009): Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin. *Fuel Processing Technology*, Jg. 90, Nr. 3, S. 353-359
- [3] BOMAN, C.; NORDIN, A.; BOSTRÖM, D.; ÖHMAN, M. (2004): Characterization of Inorganic Particulate Matter from Residential Combustion of Pelletized Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, Jg. 18, Nr. 2, S. 338-348
- [4] BRUCE, P. Y.; LAZAR, T. (2013): *Organische Chemie. Studieren kompakt*; 5., aktual. Aufl. (2. Aufl. der dt. Ausgabe). Pearson Studium – Media Packs. München: Pearson Studium, 1165 Seiten, ISBN 978-3-86894-102-9
- [5] BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I.; BOMAN, C.; REBLING, A.; MACK, R.; HARTMANN, H. (2019): Guidelines for advanced fuel and boiler design. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "BIOFLEX!" – Clean and flexible use of new difficult biomass fuels in small to medium-scale combustion. March 2019. Graz: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, 31 Seiten. URL: <https://bioflex-eranet.eu/media/2019/07/20190703-Guidelines-for-advanced-fuel-and-boiler-design.pdf> (Stand: 20.07.2019)
- [6] BRUNNER, T.; WOHLMÜTHER, M.; KANZIAN, W.; OBERNBERGER, I.; PICHLER, W. (2015): Additivierung Guideline – How to utilise inorganic additives as a measure to improve combustion related properties of agricultural biomass fuels. In: BAXTER, D.; OBERNBERGER, I. (Hrsg.): EUBCE 2015. Proceedings. 23rd European Biomass Conference & Exhibition. Messe Wien. Congress & Exhibition Center. Wien, Österreich. 1.–4. Juni. Florenz: ETA-Florence Renewable Energies. S. 1-11
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV), in der Fassung vom 01.02.2010. *Bundesgesetzblatt*, Teil I, Jg. 61, Nr. 4, S. 38-56
- [8] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2017): Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV), in der Fassung vom 08.06. *Bundesgesetzblatt*, Teil I, Jg. 68, Nr. 33, S. 1440-1467
- [9] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG), in der Fassung vom 17.05.2013. *Bundesgesetzblatt*, Jg. 64, Nr. 25, S. 1274-1311

- [10] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ – LAI (2017): Auslegungsfragen/Vollzugsempfehlungen/Hinweise zur Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV., Stand 23.06.2017 URL: https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/2017_36_lai_handlungsempfehlung_feuerungsanlagen_1513173460.pdf (Stand: 29.08.2019)
- [11] CALDERÓN, C.; GAUTHIER, G.; JOSSART, J.-M. (2017): AEBIOM Statistical Report – European Bioenergy Outlook 2017. Full Report. Mitarbeiter: Archambeau, P.; Gailliez, T.; Hemeleers, N.; Langue, F.-P. Brüssel: European Biomass Association (AEBIOM), 264 Seiten
- [12] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2005): pr CEN TS 15370: Feste Biobrennstoffe. Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche. Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen. Deutsche Fassung. Brüssel: Comité Européen de Normalisation (CEN). 10 Seiten
- [13] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) (2019): Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung zur Einführung der Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen sowie zur Änderung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. 44. BImSchV vom 13. Juni 2019, in der Fassung vom 19. Juni 2019. Bundesgesetzblatt, Teil I, Jg. 70, Nr. 22, S. 804-828
- [14] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH (2016): Corrodur 4034. Werkstoffdatenblatt X46Cr13 – 1.4034. Witten: Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG, 5 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (1997): DIN 51719: Prüfung fester Brennstoffe. Bestimmung des Aschegehaltes. Berlin: Beuth, s. p.
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2000): DIN 51727: Prüfung fester Brennstoffe. Bestimmung des Chlorgehaltes. Entwurf, vorgesehen als Ersatz für Ausgabe 1976-07 (Ausgabedatum März 2000). Berlin: Beuth, s. p.
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2001): DIN ISO 3310: Analysensiebe. Technische Anforderungen und Prüfung. Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe. (ISO 3310-1:2000). Berlin: Beuth, s. p.
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2009): DIN EN ISO 11885 Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007), deutsche Fassung EN ISO 11885:2009, September 2009. Berlin: Beuth, s. p.
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 303: HEIZKESSEL. Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen. Nenn-Wärmeleistung bis 500 kW. Teil 5: Begriffe. Anforderungen. Prüfungen und Kennzeichnung. Englische Fassung prEN 303-5:2011. Berlin: Beuth, s. p.
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN 51724-3: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Schwefelgehaltes – Teil 3: Instrumentelle Verfahren. Juli 2012. Berlin: Beuth, s. p.
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN 51732 Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff – Instrumentelle Methoden. Juli 2014. Berlin: Beuth, s. p.

- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-1: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014), deutsche Fassung EN ISO 17225-1:2014; September 2014. Berlin: Beuth, 62 Seiten
- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-2: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets (ISO 17225-2:2014), deutsche Fassung EN ISO 17225-2:2014; September 2014. Berlin: Beuth, 13 Seiten
- [24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-6: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets (ISO 17225-6:2014), deutsche Fassung EN ISO 17225-6:2014; September 2014. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-7: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 7: Klassifizierung von nicht-holzartigen Briketts (ISO 17225-7:2014), deutsche Fassung EN ISO 17225-7:2014; September 2014. Berlin: Beuth, 10 Seiten
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 16559: Biogene Festbrennstoffe – Terminologie, Definitionen und Beschreibungen, deutsche Fassung EN ISO 16559:2014; Berlin: Beuth, 46 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 18265: Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten (ISO 18265:2013), deutsche Fassung EN ISO 18265:2013; Februar 2014. Berlin: Beuth, s. p.
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16967: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Hauptelementen – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015), deutsche Fassung EN ISO 16967:2015; Juli 2015. Berlin: Beuth, 22 Seiten
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16994: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor (ISO 16994:2015), deutsche Fassung EN ISO 16994:2015; Juli 2015. Berlin: Beuth, 20 Seiten
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16948: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff (ISO 16948:2015), deutsche Fassung EN ISO 16948:2015; September 2015. Berlin: Beuth, 18 Seiten
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18846: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an Feingut in Mengen von Pellets (ISO/DIS 18846:2015), deutsche und englische Fassung prEN ISO 18846:2015; Entwurf Mai 2015. Berlin: Beuth, 21 Seiten
- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17831-1: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts – Teil 1: Pellets (ISO 17831-1:2015), deutsche Fassung EN ISO 17831-1:2015. Mai 2016. Berlin: Beuth, 16 Seiten

- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17829: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets (ISO 17829:2015), deutsche Fassung EN ISO 17829:2015. März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18122: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes (ISO 18122:2015), deutsche Fassung EN ISO 18122:2015. März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18123: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen (ISO 18123:2015), deutsche Fassung EN ISO 18123:2015. März 2016. Berlin: Beuth, 16 Seiten
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17828: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte (ISO 17828:2015), deutsche Fassung EN ISO 17828:2015. Mai 2016. Berlin: Beuth, 17 Seiten
- [37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 14780: Biogene Festbrennstoffe – Probenherstellung (ISO 14780:2017), deutsche Fassung EN ISO 14780:2017; August 2017. Berlin: Beuth, 35 Seiten
- [38] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 17294-2 Wasserbeschaffenheit – Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) – Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope (ISO 17294-2:2016), deutsche Fassung EN ISO 17294-2:2016, Januar 2017. Berlin: Beuth, s. p.
- [39] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18135: Biogene Festbrennstoffe – Probenahme (ISO 18135 Biogene Festbrennstoffe – Probenahme (ISO 18135:2017)), deutsche Fassung EN ISO 18135:2017; August 2017. Berlin: Beuth. 73 Seiten
- [40] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18125: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes (ISO 18125:2017), deutsche Fassung EN ISO 18125:2017; August 2017. Berlin: Beuth. 67 Seiten
- [41] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18134-2: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren (ISO 18134-2:2017), deutsche Fassung EN ISO 18134-2:2017; Mai 2017. Berlin: Beuth. 13 Seiten
- [42] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI); PROPELLETS AUSTRIA; PROPELLETS.CH; EUROPEAN PELLET COUNCIL (EPC) (2015): ENplus Qualitätszertifizierung für Holzpellets. ENplus-Handbuch für Deutschland, Österreich und die Schweiz. Version 3.0, August 2015. Gesamtausgabe. Berlin: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI), 100 Seiten
- [43] DIN CERTCO (2015): Zertifizierungsprogramm Holzpellets zur Verwendung in Kleinf Feuerungsstätten – DINplus. Stand: Juni 2015. Berlin: DIN Certco, URL: https://www.dincertco.de/media/dincertco/dokumente_1/zertifizierungsprogramme/Holzpellets_Zertifizierungsprogramm.pdf (Stand: 29.08.2019)
- [44] DÖRING, S. (2011): Pellets als Energieträger. Technologie und Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag, 257 Seiten, ISBN 978-3-642-01623-3

- [45] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2015): Verordnung (EU) 2015/1189 der Kommission vom 28. April 2015 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Festbrennstoffkesseln, in der Fassung vom 21.07.2015. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 58, Nr. L 193, S. 100-114
- [46] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). COM (2016) 767 final – 2016/0382 (COD). Europäische Kommission (Hrsg.). Brüssel, 136 Seiten
- [47] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, in der Fassung vom 05.06.2009. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 52, Nr. L 140, S. 16-62
- [48] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2015): Richtlinie (EU) 2015/2193 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 zur Begrenzung der Emissionen bestimmter Schadstoffe aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in die Luft, in der Fassung vom 28.11.2015. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 58, Nr. L 313, S. 1-19
- [49] FLEITER, T.; ELSLAND, R.; REHFELDT, M.; STEINBACH, J.; REITER, U.; CATENAZZI, G.; JAKOB, M.; RUTTEN, C.; HARMSSEN, R.; DITTMANN, F.; RIVIÈRE, P.; STABAT, P. (2017): Heat Roadmap Europe 2050 – A low-carbon heating and cooling strategy. Profile of heating and cooling demand in 2015. Heat Roadmap Europe 2050 – Report, Nr. D 3.1. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung., 70 Seiten
- [50] GUNTAMATIC HEIZTECHNIK GMBH (2012): Hackgutfeuerung POWERCHIP/POWERCORN 50 Sonder. Planung und Installation – PI_PH_DE-B31-009-V15-0312. Peuerbach: Guntamatic Heiztechnik GmbH, 60 Seiten
- [51] HANS KOHLER AG (2014): Härtevergleichstabelle. Tabelle 7.10. In: HANS KOHLER AG (Hrsg.): Kohler Edelstahl – Bleche, Band, Stabstahl, Rohre, INOX – Tôles, feuillards, barres, tubes en INOX. Ausgabe 2012–2014. Zürich: Hans Kohler AG, S. 125
- [52] HANS KOHLER AG (2014): Technische Tabellen und Informationen. Tabellen 7–7.6. In: HANS KOHLER AG (Hrsg.): Kohler Edelstahl – Bleche, Band, Stabstahl, Rohre, INOX – Tôles, feuillards, barres, tubes en INOX. Ausgabe 2012-2014. Zürich: Hans Kohler AG, S. 115-121
- [53] HERAVI, M. M.; DERIKVAND, F.; RANJBAR, L.; OSKOOIE, H. A. (2008): Kaolin. A recyclable catalyst for the synthesis of 1,5-benzodiazepines. Heteroatom Chemistry, Jg. 19, Nr. 2, S. 215-217
- [54] HOLZMANN, G.; WANGELIN, M.; BRUNS, R. (2012): Natürliche und pflanzliche Baustoffe. Rohstoff – Bauphysik – Konstruktion. 2., aktual. u. erw. Aufl. Springer Studium. Wiesbaden: Springer Vieweg, 394 Seiten, ISBN 978-3-8348-8302-5

- [55] HÜLSMANN, T.; HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2018): Additivierung von Hackschnitzeln zur Emissionsminderung in Feuerungsanlagen. Abschlussbericht, gefördert unter dem Az. 32975 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Laufzeit 16.01.2017–15.11.2017. Stand: 08.06.2018. Technische Universität Hamburg (Hrsg.). Hamburg: Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), 52 Seiten
- [56] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2016): CEN/TC 335; EN ISO 18847: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikeldichte von Pellets und Briketts (ISO 18847:2016). Genf, Schweiz: International Organization for Standardization (ISO), 17 Seiten
- [57] JÖLLER, M.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2007): Modeling of aerosol formation during biomass combustion for various furnace and boiler types. *Fuel Processing Technology*, Jg. 88, Nr. 11–12, S. 1136-1147
- [58] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2016): *Energie aus Biomasse. Grundlagen. Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl.* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 1755 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [59] KNUDSEN, J. N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. (2004): Transformation and Release to the Gas Phase of Cl, K and S during Combustion of Annual Biomass. *Energy & Fuels*, Jg. 18, Nr. 5, S. 1385-1399
- [60] KOČÍ, K.; MATĚJKA, V.; KOVÁŘ, P.; LACNÝ, Z.; OBALOVÁ, L. (2011): Comparison of the pure TiO₂ and kaolinite/TiO₂ composite as catalyst for CO₂ photocatalytic reduction. *Catalysis Today*, Jg. 161, Nr. 1, S. 105-109
- [61] KUPTZ, D.; DIETZ, E.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; MACK, R.; WIESBECK, M.; BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2018): Holz hackschnitzel aus dem Kurzumtrieb. Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 56. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 163 Seiten, ISSN 1614-1008
- [62] LAMBERG, H.; TISSARI, J.; JOKINIEMI, J.; SIPPULA, O. (2013): Fine Particle and Gaseous Emissions from a Small-Scale Boiler Fueled by Pellets of Various Raw Materials. *Energy & Fuels*, Jg. 27, Nr. 11, S. 7044-7053
- [63] MACK, R.; KUPTZ, D.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2019): Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler. *Research paper. Biomass and Bioenergy*, Jg. 125, Nr. 6 (June), S. 50-62
- [64] NØRGAARD JENSEN, T.; HANSEN, H. O.; DAHL, J. (2012): *Measuring Solid Biofuels' Slag Tendencies during Combustion. May 2012. Second Draft May 2012.* Aarhus C: Danish Technological Institute, 35 Seiten
- [65] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; MANDL, C.; KERSCHBAUM, M.; SVETLIK, T. (2017): Strategies and technologies towards zero emission biomass combustion by primary measures. *Energy Procedia*, Jg. 120, Nr. 8 (August), S. 681-688
- [66] ÖHMAN, M.; BOMAN, C.; HEDMAN, H.; EKLUND, R. (2006): Residential Combustion Performance of Pelletized Hydrolysis Residue from Lignocellulosic Ethanol Production. *Energy & Fuels*, Jg. 20, Nr. 3, S. 1298-1304

- [67] PANERU, M.; BABAT, S.; MAIER, J.; SCHEFFKNECHT, G. (2016): Role of potassium in deposit formation during wood pellets combustion. *Fuel Processing Technology*, Jg. 141, S. 266-275
- [68] PICHLER, W. (2015): Produktion von additivierten Pellets aus landwirtschaftlichen Biomassen. In: GRAZ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, PROCESS & PARTICLE ENGINEERING ARBEITSGRUPPE „ENERGETISCHE BIOMASSENUTZUNG“; BIOS BIOENERGIESYSTEME GMBH; AUSTRIA, HOLZFORSCHUNG (Hrsg.): Additiveinsatz zur Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Biomasse-Brennstoffe. Workshop. Campus Infeldgasse, Technische Universität Graz, Hörsaal HS FSI 1, 24. April: Institut für Prozess- und Partikeltechnik der Technischen Universität Graz, S. 1-12
- [69] POPOV, V. L. (2015): Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. 3., aktual. Aufl.: Springer Vieweg, 404 Seiten, ISBN 978-3-662-45974-4
- [70] SAARSTAHL AG (2016): Werkstoff-Datenblatt Saarstahl – 51CrV4 (50CrV4). Saarstahl Werkstoff-Datenblatt . Völklingen: Saarstahl AG, 1 Seite
- [71] SALZMANN, R.; NUSSBAUMER, T. (2001): Fuel Staging for NO_x Reduction in Biomass Combustion. Experiments and Modeling. *Energy & Fuels*, Jg. 15, Nr. 3, S. 575-582
- [72] SCHÖN, C.; HARTMANN, H.; FELDMIEIER, S.; DAHL, J. (2014): Vereinfachte Qualitätsbewertung von Holzpellets bezüglich Verschlackung – die PASSA-Methode. Vortrag am 21.05.2014 in Straubing. In: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZ-ZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ) (Hrsg.): Programm 18. Sitzung des Arbeitskreis Holzfeuerung. 18. Sitzung des Arbeitskreis Holzfeuerung. Schulungs- und Ausstellungszentrum (SAZ), TFZ Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), S. 1-11
- [73] SCHÖN, C.; HARTMANN, H.; SCHWABL, M.; FELDMIEIER, S.; DAHL, J.; RATHBAUER, J.; VEGA, D.; BOMAN, C.; ÖHMAN, M. (2014): New evaluation strategies regarding slag prediction in pellet boilers. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBV); LANDWIRTSCHAFTSKAMMER STEIERMARK; BIOENERGY 2020+ GMBH; KLIMA- UND ENERGIEFONDS (HRSG.): Tagungsband – Proceedings. 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz – 4. Central European Biomass Conference (CEBC). Graz. 15. - 18. Januar. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV), S. 238
- [74] SCHORN, S.; OSTERHAMMER, H.; SIMON, W.; WOLFSRIED, S.; DIETER, D. BAUMGÄRTEL, U.; HOLTkamp, M.; MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA; MINERALOGICAL ASSOCIATION OF CANADA; JEWELS FINE MINERALS; STEINKAUTZ (2018): Kaolinit (Kaolin). *Mineralienatlas Lexikon Kirchseeon*, 10 Seiten URL: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?mineral=Kaolinit>, (Stand: 18.08.2018)
- [75] SEREIKKA, T.; BUINEVIČIUS, K.; PUIDA, E.; JANČAUSKAS, A. (2017): Biomass combustion research studying the impact factors of NO_x formation and reduction. *Agronomy Research*, Jg. 15, Nr. S1, S. 1223-1231
- [76] SOMMERSACHER, P.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2011): Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, Jg. 26, Nr. 1, S. 380-390

- [77] SOMMERSACHER. P.; BRUNNER. T.; OBERNBERGER. I.; KIENZL. N.; KANZIAN. W. (2013): Application of Novel and Advanced Fuel Characterization Tools for the Combustion Related Characterization of Different Wood/Kaolin and Straw/Kaolin Mixtures. *Energy & Fuels*, Jg. 27, Nr. 9, S. 5192-5206
- [78] STEENARI. B.-M.; LINDQVIST. O. (1998): High-Temperature Reactions of Straw Ash and the Anti-Sintering Additives Kaolin and Dolomite. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 14, Nr. 1, S. 67-76
- [79] TISSARI, J.; SIPPULA, O.; KOUKI, J.; VUORIO, K.; JOKINIEMI, J. (2008): Fine Particle and Gas Emissions from the Combustion of Agricultural Fuels Fired in a 20 kW Burner. *Energy & Fuels*, Jg. 22, Nr. 3, S. 2033-2042
- [80] UMWELTBUNDESAMT (2017): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2016. Datenstand: Februar 2017. Umweltbundesamt (Hrsg.). Für Mensch & Umwelt – Hintergrund. Dessau-Roßlau., 24 Seiten
- [81] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2006): VDI 2066: Messen von Partikeln. Staubmessung in strömenden Gasen. Blatt 1: Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI). 111 Seiten
- [82] XIONG, S.; BURVALL, J.; ÖRBERG, H.; KALEN, G.; THYREL, M.; ÖHMAN, M.; BOSTRÖM, D. (2008): Slagging Characteristics during Combustion of Corn Stovers with and without Kaolin and Calcite. *Energy & Fuels*, Jg. 22, Nr. 5, S. 3465-3470
- [83] ZENG, T.; POLLEX, A.; WELLER, N.; LENZ, V.; NELLES, M. (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*, Jg. 212, Nr. 1 (January) S. 108-116. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.036
- [84] ZENG, T.; WELLER, N.; POLLEX, A.; LENZ, V. (2016): Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances. Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. *Fuel*, Jg. 184, S. 689-700

Anhang: Guidelines for advanced fuel and boiler design

Guidelines for advanced fuel and boiler design



Authors:

Thomas Brunner and Ingwald Obernberger
BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Austria

Christoffer Boman and Anders Rebling
Umeå University, Thermochemical Energy Conversion Laboratory, Department of Applied
Physics and Electronics, Umeå University (UmU), Sweden

Robert Mack and Hans Hartmann
Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources
(TFZ), Straubing, Germany

Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project “*BIOFLEX!*” – Clean and flexible
use of new difficult biomass fuels in small to medium-scale combustion

March 2019

Disclaimer

The concepts and design guidelines presented are a result of a scientific project. The implementation and utilisation of the research results is the decision of each individual person/company. The authors undertake no liability for the utilisation and implementation of the research work and research results as well as for consequences of the resulting technology development or plant operation.

Contact:

Thomas Brunner and Ingwald Obernberger
BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Hedwig-Katschinka-Straße 4
A-8020 Graz, Austria
brunner@bios-bioenergy.at

Download of Guidelines: <https://bioflex-eranet.eu/>

Preface

The project *BIOFLEX!* (Clean and flexible use of new difficult biomass fuels in small to medium-scale combustion) has been supported by ERA-NET Bioenergy under its 9th Joint Call for Research and Development in the period between 01/01/2016 and 31/03/2019. ERA-NET Bioenergy is a network of national research and development programmes focusing on bioenergy. Within the 9th Joint Call for Research and Development six countries participated in this coordinated activity: Austria, Germany, the Netherlands, Poland, Switzerland, Sweden and the United Kingdom. The mission of ERA-NET Bioenergy is to enhance the quality and cost-effectiveness of European bioenergy research programmes, through coordination and cooperation between EU Member States.

Small (<500 kW_{th}) to medium scale (0.5-10 MW_{th}) combustion plants are destined to grow in importance in a future decentralised, sustainable European energy supply scenario. The flexible utilisation of new, “challenging” biomass fuels in these plants is one of the major challenges for the coming years. While large-scale plants have become individually tailored to cheaper, low-grade fuels, small-scale applications today rely on chemically untreated stem wood fuels (log wood, wood chips, wood pellets) and medium-scale applications additionally on selected cheaper assortments such as forest residues as well as waste wood. Other resource efficient fuels like wood from short rotation forestry (SRF – e.g. poplar and willow), herbaceous fuels (e.g. straw) as well as residues from agriculture and industry (shells, kernels, sludges etc.), however, inevitably gain importance also for these applications. However, due to their chemical composition, these fuels are challenging in terms of combustion behaviour and emissions. Increased S, Cl and N contents lead to increased gaseous HCl, SO_x and NO_x emissions. Elevated ash contents with high levels of e.g. K, Si and P cause problems with slagging, deposit formation and fine particulate emissions, of which especially the latter is growing in relevance with the EU-Ecodesign directive (relevant for small-scale plants) and the Medium Combustion Plant (MCP) directive. However, in small-scale combustion, individually tailored solutions and expensive secondary measures for emission reduction are economically not viable and for medium-scale plants limited knowledge regarding the problems associated to the utilisation of “challenging” biomass fuels so far held back the development of Flexi-fuel combustion systems, leaving this market sector almost unexploited. Therefore, the development of cost efficient and general primary concepts for increased fuel flexibility is urged in order to boost the innovation, enlarge market potential and deliver clean and efficient technology solutions.

Against this background the overall objective of *BIOFLEX!* was to increase fuel flexibility in the small to medium-scale heat and power production sector towards more challenging solid biomass fuels that do not compete with food production. This should be reached by further development and implementation of fuel design and combustion system design related measures enabling clean and efficient utilisation of bio-residues, by-products and other resource efficient energy crops at low emissions, high efficiencies and high availabilities. Therefore, the project focused on the following objectives:

- To improve the understanding of ash transformation issues in combustion by fundamental ash transformation research and by connecting ash transformation with the combustion.

- To investigate the application of additives and fuel blending in order to make new problematic feedstock better applicable in small to medium-scale biomass combustion systems.
- To further develop combustion technologies for the small (<500 kW_{th}) and the medium (0.5 – 10 MW_{th}) capacity range by means of primary measures.
- To perform testing of these measures in appropriately adapted testing plants in cooperation with furnace and boiler manufacturers.
- To develop guidelines for the design of appropriate low emission combustion technologies and for appropriate fuel design of the identified fuels.

In order to reach these objectives, a consortium of 7 research partners and 5 industrial partners from 4 European countries collaborated within *BIOFLEX!* (see next page).

This document summarizes the outcomes of the investigations regarding the design of appropriate low emission small and medium-scale combustion technologies and regarding appropriate fuel design strategies, i.e. the utilisation of fuel additives and the application of fuel blending in order to broaden the range of applicable biomass fuels. With its recommendations which have been derived based on scientific investigations as well as comprehensive test runs at small-scale and pilot-scale combustion plants it should support furnace and boiler manufacturers as well as biomass fuel producers and traders concerning the optimization of their products and the development and design of new products. Moreover, these guidelines shall provide information for plant operators regarding the risks and opportunities of the utilisation of so-called challenging biomass fuels.

Susanne Paulrud (RISE)
Project coordinator

Ingwald Obernberger, Thomas Brunner,
Christoffer Boman, Anders Rebbling,
Robert Mack and Hans Hartmann

Authors of the guideline

BIOFLEX! project partners

Project coordinator:



RISE Research Institutes of Sweden
Built Environment / Energy and Circular Economy
Borås, Sweden

Further RTD partners:



Umeå University, Department of Applied Physics and Electronics, Sweden



Luleå University of Technology, Division of Energy Science, Sweden



Chalmers University of Technology, Division of Fluid Dynamics, Sweden



BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Graz, Austria



Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ)
Straubing, Germany



IEn - Institute of Power Engineering, Poland

Industrial partners:



Opcon AB, Sweden



POLYTECHNIK Luft- und Feuerungstechnik GmbH



KWB Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH



AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG



BTI – Biuro Techniczno Inżynierskie Jan Gumkowski,
Poland

Table of contents

1	Introduction and objectives	1
2	Impact of fuel quality on the combustion process.....	2
2.1	Parameters influencing combustion performance - overview	2
2.2	Properties that define challenging biomass fuels	5
3	Approach for the utilization of challenging biomass fuels	7
4	Fuel design for use of challenging biomass fuels.....	7
4.1	Introduction to fuel design.....	7
4.1.1	The concept of fuel design	7
4.1.2	Fuel blending	9
4.1.3	Fuel additives.....	10
4.2	Application of mineral fuel additives	10
4.2.1	Kaolin as fuel additive	10
4.2.2	Successful examples with kaolin additivation	11
4.3	Guideline for kaolin additivation – fuel-, additive- and practical considerations	14
4.4	Summary and recommendations	17
5	Boiler concepts for challenging biomass fuels.....	17
5.1	Fuel-flexible combustion plant operation – general aspects	17
5.2	Design related aspects for small-scale combustion plants	18
5.2.1	Fuel feeding system	18
5.2.2	Grate concept and de-ashing of the grate	18
5.2.3	Application of advanced air staging concepts including flue gas recirculation..	19
5.2.4	Avoidance of false air intake.....	21
5.2.5	Furnace cooling.....	21
5.2.6	Boiler design and boiler cleaning.....	21
5.2.7	Secondary measures regarding emission control	22
5.2.8	Process control concept.....	22
5.3	Design related aspects for medium-scale combustion plants	22
5.3.1	Fuel feeding system	22
5.3.2	Grate concept and de-ashing of the grate	23
5.3.3	Application of advanced air staging concepts including flue gas recirculation..	23
5.3.4	Avoidance of false air intake.....	25
5.3.5	Boiler design and boiler cleaning.....	26

5.3.6	Secondary measures regarding emission control	26
5.3.7	Process control concept	27
5.4	CFD based boiler design as an efficient measure to achieve a higher fuel flexibility .	27
6	Acknowledgements.....	28
7	Related literature	29

1 Introduction and objectives

The overall objective of the ERA-NET Bioenergy project *BIOFLEX!* was to perform research and development work to increase fuel flexibility in small (<500 kW_{th}) and medium-scale ((0.5 to 10 MW_{th}) biomass combustion plants towards the use of more challenging solid biomass fuels such as wood fuels from short rotation coppice (SRC) and agricultural residues (e.g. straw, grass). When applied in conventional fixed-bed combustion systems, which were initially designed for wood fuels, these fuel assortments are well known to cause problems with gaseous and particulate emissions as well as ash melting (slagging).

In order to make current state-of-the-art combustion systems suitable for an utilisation of these fuels the project followed two main strategies. The first strategy was related to investigations regarding the application of fuel blending and utilisation of inorganic fuel additives with the main focus to better control problems with ash melting and to reduce fine particulate emissions. This strategy is in the following referred to as “*fuel design*”. The second strategy aimed at further development of existing wood combustion technologies in the small and medium-scale capacity range to enhance their fuel flexibility towards challenging fuels with elevated particulate emissions as well as low ash melting temperatures. Therefore, preliminary primary measures should be appropriately implemented into the furnace concepts.

To achieve these aims, fundamental lab-scale studies, simulation model development, CFD simulation based design studies as well as test runs at conventional and appropriately modified small and medium-scale biomass combustion plants were performed. In these guidelines the results of the *BIOFLEX!* project related to the work on fuel design and combustion technology development are summarised in a way that they become broadly applicable. Furnace and boiler manufacturers, operators of biomass combustion plants as well as biomass fuel producers and traders are therefore the target groups which shall benefit from the project results via these guidelines.

In the first part of the guidelines (section 2), the impact of different fuel properties on the combustion process is discussed to improve the basic understanding for the aspects concerned. Based on this discussion so-called “challenging” biomass fuels are identified and characterised with respect to their combustion related crucial properties, and the overall approach followed within *BIOFLEX!* is introduced (section 3).

Subsequently in section 4, different ash chemical and fuel design related aspects concerning a deliberate fuel manipulation towards high-performance non-woody fuel application are elaborated. Particular focus is here set on using fuel additives based on clay minerals (kaolin) and existing examples of successful applications. Different technological aspects and calculation procedures for dosage of added kaolin are presented as this mineral additive had intensively been investigated in the *BIOFLEX!* project and seems interesting in terms of the reduction of particulate emissions and slagging problems.

Finally, in section 5, technical and operational measures to create a furnace, which can cope with challenging fuels, are presented. This requires a deeper view on how to generally handle fuels with elevated fuel ash content (e.g. grate design, avoidance of ash melting by temperature control or advanced air staging and flue gas recirculation below the grate, robust

layout of de-ashing systems, automatic boiler cleaning, etc.). In particular, fuels with a high potassium, chlorine and silicon content are regarded, as they pose specific risks for slagging, deposits and aerosol formation. Distinction is made between small-scale boilers and medium-scale appliances. Several relevant options are presented and evaluated, such as geometric design concepts, air staging concepts, CFD-based optimization, combustion control strategies as well as secondary measures for PM-, NO_x- HCl- and SO_x-emission abatement are addressed.

2 Impact of fuel quality on the combustion process

2.1 Parameters influencing combustion performance - overview

The chemical composition of biomass fuels can vary concerning the concentrations of the main elements (C, H, O, N), sulphur and chlorine as well as of the ash content respectively the concentrations of ash-forming elements. In the following the impact of the most relevant parameters on furnace and boiler operation are briefly summarised.

In general, the C, H and O contents as well as the ash content determine the **gross calorific value (GCV)** of a biomass fuel. The **moisture content, the H-content and the GCV** determine the **net calorific value (NCV)**, the most relevant parameter for utilisation in a combustion plant. The moisture content however, also significantly influences the storability and energy density of a biomass fuel.

Besides its influence on the GCV, the **ash content** has to be considered concerning the de-ashing system, ash storage, ash utilisation, the grate design as well as the fact that high ash contents lead to higher entrainment of ash particles from the fuel bed with the flue gas and consequently to increased deposit formation, erosion and particulate matter emissions. Therefore, the ash content is an important parameter to be regarded during plant design.

The **ash melting behaviour** of biomass ashes is characterized by the chemical composition. In general, problematic ash melting in biomass combustion is related to the formation of low-temperature melting compounds of different alkali (K+Na) silicates, phosphates and/or chlorides. With increasing contents of Ca, Mg and Al less problems with ash melting usually occur. The ash melting behaviour affects the combustion technology and the process control system and is an important factor concerning slagging, deposit formation and operational safety.

Bulk density and especially the **energy density** (=bulk density * NCV) of the fuel have also to be considered concerning fuel transport, storage, and feeding systems. In this respect pelletized biomass fuels show clear advantages compared to non-densified materials due to their higher bulk and energy density. The **amount of fines** is relevant concerning the appropriate selection of the combustion technology and the process control. Regarding small-scale systems, the amount of fines is also of big relevance concerning the fuel feeding system (e.g. this is a quality parameter for pellets). The amount of fines is an important factor regarding particle entrainment (i.e. they can cause strain formation, elevated fly ash emissions and incomplete burnout).

The **N content** is of special relevance concerning NO_x emissions. Although with increasing N-content of the fuel the conversion rate to NO_x decreases, the absolute NO_x emissions increase.

S and Cl are relevant elements concerning gaseous emissions (SO_x, HCl), fine particle (aerosol) formation as well as ash deposit formation on boiler tube surfaces. Ash deposits are mainly formed by alkali metal salts such as K₂SO₄ and KCl. High Cl-contents of the fuel therefore also increase corrosion related problems especially due to ash deposits with high Cl-contents. Moreover, Cl reduces the ash melting temperature of deposits. Due to these deposit formation and corrosion related issues, significant impact of the S- and Cl-contents on high-temperature corrosion of heat exchanger surfaces (most relevant for superheaters in steam boilers) is given. Furthermore, it has to be taken into account, that increasing S and Cl concentrations in the flue gas also shows impacts on low-temperature corrosion in boilers, economisers, filters and air pre-heaters, either by acid dew point corrosion or by formation of corrosive hygroscopic salts.

Regarding the utilisation of so-called “difficult” biomass fuels, **ash formation processes** and **ash related problems** are of major relevance. For a better understanding of the terminology applied in this document, a brief overview regarding ash formation in fixed-bed biomass combustion processes is given in the following. In fixed-bed combustion processes several ash fractions occur which are usually categorised as follows.

Grate ashes are solid residues from the combustion process, which have to be removed from the grate after conversion of the volatile matter and charcoal combustion. They mainly consist of oxides, sulphates, carbonates, silicates and phosphates of refractory elements such as Ca, Mg, Al and Fe, as well as of the more semi-volatile species K and Na. Moreover, they contain minor amounts of heavy metals. Depending on the charcoal burnout quality they may also contain certain amounts of organic carbon.

Coarse fly ashes are formed by fuel, charcoal and ash particles entrained from the fuel bed with the flue gas and typically have particle sizes between 1 and some 100 µm. The amount of coarse fly ashes formed depends on the ash content of the fuel, the amount of fines in the fuel and on the gas velocities in the region near the grate. The main constituents of coarse fly ash are about the same as those of grate ash, however, they may also contain a certain amount of carbonaceous species (e.g. entrained charcoal particles). Coarse fly ash contributes to deposit formation in the furnace and the boiler as well as to particulate matter emissions.

Fine particulate matter (particles smaller than 1 µm) is formed from volatile and semi-volatile species released from the fuel bed into the gas phase. Consequently, the chemical composition of the fuel, respectively the release behaviour of the elements concerned, plays a determining role. Regarding chemically untreated biomass fuels, K is the most relevant element regarding the formation of fine particulate matter, however, also S, Cl, Na, P and easily volatile heavy metals such as Zn and Pb provide contributions. This is also illustrated by Figure 1, which shows - based on database values from combustion tests - the dependency of the fine particulate matter emissions (PM₁ = particulate matter smaller than 1 µm) downstream the boiler and upstream any particle precipitation device on the K, Na, Zn and Pb content in the fuel.

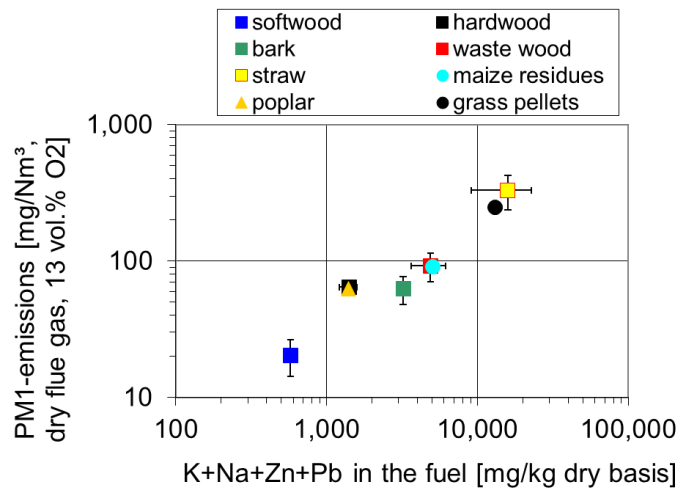


Figure 1: PM₁ emissions as a function of the concentration of aerosol-forming species (K + Na + Zn + Pb) in the fuel [1]

In the gas phase these species undergo reactions and later, when the gas is cooled down, they are subjected to gas-to-particle conversion processes (nucleation, condensation). The composition of the resulting solid compounds as well as the position in the plant, where these gas-to-particle conversion processes occur, depend on the species released from the fuel bed and the profile of the temperatures and gas-phase atmospheres (reducing, oxidising) along the pathway of the flue gas through the plant (combustion chambers, heat exchangers). For chemically untreated biomass fuels, K, S and Cl are the elements mainly determining these processes. Regarding agricultural fuels also P-compounds may contribute to fine particulate matter formation. Minor contributions come from easily volatile heavy metals such as Zn and Pb. Depending on the gas phase burnout quality achieved during the combustion of the combustible gases released from the fuel bed, this fraction may also contain certain amounts of elemental carbon (soot = EC) and organic carbon components (OC). Fine particulate matter contributes to deposit formation in boilers and to the dust emissions (fine particulate emissions). Moreover, especially for K and Cl rich fuels, the formation of KCl-rich deposits may cause boiler tube corrosion, especially in steam boilers.

The fractionation into grate ashes, coarse fly ashes and fine particulate emissions partly depends on the plant design (e.g. grate area, air staging) and to a relevant extent also on the contents of easily volatile, semi-volatile and non-volatile ash forming elements in the fuel. However, in conventional small-scale biomass boilers the grate ash usually amounts up to 90 w% of the total ashes formed, while in medium-scale fixed bed combustion plants the amount of fly ashes may increase up to 40 wt%, which is mainly due to the higher gas velocities in the region near the grate prevailing in medium-scale combustion plants. Consequently, regarding the fly ash emissions, about 90 % of the fly ashes in small-scale appliances are fine particulate matter emissions while in medium-scale combustion plants typically the contribution of coarse fly ashes to the total fly ash emissions downstream the boiler is higher than the contribution of fine particulate matter emissions, this is due to higher particle entrainment from the grate.

2.2 Properties that define challenging biomass fuels

Widening the feedstock range of small and medium-scale biomass furnaces towards agricultural fuels and biomass residues is associated with a number of operational and plant design related problems which are related to the different chemical compositions of these fuels. Within the *BIOFLEX!* project, the utilisation of biomass assortments which are typical for these fuel types has been investigated. These so-called challenging fuels investigated were poplar (from short rotation forestry), wheat straw, grass and sunflower husks. With these fuels a broad range of different chemical compositions are covered, and based on the chemical analyses of these fuels it is also explained in the following, why they are assessed as challenging regarding their utilisation in conventional combustion plants which are designed for wood fuels.

In Table 1, some relevant parameters of the fuels investigated within the project are presented based on analyses data from single samples gained from the project. Comparison with database values prove that the fuel samples analysed are typical for the respective fuel assortment. Additionally, two fuel indices are mentioned which can be used for a preliminary assessment regarding ash melting properties and potentials for fine particulate emissions. To highlight relevant critical fuel properties, the “challenging” biomass fuels are in the following assessed by comparing to typical wood pellets which comply with requirements according to EN 17225-2, class A1.

Table 1: Relevant parameters of the fuels investigated within the *BIOFLEX!* project

Explanations: w.b. ... wet basis; d.b. ... dry basis; *) wood pellets according to EN 17225-2, class A1

		Wood pellets *)	Wheat straw pellets	Sunflower husk pellets	Grass pellets	Poplar pellets
Moisture content	wt% w.b.	5.5	8.5	6.9	9.7	7.9
Ash content	wt% d.b.	0.34	4.3	2.9	8.5	2.2
C	wt% d.b.	50.7	47.5	51.3	45.4	49.5
H	wt% d.b.	6.1	5.8	6.3	5.8	6.0
N	wt% d.b.	<0.1	0.44	0.65	2.5	0.27
S	mg/kg d.b.	52.1	717	1,490	2,260	384.0
Cl	mg/kg d.b.	64.3	2,090	383.0	3,600	75.0
Ca	mg/kg d.b.	811	2,860	3,810	7,560	6,010
Si	mg/kg d.b.	166.0	9,460	490.0	9,630	211.0
Mg	mg/kg d.b.	131.0	767	1,910	3,350	554
Al	mg/kg d.b.	25.1	145.0	27.8	988	31.2
Na	mg/kg d.b.	14.6	42.1	6.4	369.0	19.9
K	mg/kg d.b.	414.0	8,450	7,450	21,200	3,070
Fe	mg/kg d.b.	27.5	117.0	83.2	721	55.4
P	mg/kg d.b.	54.7	638	752	3,610	873
Zn	mg/kg d.b.	9.0	6.8	14.5	28.1	42.3
Gross calorific value	kJ/kg d.b.	20,080	18,880	20,200	18,350	19,600
Fuel indexes						
K+Na+Zn	mg/kg d.b.	437.6	8,499	7,471	21,597	3,132
(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)	mol/mol	0.69	5.3	1.33	2.8	0.66

Compared to wood pellets, the C and H contents as well as the gross calorific values of wheat straw pellets, grass pellets and poplar pellets are slightly lower while for sunflower husk pellets

they are slightly higher. The N-content increases from wood pellets over poplar, wheat straw and sunflower husks to grass pellets, and therefore also increasing NO_x emissions have to be expected in this order.

Regarding the S content, all fuels show significantly higher values compared to wood pellets. They increase from poplar over wheat straw and sunflower husks to grass pellets. While the Cl content of poplar pellets is well comparable to regular A1-wood pellets, sunflower husk pellets show a slightly increased Cl content. The Cl content of wheat straw and grass pellets are significantly higher (35 and 60 times the Cl content of wood pellets, respectively).

All fuel assortments show, compared with wood pellets, significantly increased ash contents, rising from poplar over sunflower husks and wheat straw to grass pellets, which show the highest ash content (8.5 wt% d.b). From the comparison of the most relevant ash forming elements it can be concluded that ashes which are formed during poplar and sunflower husk combustion are dominated by Ca, K and Mg. Grass and wheat straw pellets, however, contain much more Si and also high amounts of K which have a significant impact on the ash melting behaviour. The molar ratio of (Si+P+K)/(Ca+Mg+Al) can be used as a first preliminary indicator to assess the melting behaviour of biomass ashes [1]. In Figure 2 database values showing the trend of decreasing ash melting temperatures with an increasing value of this fuel index are presented. Poplar pellets with a very low value of 0.66 and sunflower husk pellets (1.33) are expected to be non-problematic while ash melting and slagging related problems are expected to increase during combustion of grass pellets (index value of 2.8) and especially of wheat straw pellets (index value of 5.3).

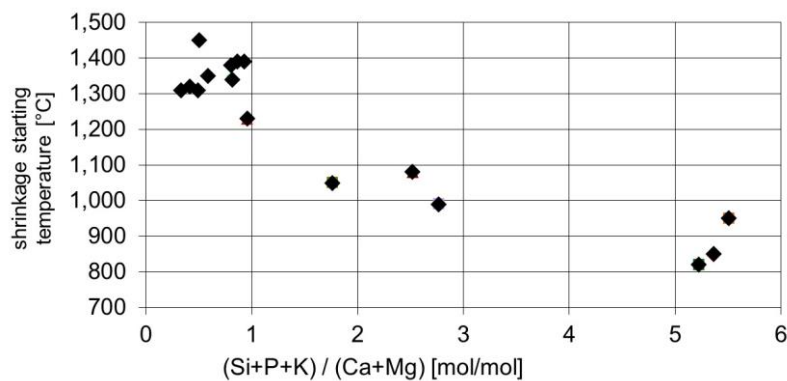


Figure 2: Shrinkage-starting temperature versus the molar ratio of (Si + P + K)/(Ca + Mg)

As mentioned before, semi-volatile elements (K, Na) and easily volatile heavy metals (Zn) provide major contributions to the formation of fine particulate emissions. This is reflected by the fuel index K+Na+Zn+Pb (see Figure 1). There is a trend of increasing fine particulate emissions with increasing value of this index [1]. As it can be revealed from Table 1, for chemically untreated biomass fuels the index is strongly dominated by the K content and due to the very low Pb contents, the fuel index has been reduced to K+Na+Zn. However, the potential for fine particulate emissions significantly increases from wood pellets over poplar, sunflower husks and wheat straw to grass pellets, which show a 50-fold value of softwood pellets. Accordingly, when considering the data in Figure 1, the potential for fine particulate matter emissions is increased by the factor of 20 when comparing wood pellets and sunflower husk pellets.

Consequently, the most relevant combustion related issues which have to be considered regarding the utilisation of the fuels mentioned are increased NO_x emissions, ash melting, fine particulate emissions and risks related to high and low temperature corrosion.

3 Approach for the utilization of challenging biomass fuels

Regarding the approach for implementing measures to improve fuel flexibility it has in general to be distinguished between small-scale and medium-scale combustion systems. Small-scale combustion systems are typically produced as serial products. Consequently, the implementation of combustion technology related optimisation measures is restricted by the specific framework conditions of the underlying concepts with regard to furnace geometries and combustion technologies applied. Significant changes can usually only be implemented in newly developed product series. Hence, especially for small-scale applications, the fuel design strategy developed within *BIOFLEX!* can significantly broaden the range of applicable feedstocks since it aims at positively influencing crucial fuel properties by the targeted addition of inorganic additives without any need for changes in the combustion technology.

Medium-scale combustion plants however are usually designed considering the framework conditions at a specific client. Consequently, it can be decided from case to case to which extent measures to improve fuel flexibility shall be implemented. Hence, when considering the guidelines for fuel flexible combustion technology design proposed in this report, a significant step towards higher fuel flexibility can be achieved. Of course the guidelines for fuel flexible furnace design can additionally be combined with the application of additivated fuels in order to further improve operation performance and reduce emissions.

Besides the development of fuel design strategies and guidelines for fuel flexible furnace and boiler concepts, *BIOFLEX!* focused on the commercial viability of the resulting measures. Therefore, all technologies developed within the project, have also been assessed in terms of their techno-economic performance. In this context it has to be emphasized that all measures proposed in this report have proven not only their technical applicability but also an acceptable economic performance. However, even though under the economic framework conditions assumed within *BIOFLEX!* generally positive results could be achieved, it is important to carefully evaluate the additional costs generated by specific measures for enhanced fuel flexibility and the cost savings achieved by the application of an in terms of combustion behaviour challenging but cheaper biomass feedstock.

4 Fuel design for use of challenging biomass fuels

4.1 Introduction to fuel design

4.1.1 The concept of fuel design

The term **fuel design** has more frequently been used in the literature during the last years, to describe the approach of using primary fuel based measures to increase the fuel quality and combustion performance in biomass combustion and gasification applications. While the conventional fuel indices available [e.g. 1, 3] may indicate potential ash and emission related effects during combustion of a fuel respectively fuel blend, the concept of fuel design implies a clearer strategy of actively changing the fuel ash composition and influence the system

towards a certain direction. This can preferably be implemented either by blending the primary fuel with a specific secondary fuel or by using a fuel additive, with the aim to achieve the desired effect. In this perspective, the concept of fuel design was developed and defined as a novel tool to design the ash and to reduce/avoid unfavourable ash chemical transformations and their related operational and emission effects in biomass combustion processes [4, 5]. The basis for applying this kind of fuel design concepts is to consider the composition of the fuels and additives involved, derived by proper and relevant fuel characterisation. The fuel composition should be viewed by its molar concentrations (mole/kg_{dry fuel}) of major ash forming elements (K, Na, Ca, Mg, Al, Si, P, S, and Cl) and some trace elements (e.g. Zn). The relative concentrations of these main ash forming elements are then considered in relation to fundamental ash chemistry (e.g. thermodynamic considerations, primary oxide stability, etc.), to assess and predict the major ash chemical behaviour of different fuels [6].

To further enable a prediction of the specific ash chemical reaction pathways and thereby also develop more generally applicable fuel design concepts, the main ash forming elements can initially be grouped as elements forming positively charged ions acting as Lewis acids (K, Na, Ca, Mg, Fe, Al) and negatively charged molecular (Si, P, S) or atomic ions (Cl) acting as Lewis bases during the ash transformation reactions in the combustion process [4]. This will enable a more reaction-based approach, which is lacking in conventional fuel indices and thermodynamic equilibrium models. This fuel design approach has for example been applied to guide the mixing strategy for co-combustion of seaweed with the energy crop *Miscanthus* [7]. As described by basic inorganic high-temperature chemical considerations, all major ash forming elements (except Cl) are assumed to initially be oxidized in so-called “primary” ash transformation reactions. Furthermore, also subsequent secondary and tertiary ash transformation reactions occur to a large extent driven by the reaction routes of the different oxides formed and their transformation products. In addition, also different physical fuel and ash properties and combustion process related considerations need to be considered, to fully assess the potential real-life ash and emission related effects in different combustion plants [6]. To achieve this kind of complex assessment of the combustibility and performance of different fuels and the potentials with different fuel design concepts, simplified guidelines have to be developed.

Within the *BIOFLEX!* project, some fuel design concepts were therefore developed, applied and evaluated as novel tools to mitigate *slagging tendencies* and *fine particle emissions* during combustion of challenging biomass fuels in small and medium scale grate boilers and burners. Three different fuel design concepts were evaluated, i.e. *i)* fuel additivation with the mineral additive kaolin, *ii)* fuel blending with an ash rich biomass and sludge, and *iii)* fuel blending with the same ash rich biomass and pure softwood. In Figure 3, the concentrations of major ash forming elements for the studied fuels within *BIOFLEX!* are shown on a mole/kg_{fuel} basis, ordered according to their Lewis acid-base properties, i.e. the weakest Lewis acid forming element at the left and the weakest Lewis base forming element to the right. This enables a first assessment of potential ash and emission related effects, and forms the basis for defining suitable fuel design concepts. It is obvious from this graph that both the poplar and sunflower husk fuels have a surplus of e.g. K, Ca, and Mg, which will imply that oxides and carbonates of these element will dominate the ash, causing low slag formation and some fine particle emissions (caused by K release). On the opposite, both wheat straw and grass fuels have high

K/Ca ratios together with high Si and Cl contents and for grass also relatively high P and S concentrations. These fuels are therefore expected to cause severe slagging (silicate melts) as well as high fine particulate emissions from K-chlorides. Accordingly, the fuel design strategies to mitigate potential problems, needs to be adjusted from case to case.

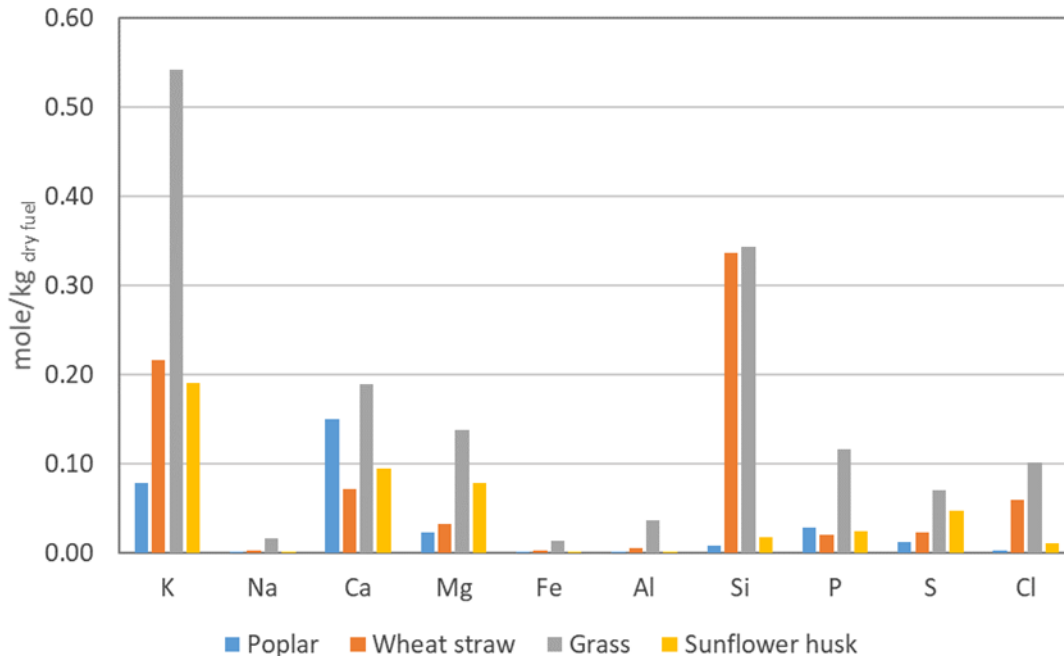


Figure 3: Molar concentration of major ash forming elements (“fuel fingerprint”) in the four biomass fuels studied within *BIOFLEX!*

4.1.2 Fuel blending

The use of fuel blending between ash rich “challenging” biomass can be an effective strategy as a primary measure to reduce ash related operational problems and particle emissions. Different concepts exist, e.g. biomass-biomass, biomass-peat, biomass-industrial residues/sludge, and biomass-coal [8]. Co-combustion of biomass with peat has, for example, shown significant potential for both, reduction of slagging tendencies and fine particulate matter (PM) emissions in grate fired systems. Recommendations for the selection of the peat type and the blending strategy have already been defined [9]. Furthermore, the potential use and positive effects by blending ash rich (e.g. high Si and K contents) biomass fuels with phosphorus rich sewage sludge have been studied for fluidized beds [10], although they are less explored for fixed-bed applications. However, a detailed understanding of the ash chemical mechanisms and suitability of different measures for different fuels as well as technological and economical aspects are still not fully elucidated, understood and demonstrated.

Within *BIOFLEX!*, the concept of blending wheat straw (high Si and K) with municipal sewage sludge (MSS) was studied, with respect to the influence on combustion performance, slag formation, gaseous and particulate emissions. In addition, combustion tests with blends of wheat straw with softwood were performed, mainly as a tool to “dilute” the ash content and

enable good combustion performance. These blending tests will not be further discussed in this guideline.

4.1.3 Fuel additives

The use of fuel additives can also be an effective measure to combat ash and emission related problems in biomass combustion applications. Fuel additives may either be mixed and introduced into the boiler together with the regular biomass fuel (e.g. for wood chips), or co-pelletized with the raw material into the produced pellet fuel. In both cases this can be done either via “dry” powder ad-mixing or via nozzle injections of a water slurry. Additive for combustion applications can be sorted into different types according to their composition, i.e. additives based on calcium, phosphorus, sulphur, aluminium and aluminium-silicates [8]. Calcium based additives (e.g. CaO, CaCO₃) may primarily be used to change the melting properties (increase the melting temperature) of the ash and reduce slagging tendencies in grate fired applications [11]. Further, the use of aluminium-silicates as additives during combustion of challenging biomass has been extensively discussed in the scientific literature. The most studied Al-silicate based additive in this context is probably the clay kaolin, consisting mainly of the mineral kaolinite [Al₂Si₂O₅(OH)₄]. Kaolin has been shown to have great potential for capturing alkali metals, especially potassium, and incorporate them into stable high-temperature melting Al-silicate phases. This effect can therefore both, reduce the release of fine particle and deposit forming alkali species from the fuel bed and at the same time reduce the melting and slag formation in grate boilers/burners [8].

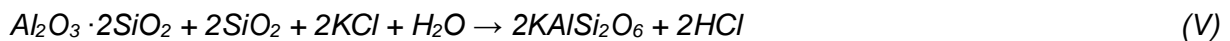
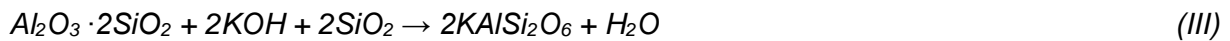
Within *BIOFLEX!*, the main fuel design method applied and evaluated was therefore the use of the mineral additive kaolin for four ash rich challenging biomass fuels, i.e. poplar, wheat straw, grass and sunflower husks. In this work, the concept was further evaluated for different fuels in grate fired applications and, together with previous research and experiences, specific strategies and recommendations could be defined and published in this guideline.

4.2 Application of mineral fuel additives

4.2.1 Kaolin as fuel additive

As mentioned earlier, research has clearly shown that the mineral kaolinite in the kaolin clay is the relevant component. Alkali vapours react with the mineral and form solid products that do not melt at normal grate combustion temperatures such as leucite (KAISi₂O₆), kalsilite (KAISiO₄), microcline (KAISi₃O₈), or analogue compounds containing Na. Upon heating, kaolin undergoes transformations, where the first step is a dehydroxylation at around 450-600°C where the kaolinite loses water and transforms into meta-kaolin (Al₂O₃·2SiO₂), a type of amorphous aluminium silicate, that effectively reacts with gaseous alkali species [12]. Upon further heating, the meta-kaolin transforms to a spinel structure at 980°C and further to mullite at 1100°C, both different forms of Al-silicate that are assumed to capture alkali less effectively than meta-kaolin [13]. Thus, the efficiency of kaolin in capturing alkali metals may decrease at higher temperatures which are in a range that is relevant for the conditions on the grate in fixed bed boilers. When introducing a biomass ash, all ash and kaolin transformation details are not fully understood. However, the transformations of the kaolin and subsequent reactions between the meta-kaolinite and various gaseous alkali species (here as potassium

compounds) can be described by the following overall formulas [13] where (I) shows the transformation into meta-kaolinite, and II+III show reactions with KOH (g), while IV+V shows reactions with KCl (g).



The additive level is determined based on basic chemical calculations, earlier experiences and some additional considerations. In principal, and to start with, it can be assumed that there is a molar relation of 1:1 between alkali in the fuel $(K+Na)_{fuel}$ and aluminium in the kaolin (Al_{kao}) . Note though that the stoichiometric formula for kaolinite contains two Al atoms. Thus, all alkali in the fuel will have the theoretical possibility to be incorporated in the Al-silicate structure. By considering the concentration of alkali from the standard fuel analysis (given as mg/kg_{dry fuel}) together with the molar weights of the elements of K (39.1 g/mole) and Na (22.99 g/mole) as well as the kaolinite (258.2 g/mole), the additive level in weight-% can be calculated. For normal stemwood based wood fuels (0.3-0.4 weight-% ash), this theoretical (stoichiometric) additivation level will be around 0.15 weight-% kaolin (on dry basis).

However, this initial theoretical level calculated for the kaolin additivation, should be adjusted regarding different considerations, e.g. the actual fraction of kaolinite in the kaolin clay (potential presence of other minerals e.g. quartz and feldspars), and the potential presence of cations already present in the kaolinite/kaolin (e.g. K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Due to the differences in ionic charge, it can be assumed that for each extra (already present) mole of K and Na, one mole of the kaolinite will be occupied, while for each mole of Ca and Mg, two moles of kaolinite will be occupied. In addition, potential reactions between the kaolinite and alkali earth metals (Ca and Mg) already present in the fuel ash, should be considered, especially for woody fuels rich in Ca. All these issues will reduce the "efficiency" of the added kaolin and thus result in a need for increased levels of additivation to achieve the aimed effects. Finally, also physical properties of the kaolin (grain size, moisture content, etc.) needs to be considered as well as more practical operational considerations related to e.g. losses during the supply of the additive, risk for entrainment of unreacted additive particles through the boiler, and too high temperatures on the grate (as mentioned above).

4.2.2 Successful examples with kaolin additivation

A good example for a successful implementation of kaolin was made in the project with short rotation poplar. This poplar was tested both as a chipped fuel and as pellets which were produced from the same raw material. Furthermore, two additivation approaches were tested with poplar, the co-pelletisation of kaolin, and the addition of kaolin after pelletisation (Poplar pellets + 1.5% kaolin "powdered"). For chipped poplar the addition of the kaolin was performed

separately via a supplemental screw conveyor which was added to the fuel feeding system. For the test runs a small-scale (30 kW) moving grate boiler was used. The duration of the test runs was 8 h of steady state full load operation for each fuel. 4 TPM (total particulate matter) measurements, each with a sampling duration of 30 min, were evenly distributed over the 8 h test runs. Gaseous emissions were measured continuously throughout the test runs and evaluated for the same timeframes as the TPM sampling.

Figure 3 shows the results regarding the CO emissions and Figure 4 shows the TPM emissions for all poplar fuels tested within the project. The CO emissions for pure poplar pellets (1,389 mg/Nm³ related to dry flue gas and 13 vol% O₂) as well as the TPM emissions (156 mg/Nm³ related to dry flue gas and 13 vol% O₂) were very high, which is typical for this fuel when used in small-scale boilers [15]. By co-pelletized additivation with 1.5 w-% kaolin the CO emissions could be reduced by 92 % and the TPM emissions by 71 % compared to pure poplar. When the pure poplar pellets were powdered with 1.5 w-% kaolin, the CO and TPM emission reductions were somewhat lower (-76 % and -56 %, respectively), but still the measure proved to be quite effective.

When non-pelletized and non-additivated poplar chips were applied the CO emissions were a little bit lower than for pellets (886 mg/Nm³), and the TSP emissions (179 mg/Nm³) were slightly higher. But with the separately added kaolin (approx. 1.5 w-%) via a screw conveyor the CO emissions were again largely reduced by 95 % and the TSP emissions declined by 44 % for these wood chips.

The results of the combustion tests clearly show that a significant reduction of both CO and TPM emissions can be achieved by additivation with kaolin under practical conditions. Furthermore, it can be concluded that co-pelletizing kaolin and poplar is a more effective additivation approach than when kaolin is separately added to the fuel pellets. Several reasons for this observation can be discussed such as; 1) segregation of the kaolin, 2) loss of the kaolin in the fuel feeding system, 3) kaolin entrainment into the flue gas system where it cannot contribute to ash-chemical processes but will rather add to particulate emissions, and 4) less homogeneous mixing for the kaolin with the biomass during separate additivation compared to co-pelletisation. Entrainment of the kaolin with the flue gas is also believed to be correlated with the particle size of the kaolin powder used, however, practical suggestions for a proper choice of a best suitable kaolin texture can yet not be made.

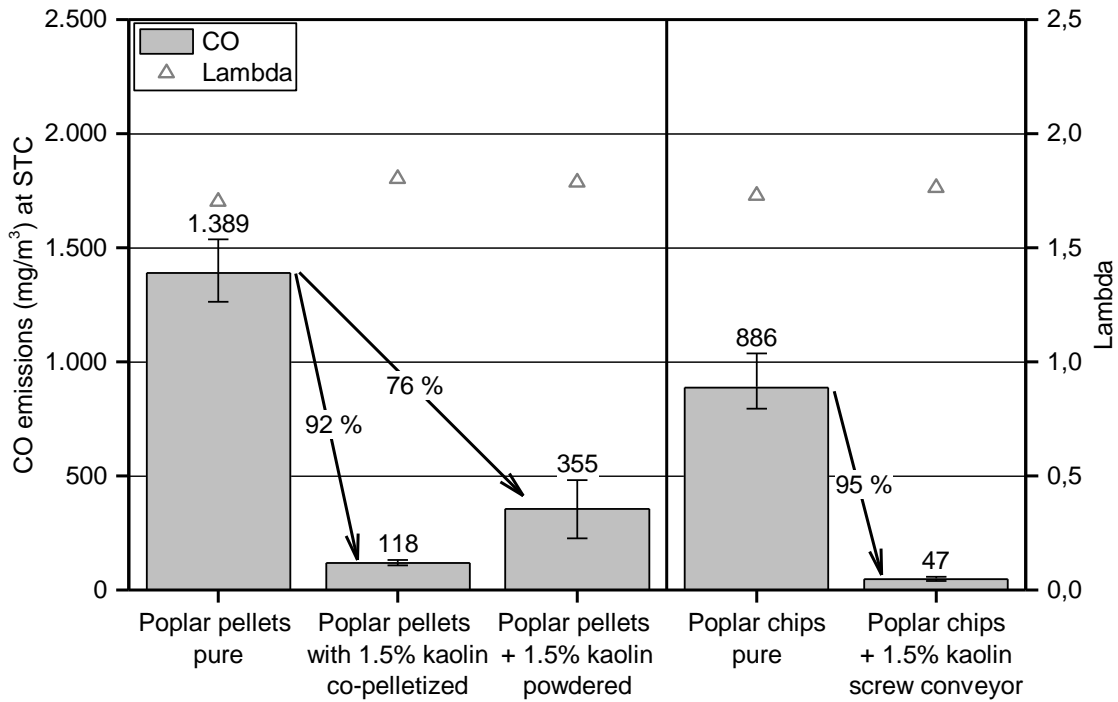


Figure 3: CO emissions for poplar fuels and the different kaolin addition approaches as tested in the project

Explanations: STC = standard testing conditions (dry flue gas, 0 °C, 1013 hPa, based on 13 % O₂)

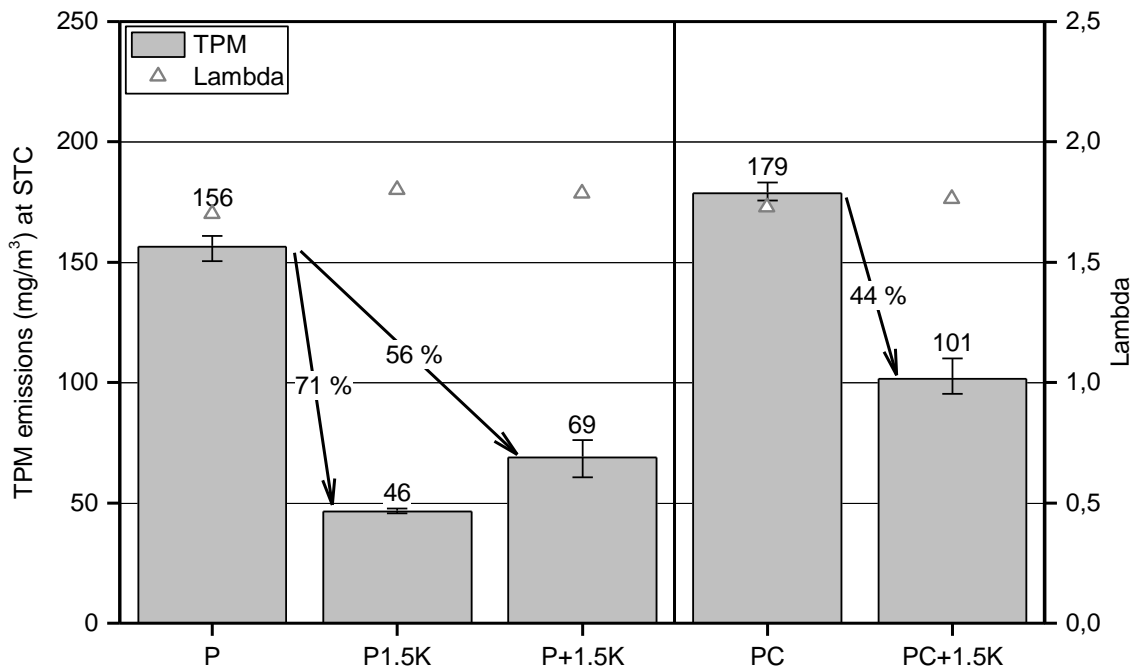


Figure 4: TPM emissions for poplar fuels and the different kaolin addition approaches as tested in the project.

Explanations: STC = standard testing conditions (dry flue gas, 0 °C, 1013 hPa, based on 13 % O₂)

However the additivation with kaolin can also be associated with some disadvantages concerning pollutant emissions, mainly related to the potential for increased SO₂ and HCl emissions. As illustrated by the fuel compositions in Figure 3, this should preferably be relevant for agricultural fuels with high S and Cl contents. The underlying mechanism explaining this effect by kaolin is related to the reduced amount of volatilized K (and Na) that subsequently can react with HCl and SO₂/SO₃ in the flue gases. Thus, higher HCl and SO₂ emissions can be expected, along with the reduced alkali salt containing fine particulate emissions. Within the test runs during the BIOFLEX! project, this effect was seen for sunflower husk, grass and wheat straw concerning SO₂ (Figure 5) and for grass and wheat straw for HCl (Figure 6). For SO₂, this implies that the threshold set by the European MCP (medium plant combustion) directive (i.e. 200 mg/m³ based on 6% O₂) was clearly exceeded for during the tests with sunflower husk and grass pellets, but also during the tests with wheat straw. Most obvious was this case for grass fuel, where the high K/Si ratio (Figure 3) promotes an excess of released K available for aerosol reactions with SO₂ and HCl in the flue gases. However, when K is efficiently captured by kaolin, the emissions of both SO₂ and HCl increase drastically. Consequently, the use of additives for small-scale furnaces seems more promising for problematic agricultural wood fuels with low amounts of chlorine and sulphur, such as poplar fuels from short rotation coppice.

4.3 Guideline for kaolin additivation – fuel-, additive- and practical considerations

Based on new knowledge and experiences gained from the *BIOFLEX!* project, in combination with reported scientific literature and previous experiences from research, development and full-scale tests, the following recommendations regarding the use of fuel additives in general and of kaolin in particular can be defined. This guideline is presented as a step-wise procedure to follow, targeting different steps of the additivation application, and with the intention to support a successful implementation.

- 1. Type of combustion system** where the additivation will be applied – what problems are considered (e.g. slagging, deposit formation, fine particle emissions, total dust emissions) and what is expected to be achieved by the additivation.
 - In small and medium-scale fixed-bed systems (grate boilers and small burners), the main targets for using kaolin as additive are to reduce slagging tendencies and fine particulate emissions. Also deposits formed by alkali salts will be reduced, but they are not often an issue in these applications.
 - Total dust emissions are most often reduced as an effect of less fine PM, but the potential entrainment of coarse mineral particles (kaolin powder) needs to be considered and preferably avoided. The risk for increased slag formation on the grate (only for rather pure wood fuels) should also be assessed from case to case, since in general this is not significant, but still needs to be considered.
- 2. Type of fuel(s) used** presently and expected in a relevant future – in principle three classes can be defined; i) pure wood fuels (stemwood based), ii) ash rich woody energy crops and forest residues, and iii) grass/straw based fuels.

- Separate recommendations are made for these three categories since the variations in ash content and compositions have major effects on the function and applicability of different additives, not least for the kaolin mineral additive.
 - For "clean" woody fuels (e.g. Stemwood based fuels with low Si contents) kaolin will mainly be applied for fine PM emission reduction. However, the risk for slag formation needs to be carefully assessed, and may be controlled by lowering the fuel bed temperature.
 - For Si-rich straw and grass fuels, kaolin has positive effects on both fine PM emissions and slag formation. However, comparably high additive levels are needed to achieve significant effects, and the total system aspects, e.g. material flows, ash handling, legislation (emissions, ash, etc.), techno-economical aspects, etc. need to be carefully assessed.
3. **Additive to use** – in this guideline the focus is on the clay **kaolin** to be used as fuel additive, due to its advantageous properties compared to most other similar aluminium-silicate based minerals. Some quality aspects need to be considered to enable an efficient application, related to both physical and chemical properties of the kaolin.
- Different commercial qualities of kaolin exist, so both technical and economic aspects need to be considered. Quality aspects to consider are e.g. the purity of the kaolin, the grain size, moisture content and the contents of contaminants.
 - High purity of the kaolin, i.e. a high fraction of the kaolinite mineral, low concentrations of K, Na, Ca and Mg as well as low concentrations of heavy metals is preferable. This promotes a more straight forward estimation of the additivation level to optimize the effects and avoid unwanted additional environmental considerations. It should be noted that kaolin as such is dominated by the mineral kaolinite, and will therefore in all cases give the discussed ash chemical effects, although potentially with varying efficiency and with some side-effects that need to be accounted for, depending on the specific kaolin properties.
 - A smaller and homogeneous grain is preferable due to the higher "reactivity" (efficiency) of the additive. However, the risk for entrainment of (small) unreacted mineral dust particles from the bed to the flue gas system should be considered. Optimization studies regarding this issue specifically for fixed-bed systems, have not been reported (not to the authors' knowledge), so both practical, technical and economic aspects should be considered from case to case.
4. **Additivation level** to apply – Examples of additivation levels applied within *BIOFLEX!* are here given, as well as a simple calculation approach and some considerations and recommendations
- In *BIOFLEX!* the kaolin levels applied were calculated first as the theoretical minimum level assuming that 100% of the kaolin is kaolinite, all kaolinite is available for reactions with fuel alkali and no other/practical limitations of the efficiency of the kaolin exist. The applied levels were then increased in the range of +12 to 50%, depending on different considerations (see following paragraphs).

Fuel	Ash content (wt-% db)	Kaolin level (theo. min) (wt-% db)	Kaolin level (applied) (wt-% db)
Poplar	2.2	1.0	1.5
Wheat straw	4.3	2.8	3.4
Grass	8.5	7.0	8.1, 10.5
Sunflower husk	2.9	2.5	2.8

- To calculate the suitable level of kaolin for additivation, the first step is to re-calculate both the fuel and kaolin composition data, for the major ash forming elements, from mg/kg (db - dry basis) to mole/kg (db) by deviding the mass based element content with the respective mole weight (K: 39.1 g/mole, Na: 22.99 g/mole, Ca: 40.08 g/mole and Mg: 24.31 g/mole). The next step is to calculate the theoretical minimum amount (mole) additive $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ needed per kg fuel to capture all alkali metals ($K_{fuel} + Na_{fuel}$), based on the assumptions mentioned above, according to equation 1:

$$Additive_{theo\ min} = (K_{fuel} + Na_{fuel})/2 \quad (Eq. 1)$$

- Further, the potential presence of elements such as K, Na, Ca and Mg in the additive (K_{add} , Na_{add} , ...) should be adjusted for, by considering the fraction of these elements in relation to the concentration of Al in the kaolin (Al_{add}), according to equation 2:

$$Additive_{adj(I)} = Additive_{theo\ min} / ((Al_{add} - K_{add} - Na_{add} - 2(Ca_{add} + Mg_{add})) / Al_{add}) \quad (Eq. 2)$$

- To further also account and adjust for other potential uncertainties and potential limiting effects for the additive functionality, availability and efficiency a factor of e.g. 90% can be assumed, and implemented according to equation 3:

$$Additive_{adj(II)} = Additive_{adj(I)} / 0.9 \quad (Eq. 3)$$

- This efficiency factor may, of course, be adjusted based on case specific conditions and own experiences by the users of this tool. For example, if kaolin is used together with rather pure woody biomasses (Si-poor), Ca in the fuel may interact with the kaolinite, thus lowering the capturing efficiency of K and Na. In that case, somewhat further excess kaolin levels may be suitable. Also aspects such as high fuel bed temperatures and high gas velocities through the fuel bed, may lower the overall efficiency of the kaolin additivation.
- Finally, the molar amount of additive needed per kg fuel, can be re-calculated to mass amount per kg fuel, by considering the molar mass of kaolinite (258.2 g/mole), which also enables the calculation of the wt-% of kaolin applied for the specific additivation case.

5. **Additivation approach;** either co-pelletized or separately as powder mixed with the fuel. An additional option, although not studied within *BIOFLEX!*, is to supply the additive as a slurry to the fuel feeding system. Based on the results from the *BIOFLEX!* project and supported by full-scale tests performed within another Swedish project [14], co-pelletizing the additive with the biomass fuel is recommended from an additive efficiency point of view, and if pellets are used as base fuel. This approach may not be the most suitable in all cases, for different more or less obvious reasons.

- If the additive is supplied separately, a suitable solution for the introduction of the kaolin powder (e.g. separate screw feeder) needs to be applied, preferably docked to the fuel feeding system just before the fuel enters the boiler.
- In full-scale tests, performed in the above mentioned Swedish national project, this approach has proven to be suitable, although it has so far only been applied in short-term tests (some days). In a long-term operation perspective, several aspects related to e.g. varying load conditions, varying fuel quality, durability and maintenance etc, need to be carefully assessed and considered.

6. Implementation considerations – For full-scale implementation of an additivation concept, as with kaolin, several technical, practical, and economical aspects need to be considered. Most of them have not been studied within the *BIOFLEX!* project, and even if rather extensive research has been performed on this topic, very few examples from full scale implementations have been performed, at least as reported in some kind of literature.

- One important experience from the full-scale tests [14] was that the function and efficiency of the kaolin additivation in the used grate boiler clearly was dependent on load conditions, with more favourable conditions for an effective kaolin additivation during low load operation. This kind of practical operational effects in a full-scale application may of course vary considerably from case to case.
- Beside the above mentioned aspects, some specific operation related aspects need certain attention:
 - o precise process control of the boiler and the whole plant is needed to achieve stable load and combustion conditions
 - o possibilities to separately control the primary and secondary air supply in order to adjust the conditions on the grate and to keep the fuel bed temperatures below or in the range of 1,000 °C by appropriate air staging are recommended
 - o stable additivation ratios will be maintained, preferably by co-pelletizing the additive with the biomass (if pellets are used), or by a stable separately controlled additive feeding system (e.g. screw feeder)

4.4 Summary and recommendations

Overall, the use of different fuel design concepts like fuel additives or fuel blending have great potentials to be used as efficient strategies to mitigate ash related operational problems and to reduce fine particulate emissions. Within the project *BIOFLEX!*, the concept of using the clay mineral kaolin as additive in small- and medium scale grate fired biomass systems has been studied, tested and further developed, resulting in the specific recommendations provided in these guidelines.

5 Boiler concepts for challenging biomass fuels

5.1 Fuel-flexible combustion plant operation – general aspects

State-of-the-art small and medium-scale combustion concepts significantly differ regarding several aspects. Typically this concerns the fuel feeding strategies, the grate concepts, the

furnace geometries, the furnace cooling concepts, the air distribution and combustion air supply control concept, the number of sensors applied for process control as well as the process control concepts. Therefore, in the following small and medium-scale combustion plants are discussed separately. The small scale thereby refers to plants with boiler capacities up to 500 kW_{th} and the medium scale to installation with thermal capacities between 500 kW_{th} and 10 MW_{th}.

Modern small-scale biomass boilers are typically designed for the application of high quality wood pellets (EN 17225-2, class A1) and wood chips with restricted moisture and ash contents. The boiler concepts are typically tailored to serial production. Consequently, within one model series, only minor adaptations can be realised to enhance fuel flexibility. Therefore, it is generally meaningful to design new fuel-flexible model series based on existing pellet and wood chip combustion technologies by applying the measures proposed in the following.

In the medium-scale capacity range however, the plant concepts are usually developed based on the constraints of their application at the respective client, thus they are tailored to specific applications. Therefore, a much broader fuel spectrum is typically utilised, mainly comprising wood pellets and wood chips of various qualities regarding moisture and ash content as well as bark. Consequently, application respectively client specific design measures to improve fuel quality can be implemented.

5.2 Design related aspects for small-scale combustion plants

5.2.1 Fuel feeding system

The energy density and particle size of the biomass fuel are the most relevant parameters regarding the design of the fuel feeding system. Therefore, for enhancing the fuel flexibility, the bulk density of the fuel and its particle size are determining parameters. Experience from the test runs performed within *BIOFLEX!* revealed that when utilising pelletised fuels, the common fuel feeding systems of modern pellet boilers can be applied without modifications. In case of chipped and chopped fuels however, the bulk density must be carefully taken into account. For chipped fuels from short rotation forestry (e.g. poplar) common fuel feeding systems as used for conventional wood chips are applicable. Chopped herbaceous fuels (e.g. straw, miscanthus) however, show much lower bulk and energy densities and larger particles, which are typically not suitable for this kind of feeding systems. Therefore, it is recommended to use them in pelletised form only.

5.2.2 Grate concept and de-ashing of the grate

Most challenging biomass fuels are characterised by significantly higher ash contents than wood pellets or wood chips (see Table 1). Therefore, the grate system and especially the de-ashing of the grate play a major role in combustion technology design.

Generally it is of relevance, that the fuel is evenly distributed over the grate in order to avoid uncovered areas. In this respect, a well-designed interface of the fuel feeding system with the first grate section (geometry of the opening from the fuel feeding system to the grate) is needed.

Due to the higher ash content an ash layer quickly forms on the grate which has to be continuously removed. Consequently, the application of moving grate systems with continuous de-ashing is recommended. Movements of the grate elements thereby can support the breaking of sintered ash agglomerates. Moreover, the grate area has to be adjusted to the higher ash contents of the fuels and to the longer residence time needed for a complete charcoal burnout.

These measures support to maintain an evenly distributed primary air supply and to avoid channelling in the fuel bed. Channelling means that zones with high primary air flows through the fuel bed are formed which lead to temperature peaks in the fuel bed and the formation of CO-rich streaks in the gases, which sometimes cannot be fully oxidised in the secondary combustion zone.

Moreover, it has to be considered that pelletised fuels with high ash contents partly keep their shape during combustion. That means that from the fuel pellets ash pellets are formed, which have a much higher volume than granular ashes (see Figure 5). This aspect has to be taken into account regarding the design of the de-ashing of the grate, the de-ashing screws and the ash bin. However, experience from test runs has shown that, if no significant ash sintering occurs, these ash pellets easily disintegrate during transport in a de-ashing screw.

Especially when utilising fuels with low ash melting temperatures, a certain formation of sintered and partly molten ash agglomerates must always be taken into account. Therefore, it is recommended to select a robust de-ashing screw designs, which is also capable to transport and break such ash agglomerates.



Figure 5: Ash pellets on the grate of a small-scale biomass boiler when firing wheat straw pellets

5.2.3 Application of advanced air staging concepts including flue gas recirculation

Ash melting on the grate is one of the most relevant problems when utilising agricultural biomass fuels. The application of advanced air staging in combination with flue gas recirculation has turned out to be an appropriate measure to keep the fuel bed temperatures low and to reduce respectively avoid slagging problems.

5.2.3.1 Furnace geometries

The furnace must have two geometrically well-defined combustion zones, namely a primary combustion chamber (which includes the fuel bed zone) and a secondary combustion chamber.

These zones should be geometrically separated in order to create a dedicated zone with reducing atmosphere in the primary combustion zone, which is also a relevant pre-requisite for a NO_x reduction by primary measures.

The volume of the primary combustion zone should be reasonably large since with increasing residence time NO_x emission reduction efficiency increases. Target values for the mean residence time (at flue gas temperatures between 800 and 1,000°C) are ideally ~1.0 s, however, a minimum residence time of ~0.5 s should be reached.

The volume of the secondary combustion chamber should be large enough to achieve a complete gas phase burnout at temperatures between 850 and 1,000°C. Typically one to two seconds are needed.

In order to optimise furnace and nozzle geometries, to achieve a good mixing between flue gas and air and to homogenise the temperatures in the different combustion zones, a CFD-based furnace design is recommended (see section 5.4).

5.2.3.2 Air staging concept

Advanced air staging means that the primary air ratio respectively the air ratio in the fuel bed should be low in order to keep the fuel bed temperatures on a low level. Air ratios in the fuel bed of around 0.7 are therefore recommended.

By this measure also the gas velocities at fuel bed exit can be kept on a low level thus reducing the entrainment of fuel, charcoal and ash particles with the flue gases. This is also an important measure to reduce ash deposit formation in the secondary combustion chamber and the boiler as well as particulate emissions.

If flue gas is recirculated into the primary combustion zone (see section 5.2.3.3), the oxygen supplied with the recirculated flue gas has to be taken into account. Therefore, as a guiding value, air ratios above the fuel bed of about 0.8 are recommended.

At a given total excess air ratio (λ_{total}) of about 1.6 (typical value that can be achieved in small-scale boilers), the secondary air flow can be increased when low primary air ratios are applied. This bears the advantage that due to the higher momentum of the secondary air a better mixing of the combustion air and the flue gases in the secondary combustion zone takes place, thus improving gas phase burnout.

However, it has to be taken care that the secondary air injection is designed in a way that no reverse flows of secondary air into the primary combustion chamber occur. Such reverse flows can lead to increased temperatures on the fuel bed surface and also reduce the NO_x-reduction efficiency of the advanced air staging concept.

5.2.3.3 Flue gas recirculation

As a second measure to keep the combustion temperatures at a low level, the implementation of flue gas recirculation is recommended. In general, flue gas extracted from the flue gas flow downstream the boiler may be recirculated below and above the fuel bed. Flue gas recirculation below the fuel bed contributes on the one hand to fuel bed cooling but on the other side also to an increase of the gas flow through the fuel bed. In small-scale applications this typically leads to increased gas velocities at the fuel bed exit and thus to undesired entrainment of fuel, charcoal and ash particles with the flue gas.

Therefore, it is recommended to apply flue gas recirculation into the primary combustion zone above the fuel bed. By this measure the temperatures in the primary combustion zone should be kept at about 900°C. Thereby it has to be taken care, that the injection nozzles for flue gas recirculation are arranged in a way that no backflow of the recirculated flue gas towards the fuel bed occurs. Flue gas recirculation into the primary combustion zone bears several advantages:

- The fuel bed surface is cooled due to less radiation from above
- A better mixing of the gases released from the fuel bed can be achieved
- The formation of molten fly ash particles which cause deposit build-up in the combustion chamber can be avoided due to the lower temperatures
- The temperatures in the secondary combustion chamber can be reduced.

5.2.4 Avoidance of false air intake

An exact control of the combustion air flows is essential for the implementation of an advanced air staging concept. False air is thereby a disrupting factor since it represents an uncontrolled and not defined combustion air intake. As a guiding value, false air intake should be kept below 10% of the whole combustion air supplied. Besides not well sealed inspection openings of the furnace the fuel feeding system and the de-ashing system are the most relevant sources for false air in small-scale boilers.

It is expected to minimise false air intake through the fuel feeding system by e.g. the application of air tight rotary valves in the fuel supply line. Moreover, the de-ashing system should be air tight and the ash containers should be well sealed. Operation at low furnace underpressure also helps to reduce false air intake.

5.2.5 Furnace cooling

In general, the primary combustion chamber should be well insulated. In common concepts of small-scale biomass boilers the secondary combustion chamber is typically cooled by water jackets (radiative boiler section). It has to be considered that flue gas recirculation reduces the temperatures in the secondary combustion zone. To achieve an almost complete gas phase burnout (low CO and OGC emissions as well as practically zero emissions of soot and organic aerosols) also during partial load operation the residence time at high temperatures (above 900 – 1000°C) must be long enough. Therefore, it is recommended to also insulate the first part of the secondary combustion chamber.

5.2.6 Boiler design and boiler cleaning

Since increased fuel flexibility is always connected to robustness towards different ash contents and thus fly ash contents of the flue gases, the boiler concept must be capable to operate at such conditions. It is recommended to implement automated boiler tube cleaning devices which are operated more frequently than in conventional pellet and wood chip boilers. Moreover, the boiler design should be based on the consideration of higher fouling rates than during wood chip and pellet combustion.

If fuels with elevated S and Cl contents are utilised, low temperature corrosion may cause problems in the boiler due to acid dew point corrosion and the formation of corrosive hygroscopic salt deposits. According to results of low-temperature corrosion probe measurements, performed during straw pellet combustion within the *BIOFLEX!* project, it is recommended to operate the boiler at return temperatures of at least 60 to 65°C. Thus an appropriate control of the boiler return temperature is needed.

5.2.7 Secondary measures regarding emission control

Due to the elevated ash and especially K contents of agricultural biomass fuels elevated particulate emissions in comparison with wood combustion occur. Therefore, usually the application of a particle filter (electrostatic precipitator - ESP) is needed. Regarding the design of such ESPs it has to be considered that the particle contents in the raw gas are higher compared to wood combustion and that fine particulate matter (particles smaller than 1 µm) clearly dominate the total dust emissions. Therefore, higher precipitation efficiencies especially for fine particulate matter are needed to achieve the same level of particulate emissions as for wood combustion.

Moreover, when utilising fuels with elevated S and Cl contents, filter surfaces have to be kept at appropriately high temperatures to avoid problems with low temperature corrosion (see also section 5.2.6).

5.2.8 Process control concept

To implement the measures mentioned above, the application of an appropriate process control concept is essential. This also concerns the process control hardware. In this respect it is important that the primary and secondary combustion air flows as well as the flue gas recirculation can be controlled exactly and independently. To gain more flexibility regarding the air staging settings it is recommended to implement process control strategies which allow for a flexible adjustment of the primary and secondary air flows and not systems with a fixed primary to secondary air flow ratio.

A second important aspect is the implementation of combustion chamber temperature control loops. To avoid the formation of sintered or molten ash deposits, the furnace temperatures have to be kept at an appropriately low level which depends on the ash melting characteristics of the fuels applied. Therefore, automated control loops for the flue gas recirculation in dependence of the combustion chamber temperature should be implemented.

To avoid problems with low-temperature corrosion, an appropriate control of the return water temperature is also recommended.

Moreover, the control of the ESP (start-up, shut down, cleaning cycles) has to be integrated into the process control system of the boiler.

5.3 Design related aspects for medium-scale combustion plants

5.3.1 Fuel feeding system

In medium-scale combustion plants screw feeding systems as well as hydraulic piston stokers are usually applied. Both systems are also applicable for fuel-flexible combustion systems.

However, it is important to select and design the fuel feeding system with respect to the bulk flow properties and the energy densities of the fuel assortments under consideration.

An important aspect thereby is that the fuel is evenly distributed over the whole grate area at the entrance. Moreover, the fuel should not be compacted too much during fuel feeding in order to facilitate an even gas flow through the fuel bed from the beginning. In this respect, screw feeding systems are preferred to piston feeders.

5.3.2 Grate concept and de-ashing of the grate

Due to the high variation range of the ash contents only moving grate based systems should be applied (no underfeed stokers). Inclined moving grates are preferred since they lead to a better mixing of the fuel bed and due to the movements of the grate elements, sintered or partly molten ash agglomerates can be broken. Moreover, the grate area has to be adjusted to the moisture content and the ash content of the fuels in order to facilitate an almost complete charcoal burnout.

It is recommended to design grates with more than two independently movable zones with separate primary air supplies. By this measure flexibility regarding the utilisation of fuels with different moisture contents, ash contents and bulk densities can be achieved. Thereby it has to be taken care that the primary air supply over the individual grate zones should be as homogeneous as possible which can be supported by small grate bars with a high number of air nozzles in the grate bars. Moreover, the air supply zones below the grate should be well sealed against each other in order to facilitate an exact adjustment of the air supply in the different grate zones.

Furthermore, the application of water cooled grates can reduce problems with slag formation on the grate. It is recommended to at least foresee a water cooling of the grate frame.

It is important that the grate is well sealed against the walls of the primary combustion zone since high combustion air flows along the walls can lead to local temperature peaks and consequently to ash sintering and ash melting effects. Moreover, such flows induce strains along the furnace walls which have a negative impact on gas phase burnout in the secondary combustion zone.

During the combustion of ash rich fuels larger partly sintered ash agglomerates may form. Although they can be disintegrated during de-ashing with screws, they may block the ash discharge opening at the end of the grate. Therefore, it is important that this opening is designed wide enough to also discharge larger ash agglomerates without blockages.

The de-ashing screws should be robust to avoid problems in case of the occurrence of slag pieces and the de-ashing system as well as the de-ashing interval must be adjusted to the range of ash contents expected for a plant.

5.3.3 Application of advanced air staging concepts including flue gas recirculation

Modern medium-scale combustion plants are typically based on air staging concepts and flue gas recirculation for fuel bed and combustion chamber temperature control. Existing concepts however have to be improved towards advanced air staging concepts if a higher fuel flexibility shall be achieved.

5.3.3.1 Furnace geometries

Typically, the furnaces consist of two geometrically well-defined combustion zones, the primary combustion chamber (which includes the fuel bed zone) and the secondary combustion chamber. It is important that these zones are geometrically well separated. In the zone above the fuel bed a reducing atmosphere should prevail in order to achieve a NO_x emission reduction by primary measures. The volume of this zone should be reasonably large since with increasing residence time NO_x emission reduction efficiency increases. Target values for the mean residence time (at flue gas temperatures between 800 and 1,000°C) are ideally ~1.0 s, however, a minimum residence time of ~0.5 s should be reached. Low-NO_x operation is especially of relevance for N-rich biomass fuels in order to avoid or minimise the efforts for secondary measures for NO_x emission reduction (see section 5.2.7).

It is also of relevance for the NO_x emission reduction efficiency that no backflows of secondary air into the primary combustion zone (respectively the reduction zone) occur.

The volume of the secondary combustion zone should be large enough to achieve a complete gas phase burnout. Moreover, it is recommended to foresee dedicated zones with low flue gas velocities or sharp direction changes of the flue gas flow in order to precipitate coarse fly ash particles from the flue gas by gravitational and/or centrifugal forces. These zones should either be automatically de-ashed or easily accessible for manual de-ashing.

Horizontal ducts should be avoided due to the risk of ash agglomerations and therefore vertically arranged combustion chambers are preferred.

In order to optimise furnace geometries as well as the geometries and positioning of nozzles for secondary air injection and flue gas recirculation, a CFD-based furnace design is recommended (see section 5.4).

5.3.3.2 Air staging concept

In contrast to conventional air staging advanced air staging means that the primary air ratio respectively the air ratio in the fuel bed should be decreased to values of about 0.5 or even lower in order to keep the fuel bed temperatures on a low level. If flue gas recirculation below the grate is applied (see section 5.3.3.3), the oxygen supplied with the recirculated flue gas has to be considered when defining the primary air ratios. Moreover, regarding the air ratio in the primary combustion zone, also flue gas recirculated above the fuel bed has to be taken into account. As a guiding value, the air ratio in the primary combustion zone with flue gas recirculation above the grate should be in the range of 0.8.

By this measure also the gas velocities at fuel bed exit can be kept on a low level thus reducing the entrainment of fuel, charcoal and ash particles with the flue gases. This is also an important measure to reduce ash deposit formation in the secondary combustion chamber and the boiler as well as particulate emissions.

At a given total excess air ratio (λ_{total} – typically values between 1.4 and 1.6 can be reached), the secondary air flow can be increased when low primary air ratios are applied. This bears the advantage that due to the higher momentum of the secondary air a better mixing of the combustion air and the flue gases in the secondary combustion zone takes place, thus improving gas phase burnout.

As mentioned in section 5.2.2, the implementation of grate concepts with more than two zones with separately controllable primary air supply is recommended. In such systems, the primary air staging along the grate is also of relevance for the implementation of an advanced air staging concept. The air flows supplied to the zones where drying and biomass decomposition take place (typically the first and parts of the second grate zone) should generally be higher than the air flows supplied to the charcoal burnout zone. However, the air staging along the grate has always to be adjusted to the moisture content and ash content of the fuel as well as to the charcoal burnout time needed. To implement an efficient primary air staging along the grate it is important that the different air supply zones are well sealed against each other to prevent air flows from a zone with high air supply rates (and consequently higher local pressures) to zones with lower air supply rates (and lower local pressures).

5.3.3.3 Flue gas recirculation

As a second measure to keep the combustion temperatures on a low level the implementation of flue gas recirculation is recommended. In general, flue gas extracted from the flue gas flow downstream the particle filter should be recirculated below and above the fuel bed.

Flue recirculation below the fuel bed is used as a measure to cool the fuel bed and to avoid slag formation. It is recommended to restrict flue gas recirculation below the grate to the grate zones where drying and devolatilisation take place and not to inject recirculated flue gas into the charcoal combustion zone of the grate. The recirculated flue gas may be mixed with combustion air prior to injection below the grate or may be supplied separately.

Moreover, the injection of recirculated flue gas into the primary combustion zone above the fuel bed is recommended. By this measure the temperatures in the primary and the secondary combustion zone can be controlled. Moreover, flue gas recirculation above the grate improves the mixing of the gases in the reduction zone and thus supports NO_x -reduction reactions. Regarding the design and arrangement of the flue gas recirculation nozzles it has to be taken care that no backflows of recirculated flue gas towards the fuel bed surface, which may cause particle entrainment, occur.

Especially when utilising ash rich fuels an appropriate control of the combustion temperatures by flue gas recirculation is essential in order to avoid the formation of agglomerations of molten ash particles on the grate and sticky fly ash deposits on the furnace walls.

5.3.4 Avoidance of false air intake

An exact control of the combustion air flows is essential for the implementation of an advanced air staging concept. False air is thereby a disrupting factor since it represents an uncontrolled and not defined combustion air intake. Besides not well sealed inspection openings of the furnace, the fuel feeding system and the de-ashing system are relevant sources for false air. Moreover, purging air streams for keeping observation windows and optical ports of fuel bed level control systems clean may also provide significant sources for false air.

These false air sources should be minimised as good as possible. As a target value the share of false air on the total combustion air supplied should be below 15%. This may also be supported by an operation at the lowest possible underpressure in the furnace, since high underpressure accelerates false air flows. However, it is recommended to check the false air

intake during the initial start-up phase by air supply measurements and mass balances over the furnace. False air flows detected should be considered, according to their allocation, when calculating the primary air ratios and combustion air ratios in the fuel bed and the primary combustion zone. The set values for the air supply control should be adjusted accordingly to include also the influence of false air streams.

5.3.5 Boiler design and boiler cleaning

State-of-the-art medium-scale combustion plants are usually equipped with automated boiler cleaning systems based on pressurised air. Such cleaning systems should be foreseen in any case since the increased ash contents and especially increased contents of fine particulate matter forming elements (in particular of K) lead to increased fouling. The systems should be operated more frequently than in wood combustion in order to keep the temperatures at boiler outlet on an acceptable level. Increased fouling however, should already be considered during boiler design.

As long as hot water boilers are applied, no risks regarding high temperature corrosion have to be expected. These risks increase with increasing wall temperatures of the heat exchangers and therefore, corrosion risks have to be regarded for thermal oil boilers and especially for superheater sections of steam boilers. In any case an efficient boiler cleaning system reduces the residence time of corrosive compounds on the boiler tube surfaces and thereby helps to reduce corrosion related risks.

With increasing S and Cl content of the fuel also the risks for low temperature corrosion increases. According to latest data, low temperature corrosion is most probably induced by depositions of corrosive hygroscopic salts. In [2] it is recommended to keep the gas-side boiler surface temperatures

- for dry fuels and flue gas water contents of up to 15 vol.% above 70°C
- for fuels with high moisture contents and consequently flue gas water contents of more than 20 vol.%, above 90°C.

These proposed minimum surface temperatures already include a safety margin which is needed to consider a certain range of fluctuations of plant operation

5.3.6 Secondary measures regarding emission control

Due to the high variation ranges of possible ash contents and especially K-contents, secondary dust emission control measures are needed. If no other measures for emission control must be implemented (e.g. dry sorption for HCl and/or SO₂ removal), the application of electrostatic precipitators is recommended. In combination with dry sorption systems for HCl/SO₂ removal, baghouse filters shall be applied.

For fuels with high N contents the implementation of advanced air staging concepts may not be sufficient to keep the NO_x emission limit values. In such cases a SNCR (selective non catalytic reduction) system must be implemented. Thereby, urea or ammonia is injected into the secondary combustion zone at a position where an almost complete burnout is already achieved and at temperature levels of about 850 to 1,000°C. Since a certain residence time at these temperatures is needed for the NO_x reduction reactions, the volume of the secondary

combustion zone has to be adjusted to the demands of the SNCR system. Appropriate guiding values, which have to be considered during furnace design, are provided by the suppliers of SNCR units.

5.3.7 Process control concept

It is important to mention that the process control strategy supports the implementation of the measures explained above. Therefore, the control system must assure an exact control of air ratios and combustion chamber temperatures in order to achieve continuous low-emission operation of the combustion plant.

5.4 CFD based boiler design as an efficient measure to achieve a higher fuel flexibility

Regarding some of the measures mentioned in section 5.2 and 5.3 already a certain awareness at furnace and boiler manufacturers exists. However, their correct implementation into real applications represents the major problem and challenge. In order to improve the implementation of primary measures in furnaces and boilers, process simulation based on computational fluid dynamics (CFD) has become a design instrument which allows for a quicker and more efficient development process than traditionally applied experimental development work.

With CFD it is possible to simulate the combustion process in detail, and thereby to analyse velocity and temperature distributions in the furnace as well as the combustion reactions. CFD can therefore be applied in order to optimise furnace geometries as well as air supply and flue gas recirculation strategies (e.g. injection nozzle dimensions, arrangements and location) in a way that the primary measures discussed above can be implemented in an optimised way. The variation of different parameters regarding combustion chamber insulation respectively cooling measures (selection of specific insulation materials and insulation strategies, flue gas recirculation, cooling by water jackets) can lead to optimised solutions to reach the targeted combustion chamber temperatures and an almost complete gas phase burnout during full and partial load operation. Moreover, the results of the calculations are visualised and therefore provide the basis for an improved understanding of the processes going on.

CFD simulations cannot substitute classic experimental R&D, but they can significantly increase the probability of the success of the development work and speed up the development process. By the simulation of different load cases and fuels, CFD simulations additionally provide relevant basic information for developing an optimised process control concept tailored to the demands of the respective technology.

6 Acknowledgements

This project was funded within the ERA-NET Bioenergy programme “Innovative bioenergy concepts”. The project consortium gratefully acknowledges the financial support for carrying out the project provided by:

	<p>Klima- und Energiefonds, Austria</p>
	<p>Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Germany</p>
	<p>Swedish Energy Agency</p>
	<p>The National Centre for Research and Development, Poland</p>

7 Related literature

1. Obernberger Ingwald, 2014: Strategy for the Application of Novel Characterization Methods for Biomass Fuels: Case Study of Straw. In: Energy Fuels 2014, 28, 1041–1052, DOI information: 10.1021/ef402249x
2. Brunner Thomas, Obernberger Ingwald, Ramerstorfer Christian, Kanzian Werner, 2018: Evaluation of the Low-temperature Corrosion Potential of Flue Gases from the Combustion of Wood and Non-wood Fuels. In: Proceedings of the 26th European Biomass Conference and Exhibition, May 2018, Copenhagen, Denmark, ISBN 978-88-89407-18-9, ISSN 2282-5819, pp. 430-439 (paper DOI 10.5071/26thEUBCE2018-2AO.8.1), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy
3. Näzelius I-L, Boström D, Rebbling A, Boman C, Öhman M. Fuel indices for estimation of slagging of phosphorus-poor biomass in fixed bed combustion. Energy and Fuels 2017;31(1):904-915.
4. Nils Skoglund. Ash chemistry and fuel design focusing on combustion of phosphorus-rich biomass fuels. Doctoral Thesis, Umeå University, 2014.
5. Jonathan Fagerström. Fine particle emissions and slag formation in fixed-bed biomass combustion – aspects of fuel engineering. Doctoral Thesis, Umeå University, 2015.
6. Boström D, Skoglund N, Grimm A, Boman C, Öhman M, Broström M, Backman R. Ash transformation chemistry during thermochemical conversion of biomass. Energy and Fuels 2012;26:85-93
7. Skoglund N, Werner K, Nylund GM, Pavia H, Albers E, Broström M. Combustion of seaweed – A fuel design strategy. Fuel Processing Technology. 2017;165:155-161
8. Boman C, Boström D, Fagerström J, Öhman M, Näzelius I-L, Bäfver L. Fuel additives and blending as primary measures for reduction of fine ash particle emissions - state of the art. Report within the ERA-NET Bioenergy project FutureBioTec, 2011. (available at www.futurebiotec.bioenergy2020.eu)
9. Fagerström J, Näzelius I-L, Gilbe C, Boström D, Öhman M, Boman C. Influence of peat ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion. Energy and Fuels 2014;28(5):3403–3411.
10. Skoglund N, Grimm A, Öhman M, Boström D. 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 and Fuels 2013;27(10):5725-5732.
11. Boström D, Grimm A, Boman C, Björnbom E, Öhman M. Influence of kaolin and calcite additives on ash transformations in small-scale combustion of oat. Energy and Fuels 2009;23:5184–5190.
12. Tran K-Q, Lisa K, Steenari B-M, Lindqvist O. A kinetic study of gaseous alkali capture by kaolin in the fixed bed reactor equipped with an alkali detector. Fuel 2005;84:169-175
13. Wang G, Arendt Jensen P, Wu H, Frandsen FJ, Sander B, Glarborg P. Potassium capture by kaolin, part 1: KOH. Energy and Fuels 2018;32:1851-1862.
14. Boman C, et al. Fuel additives and blending for reduction of particle emissions in biomass based medium scale heating boilers (In Swedish). Swedish Energy Agency, Final report 2019 (project nr 42008-1).
15. Kuptz D., et al, 2018: Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb - Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten. Berichte aus dem TFZ, Nr. 56. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Germany

16. Mack R, Kuptz D, Schön C, Hartmann H. Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy* 2019;125:50–62.

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Marktüberlegungen. Betriebsdaten. Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauvarianten
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstanduntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayrische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor

52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln
56	Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
57	Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
58	Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
59	Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapsverarbeitung in Bayern
60	Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
61	Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
62	Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
63	Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
64	Amarant als Biogassubstrat: Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amarantlinien für bayerische Standorte
65	Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen: Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung

