

77

Berichte aus dem TFZ

Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern

Thermische Verwertung

Projektpartner:

 **WEIHENSTEPHAN · TRIESDORF**
University of Applied Sciences



**Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern
– Thermische Verwertung**



Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern

Thermische Verwertung

Dr. Daniel Kuptz
Carina Kuchler
Elisabeth Rist
Robert Mack
Claudia Schön
Dr. Tim Eickenscheidt
Prof. Dr. Matthias Drösler
Dr. Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 77

Straubing, Februar 2023

Titel: Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern – Thermische Verwertung

Autoren: Dr. Daniel Kuptz, Carina Kuchler, Elisabeth Rist, Robert Mack, Claudia Schön, Dr. Tim Eickenscheidt, Prof. Dr. Matthias Drösler, Dr. Hans Hartmann

Projektleiter (TFZ): Dr. Daniel Kuptz

Mitarbeiter: Albert Maierhofer, Stephan Winter, Bernhard Promesberger, Tobias Rohrmaier, Anja Rocktäschel, Katharina Gruber, Felix Dötsch, Felix Lipp, Moritz Then

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) und des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen 64b-U8639.1-2015/8-14 gefördert. Die Projektlaufzeit geht vom 13.07.2016 bis 31.12.2022. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2023

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: Daniel Kuptz, Carina Kuchler, Elisabeth Rist, Robert Mack, Claudia Schön, Tim Eickenscheidt, Matthias Drösler, Hans Hartmann, Anna Grundner

Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2023
Gestaltung: Daniel Kuptz, Carina Kuchler, Robert Mack

Fotonachweis: Tobias Hase (Titelbild, Abbildung 1; 3 und 4), restliche TFZ

Vorwort

Der vorliegende Teilbericht zum Forschungsvorhaben „Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern“ (MOORuse) umfasst Untersuchungen, die über den Zeitraum von mehr als drei Jahren am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) durchgeführt wurden.

Besonderer Dank gilt im Zusammenhang mit diesem Projekt:

- den Kolleginnen und Kollegen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) – Institut für Ökologie und Landschaft – Lehrstuhl für Vegetationsökologie – für die stets gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie für den wertvollen fachlichen Austausch,
- Johann Krimmer (Samen und Pflanzen für naturnahes Grün) für die Bereitstellung und Aufbereitung der Brennstoffe,
- Ludwig Büchler und Josef Ziegeltrum für die Bereitstellung der Versuchsfläche „Freisinger Moos“ und
- den Herstellerfirmen der beiden verwendeten Biomassekessel für die Bereitstellung der Anlagen.

Die Studie wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) und den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen 64b-U8639.1-2015/8-14 gefördert.



Europäische Union
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



**Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz**



Abstract (deutsch)

Reine, gemischte und additivierte Biomassepellets aus vier Paludikulturarten (*Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.*) wurden am TFZ hergestellt und in zwei Biomassekesseln < 30 kW energetisch verwertet. Als Rohmaterial für die Versuche kam in den Wintern 2018, 2019 (Ausgangsmaterial für die Pelletierung) und 2020 geerntetes Häckselgut zum Einsatz. Zur Verbesserung des Verbrennungsverhaltens wurde ein Teil der Brennstoffe vor der Pelletierung mit dem Tonmineral Kaolin additiviert oder mit ENplus-Holzpellets (A1-Qualität) nach der Pelletierung gemischt. Das Häckselgut und die Pellets wurden gemäß internationalen Standards für biogene Festbrennstoffe hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Brennstoffeigenschaften analysiert. Die physikalische Brennstoffqualität der Pellets erfüllte die Anforderungen der DIN EN ISO 17225-6. Die chemischen Eigenschaften von *Typha ssp.* deuteten auf hohe Gesamtstaubemissionen während der Verbrennung aufgrund hoher Gehalte an Kalium und Natrium im Brennstoff hin, während für die anderen Paludi-Arten aufgrund eines hohen molaren $(\text{Si} + \text{K} + \text{Al})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{P})$ -Verhältnisses eine starke Schlackebildung vorhergesagt wurde. Bei der Verbrennung in beiden Kesseln waren die CO- und Gesamtstaubemissionen für *Typha ssp.* hoch, wurden jedoch durch eine Additivierung mit 2,3 m-% Kaolin leicht reduziert. Die Mischung mit Holzpellets reduzierte die NO_x-, SO_x- und HCl-Emissionen aufgrund geringerer Konzentrationen an N, S und Cl im Brennstoff. Die Verschlackung war bei reinen und additivierten Pellets von *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* hoch, wobei > 50 m-% der Gesamtasche aus Partikeln mit einem Durchmesser > 2 mm bestanden. Weder mit den reinen noch mit den additivierten Brennstoffen konnte ein stationärer Kesselbetrieb erreicht werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Paludikulturpellets anspruchsvolle Brennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen sind. Ihr Einsatz kann für die verwendeten Biomassekessel nicht empfohlen werden. Technische Lösungen können in mittelgroßen Verbrennungsanlagen über 100 kW einfacher umgesetzt werden.

Abstract (englisch)

Pure, blended and additive biomass pellets from four paludiculture species (*Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* and *Carex ssp.*) were produced at TFZ and combusted in two small-scale biomass boilers < 30 kW. Raw materials used for the trials derived from straw fuels that were harvested during winter 2018, 2019 (i. e. the raw material used for pelleting) and 2020. To improve combustion behavior, fuels were additivated with the clay mineral kaolin before pelleting and mixtures of the fuels with ENplus wood pellets (A1 quality) were produced after pelleting. All straw and pellet fuels were analyzed according to international standards for solid biofuels regarding their physical and chemical fuel properties. The physical fuel quality of pellets met the requirements of ISO 17225-6. The chemical fuel properties of *Typha ssp.* indicated high total particle emissions due to high levels of potassium and sodium in the fuel, while high slag formation was predicted for the other paludiculture species due to a high molar $(\text{Si} + \text{K} + \text{Al})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{P})$ ratio. During combustion in both boilers, CO and total particle emissions were high for *Typha ssp.* but slightly reduced by adding 2.3 w-% kaolin as an additive. Blending of the fuels with wood pellets reduced NO_x, SO_x and HCl emissions due to reduced concentrations of N, S and Cl. Slagging was high for pure and additivated pellets of *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* and *Carex ssp.* with > 50 w-% of the total ash consisting of particles with a diameter > 2 mm. Steady-state boiler operation could not be achieved with either pure or additivated fuels. In summary, paludiculture pellets are challenging fuels for small-scale combustion. Their use cannot be recommended for the two biomass boilers used. Technical solutions can more easily be applied in medium-sized combustion plants above 100 kW.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	7
Abstract (englisch)	8
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	17
1 Einleitung und Problemstellung	19
2 Zielstellung	21
3 Stand des Wissens	23
3.1 Brennstoff	23
3.1.1 Grundlegende Brennstoffqualitätsparameter	23
3.1.2 Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens	25
3.1.3 Optimierung der physikalischen Brennstoffeigenschaften.....	26
3.1.4 Optimierung der chemischen Brennstoffzusammensetzung durch Additivierung oder Vermischung	27
3.1.5 Wirkungsweise von Kaolin als Additiv	28
3.2 Feuerungstechnik	30
3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Paludikulturen als Brennstoff	31
3.4 Einschränkungen für Additive durch Vorgaben in Brennstoffnormen und Verordnungen	33
4 Material & Methoden	35
4.1 Brennstoffe	35
4.1.1 Bereitstellung der Rohmaterialien und Additiv.....	35
4.1.2 Stöchiometrische Berechnung der minimal benötigten Menge an Additiv pro Brennstoff	37
4.1.3 Infrastruktur für die Pelletierung	38
4.1.4 Zerkleinerung und Pelletierung der Paludibrennstoffe.....	40
4.1.5 Probenahme und Brennstoffanalysen	42
4.2 Feuerungsversuche	44
4.2.1 Kessel 1 – 30-kW-Biomassekessel	45
4.2.2 Kessel 2 – 15-kW-Pelletkessel.....	45
4.2.3 Prüfstands Aufbau.....	46
4.2.4 Versuchsdurchführung	49
4.3 Verschlackung	49
4.3.1 Ascheschmelzverhalten	50
4.3.2 PASSA-Methode.....	50
4.3.3 Bewertung der Kesselaschen	52
4.4 Statistische Auswertung	52

5	Ergebnisse & Diskussion	53
5.1	Brennstoffqualität des Häckselguts	53
5.2	Pellets aus Paludibrennstoffen	62
5.2.1	Physikalische Brennstoffqualität	63
5.2.2	Inhaltsstoffliche Brennstoffqualität	68
5.3	Feuerungsversuche	73
5.3.1	Versuche mit Kessel 1 (30-kW-Biomassekessel)	73
5.3.2	Versuche mit Kessel 2 (15-kW-Pelletkessel)	84
5.4	Bewertung der Schlackebildungsneigung	91
5.4.1	Ascheschmelzverhalten	91
5.4.2	PASSA-Methode	93
5.4.3	Kesselaschen (Kessel 1)	94
5.4.4	Kesselaschen (Kessel 2)	100
5.4.5	Vergleich der Slag-Indizes	103
6	Schlussfolgerung	107
	Zusammenfassung	109
	Quellenverzeichnis	113
	Anhang	123
	Anhang 1: Inhaltsstoffliche Analyse von <i>Phalaris arundinacea</i> und Torf von der Versuchsfläche Freisinger Moos	123
	Anhang 2: Stöchiometrischer Kaolinbedarf, ausgehend von anderen Analyseproben	124

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Paludibrennstoffe (Häckselgut) aus der Ernte vom Februar 2018 und das im Projekt verwendete Additiv: Rohrkolben (<i>Typha</i> ssp., oben links); Schilfrohr (<i>Phragmites australis</i> , oben rechts); Rohrglanzgras (<i>Phalaris arundinacea</i> , unten links); Seggen (<i>Carex</i> ssp., unten rechts); Kaolin (Mitte).....	35
Abbildung 2:	Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) am TFZ mit Materialzufuhr und Vibro-Rinne (links) sowie schematische Darstellung eines Presskanals einer beidseitig nutzbaren Flachmatrize (rechts).....	38
Abbildung 3:	Konditionierung gemahlener Paludibrennstoffe mit Kaolin im Futtermittelmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK)	40
Abbildung 4:	Seggenpellets (<i>Carex</i> ssp.) mit 1,5 m-% Kaolin, produziert mit der Pelletieranlage des TFZ	42
Abbildung 5:	Versuchsaufbau der Abgasmessstrecke für Kessel 1 (links) und Kessel 2 (rechts) am Feuerungsprüfstand des TFZ (Skizze nicht maßstäblich; T: Temperaturmessung, v: Gasgeschwindigkeitsmessung, p: Förderdruckmessung).....	47
Abbildung 6:	Beimischung von Kaolin über eine separate Zuführung in die Förderschnecke zwischen Brennstoffbunker und Feuerung für die Versuche mit gemahlenem Häckselgut	48
Abbildung 7:	Temperaturprogramm bei der Veraschung in der PASSA-Methode (modifiziert)	50
Abbildung 8:	Mittlerer Wassergehalt (\pm Standardabweichung) der Häckselgutchargen direkt nach der Ernte ($n = 9$) und bei Anlieferung an das TFZ ($n \geq 6$, Ernte 2020: $n = 3$)	53
Abbildung 9:	Mittlere Schüttdichte (\pm Standardabweichung) der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ ($n = 3$, im Anlieferungszustand).....	55
Abbildung 10:	Mittlerer Aschegehalt (\pm Standardabweichung) der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ (Ernte 2018 und 2020: $n = 1$, Ernte 2019: $n = 3$, jeweils Doppelbestimmung, wasserfreie Bezugsbasis)	56
Abbildung 11:	Mittlerer Heizwert der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ ($n = 1$, Doppelbestimmung, wasserfreie Bezugsbasis)	57
Abbildung 12:	Mittlerer Wassergehalt (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 3$)	63
Abbildung 13:	Mittlere Schüttdichte (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 3$).....	64

Abbildung 14: Mittlerer Aschegehalt mit und ohne Karbonate (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe (n = 3 bis 4, karbonatfreier Aschegehalt n = 1, wasserfreie Bezugsbasis) 65

Abbildung 15: Mittlerer Heizwert (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe (n = 1, SD angegeben aus Doppelbestimmung, wasserfreie Bezugsbasis) 66

Abbildung 16: Mittlere mechanische Festigkeit (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe (n = 3)..... 67

Abbildung 17: Längenverteilung der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe 68

Abbildung 18: Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist für diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich) 74

Abbildung 19: Mittlere Org.-C-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist für diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich) 76

Abbildung 20: Mittlere NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)..... 77

Abbildung 21: Mittlere NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludipellets in Kessel 1 (30-kW-Treppenrostfeuerung) im Verhältnis zum Stickstoffgehalt der Brennstoffe 78

Abbildung 22: Mittlere HCl-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)..... 79

Abbildung 23: Mittlere SO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)..... 79

Abbildung 24: Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)..... 80

Abbildung 25:	Beispiel für die Schwankung der Wärmeleistung von Kessel 1 (30-kW-Treppenrostfeuerung) beim Einsatz von Pellets aus Holz und Typha ssp.....	82
Abbildung 26:	Mittlere Wärmeleistung von Kessel 1 (30-kW-Treppenrostfeuerung) beim Einsatz von Brennstoffen aus Paludikulturen und Holz nach dem ersten Erreichen der Nennlast (HG = Häckselgut; * = Kessel auf Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	83
Abbildung 27:	Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	84
Abbildung 28:	Beispiel für die Schwankung der Wärmeleistung des 15-kW-Pelletkessels (Kessel 2) beim Einsatz von Pellets aus Holz und Typha ssp. (× = manueller Start der Kesselreinigung).....	85
Abbildung 29:	Mittlere Org.-C-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	86
Abbildung 30:	Mittlere NO _x -Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	87
Abbildung 31:	Mittlere NO _x -Emissionen bei der Verbrennung von Paludipellets in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2) im Verhältnis zum Stickstoffgehalt der Brennstoffe.....	87
Abbildung 32:	Mittlere HCl-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5, Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	88
Abbildung 33:	Mittlere SO _x -Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5, Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	89
Abbildung 34:	Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5, Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	90
Abbildung 35:	Mittlere Wärmeleistung des 15-kW-Pelletkessels (Kessel 2) beim Einsatz pelletierter Brennstoffe aus Paludikulturen und Holz nach	

	dem ersten Erreichen von 80 % der Nennlast (* = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich).....	91
Abbildung 36:	Ascheschmelzverhalten (Balken) und molares (Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)-Verhältnis (Rauten) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe; SST = Schrumpfungstemperatur (shrinkage starting temperature), DT = Erweichungstemperatur (deformation temperature), HT = Halbkugeltemperatur (hemispherical temperature), FT = Fließtemperatur (flow temperature) (n = 1)	92
Abbildung 37:	Slag-Index nach PASSA-Methode für Partikel > 2 mm und > 1 mm (Referenzbrennstoffe nicht dargestellt, da die Messung an diesen noch nach dem alten Temperaturprofil mit 6 h bei 1000 °C erfolgte [74])	93
Abbildung 38:	Masse an Kesselasche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und der Referenzbrennstoffe in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1), aufgeteilt in unterschiedliche Aschefraktionen (HG = Häckselgut, * = abgebrochener Feuerungsversuch aufgrund starker Schlackebildung; # = Schlacke bestimmt als Partikel > 3,15 mm).....	95
Abbildung 39:	Prozentualer Massenanteil einzelner Aschefraktionen an der Gesamtmasse an Asche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und der Referenzbrennstoffe in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1) (HG = Häckselgut, * = abgebrochener Versuch aufgrund starker Schlackebildung; # = Schlacke bestimmt als Partikel > 3,15 mm)	96
Abbildung 40:	Rostaschen der Referenzbrennstoffe Holzpellets (links) und Weizenstrohpellets (rechts) nach einem Verbrennungsversuch in Kessel 1	96
Abbildung 41:	Teilweise verschlackte Pellets aus Phalaris arundinacea auf dem Treppenrost von Kessel 1 während der Verbrennung (links) und nach der Abkühlung (rechts).....	97
Abbildung 42:	Gesamtaschen aus der Verbrennung von Paludipellets mit und ohne Kaolin (* = gemahlene Häckselgut); Holzrahmen: 100 × 100 mm	98
Abbildung 43:	Abgesiebte Aschen (nur Fraktion > 8 mm) aus der Verbrennung von Paludipellets mit und ohne Kaolin (* = gemahlene Häckselgut); Holzrahmen: 100 × 100 mm.....	99
Abbildung 44:	Masse an Kesselasche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und des Referenzbrennstoffs in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2), aufgeteilt in unterschiedliche Aschefraktionen (# = keine Schlackebestimmung bei Typha mit Kaolin)	101
Abbildung 45:	Prozentualer Massenanteil einzelner Aschefraktionen an der Gesamtmasse an Asche bei der Verbrennung von	

	Paludibrennstoffen und des Referenzbrennstoffs in einem 15-kW-Pelletkessel (# = keine Schlackebestimmung bei Typha mit Kaolin)....	101
Abbildung 46:	Schlackepartikel nach der Verbrennung von Typha ssp. auf dem Rost von Biomassekessel 2 (links) und Schlackebrocken aus Phalaris arundinacea aus demselben Kessel (rechts).....	103
Abbildung 47:	Vergleich der Slag-Indizes (d. h. Aschepartikel > 2 mm) der Kesselaschen mit der PASSA-Methode	104
Abbildung 48:	Lineare Regressionen zwischen den Slag-Indizes von Paludipellets, gemessen über die PASSA-Methode und die Aschen der beiden Biomasse-kessel	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Physikalische Brennstoffparameter biogener Festbrennstoffe und ihr Einfluss auf die Verbrennung (nach [63])	23
Tabelle 2:	Einfluss unterschiedlicher chemischer Elemente in biogenen Festbrennstoffen und ihr Einfluss auf die Verbrennung (nach [63])	24
Tabelle 3:	Übersicht der derzeit geltenden Emissionsanforderungen bei der Errichtung von Neuanlagen zur Verbrennung fester Biomasse in der EU und Deutschland[11] [12] [13] [14].....	32
Tabelle 4:	Spezifikationen für Pellets aus nicht holziger Biomasse nach Tabelle 1 und 2 gemäß DIN EN ISO 17225-6 (Auszug) [37], wf = wasserfreie Bezugsbasis.....	33
Tabelle 5:	Häckselgutbrennstoffe aus Paludikulturen von der Versuchsfläche Freisinger Moos, geerntet jeweils im Februar 2018, 2019 und 2020	36
Tabelle 6:	Chemische Zusammensetzung des verwendeten Kaolins der Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG, in Masseprozent (wf = wasserfreie Bezugsbasis)	36
Tabelle 7:	Technische Spezifikationen der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390	39
Tabelle 8:	Technische Spezifikationen des verwendeten Futtermittelmischers.....	39
Tabelle 9:	Im Projekt „MOORuse“ verwendete Matrizen für die Zerkleinerung und Pelletierung von Paludibrennstoffen	41
Tabelle 10:	Ausgangswerte für die Pelletierung von Paludibrennstoffen.....	41
Tabelle 11:	DIN EN ISO Analysemethoden für physikalische und chemische Eigenschaften der Brennstoffe	43
Tabelle 12:	Paludi- und Referenzbrennstoffe für Versuche am TFZ	44
Tabelle 13:	Berechneter Torfanteil in der Häckselgutprobe aus Phalaris arundinacea (Ernte 2019; wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	57
Tabelle 14:	Gehalte verbrennungsrelevanter chemischer Inhaltsstoffe der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ auf wasserfreier Bezugsbasis (n = 1)	58
Tabelle 15:	Brennstoffindizes, berechnet aus den Gehalten chemischer Inhaltsstoffe der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ	61
Tabelle 16:	Berechnung des stöchiometrischen Kaolinbedarfs (inkl. Sicherheitszuschlag von 10 %), ausgehend von den Elementgehalten in den Häckselgut-Analyseproben aus dem Jahr 2019, nach den Guidelines des ERA-NET Projekts „BioFlex!“ [8] (alle Angaben auf wasserfreier Bezugsbasis)	62
Tabelle 17:	Gemessene Gehalte ausgewählter verbrennungsrelevanter Inhaltsstoffe in den Pelletbrennstoffen aus Paludikulturen und in	

	den verwendeten Referenzbrennstoffen (n = 1, wasserfreie Bezugsbasis).....	69
Tabelle 18:	Gemessene Schwermetallgehalte in den Pelletbrennstoffen aus Paludikulturen in mg/kg (n = 1, wasserfreie Bezugsbasis, Fettdruck = Überschreitung des Grenzwerts nach DIN EN ISO 17225-6 [37], n. d. = nicht bestimmt [engl. „not determined“]).....	70
Tabelle 19:	Gemessene Elementgehalte repräsentativer, nicht additiver Proben aus der Ernte 2019 (H = Häckselgut, P = Pellets) und der verwendeten Referenzpellets sowie die daraus berechneten Gehalte (*) der mit Kaolin additivierten Pellets und der Paludi-Holzpellet-Mischungen (wasserfreie Bezugsbasis).....	71
Tabelle 20:	Brennstoffindizes (wasserfreier Bezugsbasis), berechnet aus den Gehalten chemischer Inhaltsstoffe in den Paludibrennstoffen (Tabelle 19) und in den verwendeten Referenzbrennstoffen (Tabelle 17)	72
Tabelle 21:	Volumen der zwei größten Schlackepartikel je Feuerungsversuch mit Paludibrennstoffen in Biomassekessel 2 in cm ³	102
Tabelle 22:	Gemessene Inhaltsstoffe in Phalaris arundinacea (Häckselgut) und der dazugehörigen Torfprobe sowie Berechnung der Werte für Häckselgut aus Phalaris arundinacea (Ernte 2019) mit einem Torfanteil von 11 % (wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	123
Tabelle 23:	Berechnung des stöchiometrischen Kaolinbedarfs (inkl. Sicherheitszuschlag von 10 %), ausgehend von den Elementgehalten in den Häckselgut-Analyseproben der Jahre 2018 und 2020 (HG) sowie aus den nicht additivierten Pellets aus dem Jahr 2019 (P), nach den Guidelines des ERA-NET-Projekts „BioFlex!“ [8] (alle Angaben auf wasserfreier Bezugsbasis).....	124

1 Einleitung und Problemstellung

Mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes aus dem Jahr 2021 hat die Bundesregierung die Klimaschutzziele Deutschlands zur Reduzierung der nationalen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) neu definiert mit dem Ziel, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu sein [15]. Durch dieses Gesetz wird u. a. eine benötigte Reduzierung der jährlichen THG-Emissionen für den Sektor „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ (LULUCF) von 40 Mio. t CO₂-Äquivalent festgeschrieben.

Nach aktuellen Daten des Umweltbundesamts (UBA) aus dem Jahr 2019 sind ca. 92 % der Moore in Deutschland derzeit entwässert und werden intensiv genutzt [16]. Diese Flächen emittieren jährlich bis zu 54 Mio. t CO₂-Äquivalent aufgrund der verstärkten Mineralisierung der aeroben Torfschicht. Circa 83 % dieser Flächen werden landwirtschaftlich für Ackerbau oder als Grünland genutzt. Als geeignete Maßnahme zur Minderung der THG-Emissionen wird häufig die Wiedervernässung und Renaturierung entwässerter Moorflächen empfohlen [43] [59] [94] [95] [96]. Da die meisten dieser Flächen im Besitz von Landwirten sind, ist ein Wissenstransfer zu geeigneten Nutzungsstrategien nach der Wiedervernässung notwendig, z. B. bezüglich des Anbaus und der Bewirtschaftung der Standorte mit Paludikulturen als Nutzpflanzen, aber auch bezüglich Informationen zu nationalen oder europäischen Förderprogrammen für die Wiedervernässung [100]. Hierzu wurde u. a. die Nationale Moorschutzstrategie Deutschlands festgeschrieben [16]. Gleichzeitig haben Forschung und Innovation zu Paludikulturen in den letzten Jahren deutlich zugenommen [108].

Das Forschungsprojekt „MOORuse“ hat zum Ziel, innovative und nachhaltige Nutzungsstrategien für Niedermoore in Süddeutschland zu entwickeln und umzusetzen. Der Projektfokus liegt auf der Wiederherstellung der ökologischen Funktionen (Biodiversität, Wasserhaushaltsregulierung etc.), der Verhinderung einer weiteren Mineralisierung des bestehenden Torfs (neutrale Treibhausgasbilanz), auf wirtschaftlichen Aspekten und auf der Integration von Paludikulturbiomasse in regionale Wertschöpfungsketten. Im Rahmen des Projekts wurden drei Testflächen mit unterschiedlichen Paludikulturarten auf wiedervernässten Mooren angelegt. Das geerntete Material wurde hinsichtlich seiner Eignung, z. B. als Substrat für Biogas [51], als Rohstoff für Dämm- und Baustoffe, als Torfersatz für den Gartenbau [52] [53] [54], als Rohmaterial für biogene Polymere oder für Tierfutter und Einstreu analysiert. Eine weitere Verwertungsstrategie war die Nutzung des geernteten Materials zur Wärmeerzeugung in dezentralen Kleinfeuerungsanlagen.

Paludikulturen wie *Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* oder *Carex ssp.* gehören zu den halmgutartigen Biomassen nach DIN EN ISO 17225-1 [39]. Als solche weisen sie zahlreiche physikalische und chemische Eigenschaften auf, die bei einer Verbrennung in kleinen bis mittelgroßen Biomassefeuerungen ($\leq 100 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis 1 MW_{th}) nachteilig sind [3] [6] [17] [18] [62] [63] [65] [72] [77] [78] [97] [101]. Hierzu zählen beispielsweise ein verminderter Heizwert, ein erhöhter Aschegehalt sowie ein erhöhter Gehalt verbrennungskritischer chemischer Inhaltsstoffe wie Stickstoff, Kalium, Chlor oder Schwefel. Zudem gelten halmgutartige Biomassen hinsichtlich ihrer verminderten Ascheerweichungstemperaturen als kritisch für die Verbrennung [8] [63] [73] [106]. Bei der

thermischen Nutzung von Paludibrennstoffen in Biomassefeuerungen ist demzufolge mit erhöhten Schadstoffemissionen bei der Verbrennung (z. B. hinsichtlich der Freisetzung von CO, NO_x und Feinstaub), aber auch mit Hochtemperaturkorrosion [5] oder mit einer erhöhten Bildung von Schlacke zu rechnen [63] [74] [78].

Belastbare Daten zur Brennstoffqualität und zum Verbrennungsverhalten von Paludibrennstoffen sowie zu deren Aufbereitung, beispielsweise in Form von Pellets, liegen nur im äußerst geringen Maße vor [4] [19] [49] [62] [64] [101] und systematische Betrachtungen der Brennstoffe sowie ihrer feuerungstechnischen Auswirkungen sind größtenteils noch unbekannt. Dabei ist es erforderlich, dass Verbrennungsversuche unter standardisierten Bedingungen und unter Hinzunahme eines Referenzbrennstoffs möglichst feuerungsunabhängig durchgeführt werden, damit verallgemeinerungsfähige Schlussfolgerungen über die Brennstoffe gezogen werden können. Daher sollte auch die physikalische Aufbereitungsform vereinheitlicht werden, beispielsweise durch Pelletierung der Materialien. Hierdurch können sich Effekte auf die Schadstoffbildung und die Anlagenbetriebsparameter ausschließlich auf die inhaltsstofflichen Eigenschaften der Brennstoffe zurückführen lassen wodurch eine einheitliche Vergleichsbasis zu den jeweiligen Referenzbrennstoffen einer Feuerungsanlage (z. B. Holzpellets oder Holz hackschnitzel) gegeben ist.

2 Zielstellung

Ziel der vorliegenden Studie war die Untersuchung der Brennstoffqualität und des Verbrennungsverhaltens vier ausgewählter Paludikulturen von der MOORuse-Versuchsfläche „Freisinger Moos“. Die Untersuchungen fanden am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) in Straubing statt. Die Analysen umfassten u. a. Fragestellungen bezüglich der:

- physikalischen und inhaltsstofflichen Brennstoffqualität der bereitgestellten Häckselgutchargen,
- der Pelletierbarkeit der Materialien und der sich daraus ergebenden Brennstoffqualität der Pellets,
- der Optimierung des Brennstoffdesigns durch Additivierung der Biomasse mit Kaolin oder durch Mischung mit anderen Biomassen (Holz),
- der emissionsrechtlichen Einordnung der Brennstoffe gemäß 1. und 44. BImSchV,
- der Durchführung realer Verbrennungsversuche mit zwei Kleinfeuerungsanlagen (ein 30-kW-Biomassekessel und ein 15-kW-Pelletkessel) am Feuerungsprüfstand des TFZ, inkl. Messung der dabei freiwerdenden gas- und partikelförmigen Emissionen,
- der Bewertung der Verschlackungsneigung der Brennstoffe mittels Ascheschmelzanalyse, mittels PASSA-Methode (*Pellet Ash and Slag Sieving Assessment*) und mittels gravimetrischer Analyse der Partikelgrößenverteilung der bei den Verbrennungsversuchen real anfallenden Aschen.

Ausgehend von den Ergebnissen wurden allgemeine Empfehlungen für die Nutzung von Paludibiomasse als Brennstoff und zu deren Einsatzmöglichkeiten erstellt.

3 Stand des Wissens

3.1 Brennstoff

Der Brennstoff hat einen der größten Einflüsse auf die Verbrennung von Biomasse, beispielsweise hinsichtlich der gas- und partikelförmigen Emissionen, des Wirkungsgrads und des störungsfreien Anlagenbetriebs.

3.1.1 Grundlegende Brennstoffqualitätsparameter

Jeder Brennstoff weist bedingt durch Art und Herkunft der Biomasse, aber auch durch die Ernte und den Transport (evtl. Verunreinigungen) sowie durch den Grad seiner Aufbereitung spezifische chemische und physikalische Eigenschaften auf, welche die Verbrennung maßgeblich beeinflussen können. Diese sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 überblickshaft wiedergegeben.

Tabelle 1: Physikalische Brennstoffparameter biogener Festbrennstoffe und ihr Einfluss auf die Verbrennung (nach [63])

Parameter	Einfluss auf die Verbrennung
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur, Emissionen (CO, Gesamtstaub)
Partikelgröße, Feinanteil, Überlängen	Störung in Förderelementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs- und Trocknungseigenschaften, Staubentwicklung, Explosionsgefahr, Ausformung des Glutbetts
Schüttdichte	Lager- und Transportaufwendungen, Leistung der Förderelemente
Aschegehalt	Rückstandsbildung und -verwertung, Partikelemission
Heizwert	Energiegehalt des Brennstoffs
Mechanische Festigkeit	Feinanteilbildung (Staubentwicklung, Entmischung)
Ascheerweichungsverhalten	Schlackebildung und -ablagerungen, Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf

Der Wassergehalt wird häufig als der wichtigste qualitätsbestimmende Parameter biogener Festbrennstoffe beschrieben. Er gibt die Masse an Wasser im Brennstoff bezogen auf dessen Gesamtmasse in m-% (Masse-%) an. Der Wassergehalt beeinflusst Heizwert und Lagerfähigkeit der Brennstoffe unmittelbar. Daneben wirkt er sich auf die bei der Verbrennung frei werdenden Emissionen an CO und Gesamtstaub sowie den Anfall an Asche [63] [81] [86] [104] aus.

Die Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe ist für den störungsfreien Anlagenbetrieb essenziell. Sie wird primär durch die Produktions- und Aufbereitungsschritte, beispielsweise

durch die Schnittweite beim Häckseln halmgutartiger Biomasse oder durch die Verdichtung/Vereinheitlichung der Brennstoffe durch Pelletierung, beeinflusst. Die Partikelgröße bestimmt u. a. die Transport- und Fließeigenschaften von Schüttgütern. Zudem hat sie insofern Einfluss auf das Lager- und Trocknungsverhalten der Brennstoffe, als z. B. kleine Partikel bzw. ein hoher Anteil an Feinmaterial die Durchlüftung einschränken kann. Ein zu großer Feinanteil kann zu Staubemissionen bei der Bunkerbefüllung führen und sich negativ auf die Verbrennung auswirken. Große und überlange Partikel können zudem Blockaden in den Fördersystemen oder Brückenbildung im Lager verursachen [55] [63].

Neben physikalischen Qualitätsparametern beeinflussen vor allem die chemischen Inhaltsstoffe das Verbrennungsverhalten biogener Festbrennstoffe (Tabelle 2). Besonders halmgutartige Biomassen wie beispielsweise Weizenstroh oder Gras weisen häufig hohe Gehalte verbrennungskritischer chemischer Inhaltsstoffe auf [18] [39] [42] [63] [73] [97].

Tabelle 2: Einfluss unterschiedlicher chemischer Elemente in biogenen Festbrennstoffen und ihr Einfluss auf die Verbrennung (nach [63])

Element	Einfluss auf die Verbrennung
Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Stickstoff (N)	NO _x - und N ₂ O-Emissionen
Schwefel (S)	SO _x -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Chlor (Cl)	Emissionen von HCl und halogenorganischen Verbindungen (z. B. bei PCDD/F-Bildung), Partikelemissionen
Kalium (K)	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Natrium (Na)	Partikelemissionen
Magnesium (Mg) & Calcium (Ca)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Silizium (Si)	Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten
Schwermetalle ¹	Ascheverwertung, Schwermetallemissionen, z. T. katalytische Wirkung (z. B. bei PCDD/F-Bildung), Partikelemissionen

¹ Relevante Schwermetalle sind Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Blei (Pb), Vanadium (V), Zink (Zn)

Die Summe der auf die Trockenmasse bezogenen Elementgehalte von Kalium (K), Natrium (Na), Zink (Zn) und Blei (Pb) – die sogenannten Aerosolbildner – wird beispielsweise häufig als Indikator für die zu erwartenden Feinstaubemissionen verwendet (vgl. auch Abschnitte 3.1.2 und 3.1.5). Die Summe der aerosolbildenden Elemente charakterisiert den Brennstoff dabei hinsichtlich der bei der Verbrennung stattfindenden Bildung von Feinpartikeln bis 1 µm aerodynamischer Durchmesser (PM1-Emission) und zeigt zugleich auch

erhöhte Ablagerungen an Oberflächen in der Feuerung an. Die aerosolbildende Eigenschaft dieser Elemente geht auf die Tatsache zurück, dass ein Teil dieser semivolatilen und volatilen Elemente – hierzu zählen auch S und Cl – im Glutbett aus dem Brennstoff in die Gasphase freigesetzt werden und später koagulieren oder an Oberflächen, beispielsweise an Wärmetauschern oder an anderen Partikeln, kondensieren können [9] [47] [63] [66] [73] [91] [104] [107].

Bei der Verbrennung von Biomasse entstehen Stickstoffoxidemissionen (d. h. Emissionen von NO und NO₂, angegeben als NO_x). Hierfür ist im Wesentlichen der Brennstoffstickstoffgehalt verantwortlich (vgl. auch Abschnitt 3.1.2) [47] [50] [63] [86] [91] [104].

Neben NO_x- und Partikelemissionen hat die inhaltsstoffliche Zusammensetzung der Brennstoffe maßgeblichen Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten. Hohe Temperaturen im Feuerungsraum führen zu Veränderungen der physikalischen Struktur der Asche, zunächst durch Erweichung der Partikel bis hin zu deren komplettem Aufschmelzen bzw. Zerfließen [86]. Bei Abkühlung im Feuerungsraum kommt es nun zur Verhärtung der flüssigen Asche und es bilden sich Klumpen. Es entstehen u. a. Verklebungen am Rost und im Auffangbehälter, was erhebliche mechanische Probleme für die Anlagentechnik nach sich ziehen kann. Dieses als „Schlackebildung“ bezeichnete Phänomen ist gerade für kleine Feuerungsanlagen zu minimieren [46] [63] [84] [90] [104] [106].

3.1.2 Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens

Für eine erste Einschätzung des Verbrennungsverhalten werden häufig Brennstoffindizes basierend auf der Elementarzusammensetzung der Brennstoffe herangezogen [46] [47] [71] [73] [86] [90] [78]. 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 [50] [90]. Das Niveau der NO_x-Emissionen wird zu einem geringen Teil allerdings auch von der eingesetzten Feuerungstechnik beeinflusst [63] [86] [104].
- **Summe der Aerosolbildner:** Die Summe der aerosolbildenden Elemente – also $\sum(K, Na, Pb, Zn)$ – im Brennstoff wird als Indikator für die Höhe der Staubemissionen mit einem Partikeldurchmesser $\leq 1 \mu\text{m}$ (PM1) sowie für die Bildung von Ablagerungen, z. B. am Wärmetauscher, herangezogen (vgl. auch Abschnitt 3.1.1) [66] [90]. Bei biogenen Festbrennstoffen ist hier v. a. das Element Kalium relevant, dass im Fall holzartiger Biomasse häufig $> 90 \text{ m-\%}$ der aerosolbildenden Elemente ausmacht [69]. Zu beachten ist neben dem absoluten Gehalt an K auch die tatsächliche K-Freisetzung in die Gasphase (siehe molares Si/K- und molares Cl/Si-Verhältnis). Die Gesamtstaubemissionen werden zudem häufig über die Summe der Elemente K, Na, Pb, Zn, S und Cl abgeschätzt.
- **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 laut Literatur eine erhöhte Kaliumfreisetzung in die Gasphase, während für Werte über 2,5 eine Einbindung von Kalium in die Asche dominiert [66] [78].

- **Molares Cl/Si-Verhältnis:** Das molare Cl/Si-Verhältnis erlaubt ebenfalls eine Abschätzung der Kaliumfreisetzung in die Gasphase, wobei steigende Werte des Cl/Si-Verhältnisses auf eine erhöhte Kaliumfreisetzung hindeuten [9] [73] [78] [104].
- **Molares 2S/Cl-Verhältnis:** Das Risiko der Hochtemperaturkorrosion kann durch die Berechnung des molaren 2S/Cl-Verhältnisses abgeschätzt werden. Dabei stellen laut Literaturangaben Werte von über 8 kein Risiko und Werte um 4 ein geringes Risiko dar. Vor allem bei Werten unter 2 muss mit einem erhöhten Korrosionsrisiko gerechnet werden [90].
- **Molares (Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)-Verhältnis:** Das molare (Si + P + K)/(Ca + Mg)-Verhältnis erlaubt eine Abschätzung des Ascheerweichungsverhaltens. Für Werte über 2,5 sind laut Literatur niedrige Ascheschmelztemperaturen zu erwarten [90]. Im Unterschied zu reinen Biomassebrennstoffen ist bei der Verwendung aluminiumbasierter Additive (beispielsweise Kaolin) die Aluminiumkonzentration in Brennstoffen deutlich erhöht. Dies hat eine wirksame Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur zur Folge. Aus diesem Grund sollte für die Abschätzung der Ascheerweichungstemperatur bei additivierten, aber auch generell bei aluminiumreichen Brennstoffen das molare (Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)-Verhältnis verwendet werden [9] [91]. In der Literatur werden zudem mehrere alternative Indizes empfohlen, abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Brennstoffe [46] [105].

Die meisten dieser Indizes wurden empirisch für ausgewählte holzige und halmgutartige Brennstoffe im Labor ermittelt [46] [47] [90]. Aus diesem Grund sind die angegebenen Grenz- bzw. Schwellenwerte lediglich für eine erste Einordnung geeignet und können je nach Brennstoff abweichen.

3.1.3 Optimierung der physikalischen Brennstoffeigenschaften

Die physikalischen Brennstoffparameter lassen sich durch mechanische Verfahren während der Produktion optimieren. Verbessert werden dabei u. a. der Wassergehalt, die Schüttdichte, die Rohdichte, der Feinanteil und die Partikelgrößenverteilung des Brennstoffs sowie dessen Homogenität. Verfahren zur mechanischen Optimierung physikalischer Brennstoffparameter umfassen u. a. folgende Aufbereitungsschritte [63]:

- Trocknungsverfahren zur Verringerung des Wassergehalts [71],
- Zerkleinern und Klassieren/Sieben zur Beeinflussung der Abmessungen, der Partikelgrößenverteilung und des Feinanteils [71],
- Pressen (Pelletieren, Brikettieren) zur Beeinflussung der Rohdichte/Schüttdichte, Abmessungen, Feinanteil, Partikelgrößenverteilung und Brennstoffhomogenität [19] [58] [73].

Weitere Verfahren beinhalten u. a. die aktive Homogenisierung durch Mischen, das Waschen oder die thermische Vorbehandlung, wie z. B. eine Torrefizierung [63].

3.1.4 Optimierung der chemischen Brennstoffzusammensetzung durch Additivierung oder Vermischung

Um die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs zugunsten niedrigerer Emissionen (v. a. Partikel bzw. Aerosole) sowie einer verringerten Störanfälligkeit durch Schlackebildung positiv zu beeinflussen, kann dem Brennstoff entweder ein Additiv zugemischt oder der Brennstoff mit einer zweiten Biomasse anderer Zusammensetzung vermischt werden [42] [57] [63] [73] [106] [107].

Gesamtstaubemissionen: 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 Gehalt an Schwefel (S) und Chlor (Cl). Über die sogenannten sekundären Bildungsreaktionen mit hoher Reaktivität – siehe die Formeln (3.1) bis (3.3) – 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 1200 °C $\text{KOH}_{(g)}$. Diese Verbindungen bilden beim Abkühlen vorwiegend Kaliumsalze (K_2SO_4 , KCl und K_2CO_3), die niedrige Schmelztemperaturen aufweisen und mit dem Abgasstrom mitgerissen werden, wobei $\text{SO}_{2(g)}$ vorher zunächst mit Sauerstoff zu $\text{SO}_{3(g)}$ oxidiert. KCl (fest bei < 760 °C) und K_2SO_4 machen ca. 80 bis 90 % der gesamten anorganischen Aerosolfracht aus.



Wobei: g = gaseous (gasförmig), l = liquid (flüssig), s = solid (fest).

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

Zur Verringerung der Kalium- und Natriumsalzbildung in der Verbrennung stehen folgende Optionen zur Verfügung:

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

In der vorliegenden Studie wurde Kaolin (Abschnitt 4.1.1) als aluminiumbasiertes Additiv verwendet. Aluminium bindet Kalium und Natrium mit Silizium in die Asche ein und erhöht damit den Ascheanfall. Neben aluminiumbasierten Zusatzstoffen wären auch Additive, die den Gehalt an Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel im Brennstoff erhöhen, wie beispielsweise Kalk, Magnesiumoxid, Calciumphosphat, Ammoniumsulfat, Aluminiumsulfat und Eisensulfat, denkbar [56] [57].

Ascheschmelzverhalten: Aschen bestimmter Halmgutbrennstoffe wie z. B. Weizenstroh können bereits ab Temperaturen von 900 °C schmelzen. Daher können solche Brennstoffe nur schwierig bis gar nicht in vorhandenen Holzfeuerungsanlagen eingesetzt werden. Um solche Brennstoffe mit vorhandener Anlagentechnik nutzen zu können, kann das Ascheschmelzverhalten durch Additivieren der Biomasse oder durch Vermischung mit z. B. holzartiger Biomasse positiv beeinflusst werden. Einen großen Einfluss auf die Ascheerweichungstemperatur scheinen aluminiumbasierte Additive zu haben. Jedoch sind – abhängig von der Brennstoffzusammensetzung – auch Magnesium- und Calciumbasierte Additive geeignet, um das Ascheschmelzverhalten positiv zu beeinflussen [5] [42] [57] [73].

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

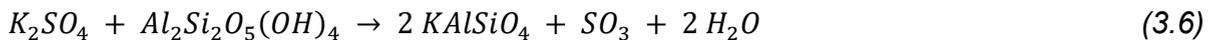
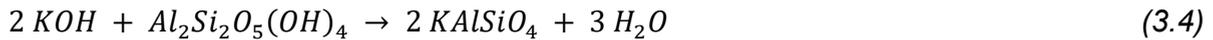
- Zumischung des Additivs zum Brennstoff vor der Pelletierung,
- Zugabe zum Brennstoff (z. B. Holzhackschnitzel, Biomassepellets, Häckselgut) mittels Hinzudosierung in der Brennstoffzuführung zur Feuerungsanlage und
- Zugabe des Additivs mittels Primär- bzw. Sekundärluftstrom in den Brennraum.

3.1.5 Wirkungsweise von Kaolin als Additiv

Eine Kaolinbeimischung zum Brennstoff bewirkt meist eine verringerte Schlackebildung sowie eine Minderung der Feinstaubemissionen (vgl. Abschnitt 3.1.4). Die aus einschlägiger Literatur bekannten aerosolbildenden Elemente sind dabei die Alkalimetalle Kalium (K) und Natrium (Na), die Spurenelemente Zink (Zn) und Blei (Pb) sowie Schwefel (S) und Chlor (Cl) [72] [91], wobei Kalium (K) in biogenen Festbrennstoffen i. d. R. dominiert (vgl. Abschnitt 3.1.2). 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 (siehe Abschnitt 3.1.4) [60].

Kaolin ist ein Tonmineral und besteht zum größten Teil aus dem Mineral Kaolinit ($Al_2[Si_2O_5][OH]_4$). Alkalimetalle wie Kalium können in Anwesenheit von Kaolinit nach den Formeln (3.4) bis (3.9) zu schwerschmelzenden kristallinen Verbindungen wie beispielsweise Kalsilit ($KAlSiO_4$) oder Leucit ($KAlSi_2O_6$) reagieren [80].



Vor allem in halmgutartiger Biomasse können neben hohen Gehalten an Kalium auch deutlich höhere Gehalte an Natrium im Vergleich zu holzartiger Biomasse auftreten. Die Reaktionsgleichungen des Na und die Wechselwirkung mit Kaolinit laufen bei der Verbrennung analog dem Element K ab, wobei im Fall von Na die Verbindungen Nephelin ($NaAlSiO_4$) und Jadeit ($NaAlSi_2O_6$) gebildet werden.

Folgt man den Reaktionsgleichungen (3.4) bis (3.9), so wird deutlich, dass für die stöchiometrische Fixierung von 2 mol K oder 2 mol Na in der Asche 1 mol $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ benötigt wird. Aus diesem Zusammenhang kann die für die Fixierung des Kaliums stöchiometrisch benötigte Menge an Kaolinit unter Verwendung der molaren Massen und des Kalium- bzw. Natriumgehalts in der Biomasse berechnet werden (siehe Abschnitt 4.1.2). Außerdem muss der Kaolinitgehalt des verwendeten Kaolins (hier 78 %) berücksichtigt werden. Zu-

sätzlich können weitere Sicherheitszuschläge einberechnet werden, um die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens und damit die Reaktion der Edukte (Kaolinit- und Kalium- bzw. Natriumverbindungen) zu Aluminiumsilikaten zu erhöhen [7].

Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass es auch zu Reaktionen zwischen Kaolinit und Erdalkali-Metallen (Ca und Mg) kommen kann, was vor allem bei Calcium-reichen holzartigen Brennstoffen (wie z. B. Pappel) beachtet werden sollte. Zuletzt müssen auch die physikalischen Eigenschaften des Kaolins wie z. B. der Vermahlungsgrad und der Wassergehalt berücksichtigt werden. All diese Punkte beeinträchtigen die „Effektivität“ des eingebrachten Kaolinit und erhöhen somit die im Brennstoff benötigte Additivmenge.

3.2 Feuerungstechnik

Eine hohe Brennstoffflexibilität kann neben der Anpassung des Brennstoffs selbst auch durch die Optimierung der Feuerungsanlage auf die Brennstoffeigenschaften ermöglicht werden. Im 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 [63]. Im Leistungsbereich von 0,5 bis $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ 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 [63].

Da die Feuerungen im mittleren Leistungsbereich und die Optimierung der Feuerungstechnik nicht Bestandteil der in diesem Bericht dargestellten Untersuchung waren, werden hier nur die Optimierungspotenziale bei Festbettfeuerungen kurz genannt. Hierzu zählen beispielsweise [63]:

- Rostkühlung bzw. Kühlung des Glutbetts durch Primärluft oder Wasser,
- Senkung der Temperaturen im Glutbett durch Abgas-Rezirkulation,
- Vollständigere Verbrennung durch gezieltere oder extreme Luftstufung [79],
- Reduzierung des Eintrags von Aschepartikeln (oder Additivmaterial) in das Abgas durch niedrige Strömungsgeschwindigkeit oder
- Minimierung des Falschlufteintrags durch verbesserte Anlagendichtigkeit.

3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Paludikulturen als Brennstoff

Die rechtlichen Anforderungen an Festbrennstoffkessel < 500 kW_{th} innerhalb der EU regelt die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG [44]. Nach nationalem Recht sind Anlagen von 4 kW bis < 1 MW_{th} über die 1. BImSchV [12] abgedeckt.

Für Feuerungen von 1 bis 50 MW_{th} gelten die Anforderungen in der MCPD-Richtlinie (*Medium Combustion Plants Directive*, EU 2015/2193 [45]). Sie wurde in Deutschland durch die Einführung der 44. BImSchV (Verordnung über mittelgroße Feuerungsanlagen [1 bis 50 MW_{th}]) umgesetzt [11].

Paludibrennstoffe zählen nach § 3 der 1. BImSchV zu Brennstoffen der Ziffer 8 („Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe“). Für diese Brennstoffe gilt die 1. BImSchV nur bis zu einer thermischen Leistung von < 100 kW_{th}. Anlagen mit einer Nennwärmeleistung ab 100 kW_{th}, die Brennstoffe nach Ziffer 8 einsetzen, sind genehmigungspflichtige Anlagen. Für sie gelten bereits ab 100 kW die Grenzwerte der 44. BImSchV [11]. Ihre Genehmigung erfolgt gemäß 4. BImSchV [13] nach dem vereinfachten Genehmigungsverfahren gemäß § 19 BImSchG (ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) [14].

Für den Einsatz von Paludibrennstoffen zur energetischen Nutzung bedeutet dies hinsichtlich der Errichtung der Feuerungen vornehmlich eine Unterscheidung in Anlagen < 100 kW_{th} und in Anlagen ab 100 kW_{th} Nennwärmeleistung. Kessel nach der 1. BImSchV müssen über eine Typenprüfung nach DIN EN 303-5 zugelassen werden, wodurch die Einzelgenehmigung der Anlage entfällt [35]. Im Fall nicht holziger Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 8 (1. BImSchV) gelten zusätzliche Vorgaben, z. B. bezüglich der Prüfbrennstoffe oder der Messung von NO_x-Emissionen sowie von Dioxinen und Furanen [10]. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Forschungsberichts ist in Deutschland lediglich ein Biomassekessel < 100 kW_{th} über ein Typprüfungsverfahren nach den aktuellen Vorgaben der 1. BImSchV für Brennstoffe der Ziffer 8 zugelassen bzw. ist dem Projektteam kein weiterer zugelassener Kessel bekannt. Somit ist der Einsatz von Paludibrennstoffen in Kleinfeuerungsanlagen < 100 kW_{th} in Deutschland aktuell als größtenteils nicht zulässig einzuordnen. Es ist jedoch zu erwarten, dass zukünftig weitere geeignete und per Prüfverfahren zugelassene Anlagen auf den Markt kommen, da erste Kesselhersteller bereits Interesse an dieser Sparte bekundet und Bestrebungen in diese Richtung unternommen haben.

Im Fall von Feuerungen ab 100 kW_{th} muss die Anlage über die zuständige Behörde (beispielsweise das zuständige Landratsamt) genehmigt werden (4. BImSchV, 44. BImSchV), wodurch in Deutschland bereits erste Feuerungen in der Praxis existieren, die erfolgreich Paludibiomasse als Brennstoff einsetzen [4] [62]. In dieser Leistungsklasse ist in naher Zukunft der Haupteinsatzzweck für Paludibrennstoffe zu sehen.

Die derzeit gültigen Verordnungen nach 1. BImSchV, 4. BImSchV und BImSchG bzw. die neuen Anforderungen gemäß 44. BImSchV, 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 3 für Neuanlagen ge-

genübertgestellt. Zu beachten ist dabei, dass die Grenzwerte unterschiedliche Bezugs-sauerstoffgehalte adressieren, wodurch ein Direktvergleich zwischen den Richtlinien ohne Umrechnung nicht möglich ist. Für Bestandsanlagen gelten abweichende Emissions-grenzwerte, die den jeweiligen Verordnungen zu entnehmen sind.

Tabelle 3: Übersicht der derzeit geltenden Emissionsanforderungen bei der Errichtung von Neuanlagen zur Verbrennung fester Biomasse in der EU und Deutschland[11] [12] [13] [14]

Richtlinie	Geltungs-bereich	Bezugs-sauerstoff in Verord-nung	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					
Ökode-sign	< 500 kW _{th}	10 %	Biomasse	29 ^{a)}	15 ^{a)}	364 ^{a)}	145 ^{a)}	–	–
1. BImSchV	4 kW _{th} bis < 1 MW _{th}	13 %	naturbelasse-nes Holz	20	–	400	–	–	–
			nicht holzar-tige Bio-masse ^{b)}	20	–	400 250 ^{c)}	– 500 ^{c)}	–	–
MCPD	1 MW _{th} bis 50 MW _{th}	6 %	naturbelasse-nes Holz	27 ¹ (1 bis 5 MW) 16 ¹ (5 bis 20 MW) 11 ¹ (20 bis 50 MW)	–	–	267 ¹ (1 bis 5 MW) 160 ¹ (5 bis 50 MW)	–	–
			nicht holzar-tige Bio-masse	27 ¹ (1 bis 5 MW) 16 ¹ (5 bis 20 MW) 11 ¹ (20 bis 50 MW)	–	–	267 ¹ (1 bis 5 MW) 160 ¹ (5 bis 50 MW)	107 ¹	–
			naturbelasse-nes Holz	19 ² (< 5 MW) 11 ² (> 5 MW)	5 ²	117	197 ² (< 5 MW) 160 ² (5 bis 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 bis 20 MW) 107 ² (< 20 MW)	107 ²	24
44. BImSchV	100 kW _{th} bis < 1 MW _{th}	–	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 Abs. 1, Nr. 8 und 13) wie z. B. Stroh ist die Nennwärmeleistung in der 1. BImSchV von 4 bis < 100 kW_{th} beschränkt. Anlagen ab 100 kW_{th} zählen zu den genehmigungspflichtigen Anlagen. Hier greift die 44. BImSchV.

c) Zusätzliche Anforderungen bei der Typenprüfung für Anlagen mit den in § 3 Abs. 1 Nr. 8 und 13 1. BImSchV genannten Brennstoffen (NO_x: 500 mg/Nm³, CO: 250 mg/Nm³).

¹ Bestandsanlagen MCPD (1 bis < 20 MW): Staub 27 mg/Nm³, NO_x 347 mg/Nm³, SO₂ 107 mg/Nm³ (160 mg/Nm³, wenn ausschließlich Stroh verfeuert wird); (20 bis < 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 naturbelassenen Holzes abweichend zu den Werten in der Tabelle: Staub bei Anlagen, die vor 20.06.2019 mit einem Staubfilter ausgerüstet wurden, 27 mg/Nm³ (1 MW bis < 5 MW) und 16 mg/Nm³ (ab 5 MW), org. C 8 mg/Nm³, NO_x 197 mg/Nm³ (ab 5 MW); bei Einsatz sonstiger Biomasse: Staub 27 mg/Nm³ (< 1 MW) und 16 mg/Nm³ (ab 1 MW), org. C 8 mg/Nm³, NO_x 197 mg/Nm³ (ab 20 MW), NO_x 320 mg/Nm³ (< 20 MW); SO₂ 160 mg/Nm³ (< 1 MW).

3.4 Einschränkungen für Additive durch Vorgaben in Brennstoffnormen und Verordnungen

Bezüglich der Brennstoffnormung von Paludibiomasse sind verschiedene internationale Normen für biogene Festbrennstoffe rund um die DIN EN ISO 17225-1 [39] anzuführen. In diesen finden sich zunächst Angaben zu den verwendbaren Rohmaterialien. Daneben werden definierte Anforderungen an die Brennstoffqualität festgelegt und die anzuwendenden Prüfverfahren dargestellt. Bezüglich der Brennstoffqualität nicht holziger Biomassebrennstoffe gelten die Vorgaben der DIN EN ISO 17225-1 (Allgemeine Anforderungen) [39], DIN EN ISO 17225-6 (nicht holzige Pellets) [37] und DIN EN ISO 17225-7 (nicht holzige Briketts) [38]. Die DIN EN ISO 17225-6 wurde 2021 auf ISO-Ebene novelliert und in der deutschen Fassung veröffentlicht. Sie ist auszugsweise in Tabelle 4 wiedergegeben.

Tabelle 4: Spezifikationen für Pellets aus nicht holziger Biomasse nach Tabelle 1 und 2 gemäß DIN EN ISO 17225-6 (Auszug) [37], wf = wasserfreie Bezugsbasis

Parameter	Einheit	A	B	Rohrglanzgras (<i>Phalaris arundinacea</i>)
Herkunft		2 Halmgutartige Biomasse 3 Biomasse von Früchten 4 Aquatische Biomasse 5 Mischungen		2.1.2.1 Gras, Ganzpflanze
Wassergehalt (M)	m-%	M12 ≤ 12	M15 ≤ 15	M12 ≤ 12
Aschegehalt (A)	m-% (wf)	A6.0 ≤ 6	A10 ≤ 10	A8.0 ≤ 8 A8.0+ ≥ 8
Mechanische Festigkeit (DU)	m-%	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.0 ≥ 96,0	DU97.5 ≥ 97,5
Feinanteil (F)	m-%	F2.0 ≤ 2,0	F3.0 ≤ 3,0	F1.0 ≤ 1,0
Additiv	m-% (wf)	< 5 Art und Menge sind anzugeben		Art und Menge sind anzugeben
Heizwert (Q)	MJ/kg (wf) kWh/kg (wf)		Q14.5 ≥ 14,5 Q4.0 ≥ 4,0	
Schüttdichte (BD)	Kg/m ³		BD600 ≥ 600	BD550 ≥ 550
Stickstoff (N)	m-% (wf)	N1.5 ≤ 1,5	N2.0 ≤ 2,0	N2.0 ≤ 2,0
Schwefel (S)	m-% (wf)	S0.20 ≤ 0,20	S0.30 ≤ 0,30	S0.20 ≤ 0,20

Chlor (Cl)	m-% (wf)	Cl _{0,10} ≤ 0,10	Cl _{0,30} ≤ 0,30	Cl _{0,10} ≤ 0,10
Arsen (As)	mg/kg (wf)	≤ 1	≤ 1,5	≤ 1
Cadmium (Cd)	mg/kg (wf)		≤ 0,5	
Chrom (Cr)	mg/kg (wf)		≤ 50	
Kupfer (Cu)	mg/kg (wf)		≤ 20	
Blei (Pb)	mg/kg (wf)		≤ 10	
Quecksilber (Hg)	mg/kg (wf)		≤ 0,1	
Nickel (Ni)	mg/kg (wf)		≤ 10	
Zink (Zn)	mg/kg (wf)		≤ 100	
Ascheschmelzverhalten	°C	Erweichungstemperatur (DT), Halbkugeltemperatur (HT) und Fließtemperatur (FT) sind anzugeben		

Gemäß DIN EN ISO 16559 [20] gilt ein Biomassebrennstoff per Definition prinzipiell als chemisch behandelt, wenn er mit Chemikalien in Berührung gekommen ist. Gleichwohl wird in der aktuellen internationalen Norm für Pellets aus nicht holziger Biomasse (DIN EN ISO 17225-6 [37]) eine Zugabe von Additiven geduldet (Tabelle 4). Als Additiv wird darin ein Material bezeichnet, „das zielgerichtet zu dem als Ausgangsmaterial verwendeten Brennstoff zugegeben wurde, um die Qualität des Brennstoffs (z. B. die 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. Zur Herstellung nicht holziger Pellets der Klassifikation A und B können gemäß DIN EN ISO 17225-6 bis zu 5 m-% solcher Additive verwendet werden. Für ausgewählte Kulturen wie *Miscanthus giganteus* oder *Phalaris arundinacea* gibt die DIN EN ISO 17225-6 sogar eine eigene Klassifikation an. Im Fall von *Phalaris arundinacea* muss demnach die Menge an Additiv lediglich angegeben werden, ist jedoch nicht limitiert (Tabelle 4). Abweichend von den genannten Normen ist in Deutschland die Bindemittelverwendung für Brennstoffe in Kleinfeuerungen (bis 1000 kW Nennwärmeleistung) stärker eingeschränkt. Sie sind prinzipiell nicht zulässig. Ausnahmen sind lediglich möglich, wenn es sich um Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Stearin, Melasse oder Zellulosefaser handelt (§ 3 Abs. 4 1. BImSchV).

Im Gegensatz zu Holzpellets existieren für Pellets aus nicht holzigen Rohstoffen keine normbezogenen Vorgaben in der aktuell gültigen 1. BImSchV. Es wird derzeit weder auf die DIN EN ISO 17225-6 [37] noch auf die DIN EN ISO 17225-7 [38] Bezug genommen. Die Verwendung der Rohstoffe ist jedoch wegen der aktuell sehr aufwendigen Anforderungen an die spezielle Typenprüfung der entsprechenden Feuerungsanlagen < 100 kW_{th} nahezu vollständig unterbunden (siehe auch Unterkapitel 3.3).

4 Material und Methoden

4.1 Brennstoffe

Für die Analysen zur thermischen Nutzung von Paludikulturen kamen im Rahmen des Projekts „MOORuse“ Brennstoffe in Form von Häckselgut, vor allem aber in Form von Biomassepellets ($\varnothing = 6 \text{ mm}$) zum Einsatz. Die Bereitstellung des Häckselguts erfolgte über die Hochschule für angewandte Wissenschaften Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) (siehe Abschnitt 4.1.1). Die anschließende Produktion der Pellets sowie die Analyse der Brennstoffqualität erfolgte am TFZ (vgl. Abschnitte 4.1.2 bis 4.1.5).

4.1.1 Bereitstellung der Rohmaterialien und Additiv

Während der Projektlaufzeit wurden zu drei Erntezeitpunkten (Februar 2018, Februar 2019, Februar 2020) jeweils vier Chargen Paludibrennstoffe (*Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, *Carex ssp.*) von der Versuchsfläche Freisinger Moos ($48^{\circ}22'43'' \text{ N}$, $11^{\circ}41'00'' \text{ O}$) geerntet (siehe Abbildung 1, Tabelle 5). Die Materialien wurden jeweils gehäckselt und durch Belüftungstrocknung in Containern getrocknet. Anschließend wurden sie in einer überdachten Lagerhalle für mehrere Wochen gelagert.



Abbildung 1: Paludibrennstoffe (Häckselgut) aus der Ernte vom Februar 2018 und das im Projekt verwendete Additiv: Rohrkolben (*Typha ssp.*, oben links); Schilfrohr (*Phragmites australis*, oben rechts); Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*, unten links); Seggen (*Carex ssp.*, unten rechts); Kaolin (Mitte)

Die Lieferung an das TFZ erfolgte jeweils im März 2018, im Mai 2019 und im November 2020. Alle Häckselgut-Brennstoffe wurden bei Anlieferung repräsentativ beprobt und hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Brennstoffeigenschaften analysiert (vgl. Abschnitt 4.1.5).

Tabelle 5: Häckselgutbrennstoffe aus Paludikulturen von der Versuchsfläche Freisinger Moos, geerntet jeweils im Februar 2018, 2019 und 2020

Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
<i>Typha ssp.</i>	Rohrkolben
<i>Phragmites australis</i>	Schilfrohr
<i>Phalaris arundinacea</i>	Rohrglanzgras
<i>Carex ssp.</i>	Seggen

Als Referenzbrennstoff für die Feuerungsversuche kamen zwei handelsübliche Holzpelletbrennstoffe (ENplus A1-Qualität) mit einem Durchmesser von 6 mm zum Einsatz. Die Brennstoffe wurden durch das TFZ als Sackware beschafft. Als dritter Referenzbrennstoff wurden 6-mm-Pellets aus Weizenstroh aus dem ebenfalls am TFZ durchgeführten ERANET-Projekt „BioFlex!“ verwendet [8] [73] [74]. Zusätzlich wurde eine Torfprobe von der Versuchsfläche „Freisinger Moos“ manuell gewonnen und analysiert.

Als Additiv zur Reduzierung der partikelförmigen Emissionen sowie zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens wurde das aluminiumbasierte Tonmineral Kaolin ausgewählt. Dieser Zuschlagstoff der Firma Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG besteht zu 78 m-% aus reinem Kaolinit. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Kaolins der Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG, in Masseprozent (wf = wasserfreie Bezugsbasis)

Verbindung	Massenanteil in m-% (wf)
SiO ₂	43,00
Al ₂ O ₃	31,50
Fe ₂ O ₃	2,20
CaO	0,20
MgO	0,30
K ₂ O	1,50
Na ₂ O	< 0,10
P ₂ O ₅	0,10

4.1.2 Stöchiometrische Berechnung der minimal benötigten Menge an Additiv pro Brennstoff

Die Kaolin-Additivierung zielt darauf ab, die Alkalimetalle K und Na zusammen mit dem Al des Kaolins in der Asche zu binden. Für die Ermittlung der minimal benötigten Zuschlagsmenge wurde auf die Guidelines des ebenfalls am TFZ bearbeiteten ERA-NET Projekts „BioFlex! – Clean and flexible use of new difficult biomass fuels in small to medium-scale combustion“ zurückgegriffen [8]. Hierfür waren die Analysen zu den Elementkonzentrationen in den Brennstoffen (siehe Abschnitt 4.1.5) und im Additiv (siehe Abschnitt 4.1.1) erforderlich. Die benötigte Menge an Additiv berechnet sich daraus wie folgt:

- Umrechnung der aschebildenden Elemente in der Biomasse und des Additivs von mg/kg (wasserfreie Bezugsbasis) 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 $Additiv_{theo_min}$ nach Formel (4.1) in mol/kg der jeweiligen Biomasse, um alle Alkalimetalle K und Na zu binden.

$$Additiv_{theo_min} = (K_{Brennstoff} + Na_{Brennstoff})/2 \quad (4.1)$$

- 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} ...) durch Formel (4.2).

$$Additiv_{level(I)} = \frac{Additiv_{theo_min}}{\frac{Al_{add} - (K_{add} + Na_{add} + 2(Ca_{add} + Mg_{add}))}{Al_{add}}} \quad (4.2)$$

- Um weitere potenzielle Unsicherheiten und limitierende Effekte auf Funktionalität, Verfügbarkeit und Effizienz des Additivs zu berücksichtigen, kann ein Faktor von z. B. 10 % herangezogen werden, siehe Formel (4.3). Dieser Faktor sollte basierend auf den spezifischen Gegebenheiten sowie an die experimentellen Erfahrungen des Anwenders dieser Methode angepasst werden. Solche Gegebenheiten werden in den im Projekt „BioFlex!“ erarbeiteten „Guidelines for advanced fuel and boiler design“ [8] beschrieben.

$$Additiv_{leve(II)} = \frac{Additiv_{level(I)}}{0,9} \quad (4.3)$$

4.1.3 Infrastruktur für die Pelletierung

Die Produktion der Pellets aus Paludibrennstoffen erfolgte am Betriebshof des TFZ. Hierfür kamen ein Futtermittelmischer und eine Pelletieranlage zum Einsatz. Bei der Pelletieranlage handelt es sich um eine Flachmatrizenpresse der Firma Amandus Kahl GmbH & Co. KG (Typ 33-390, siehe Abbildung 2).

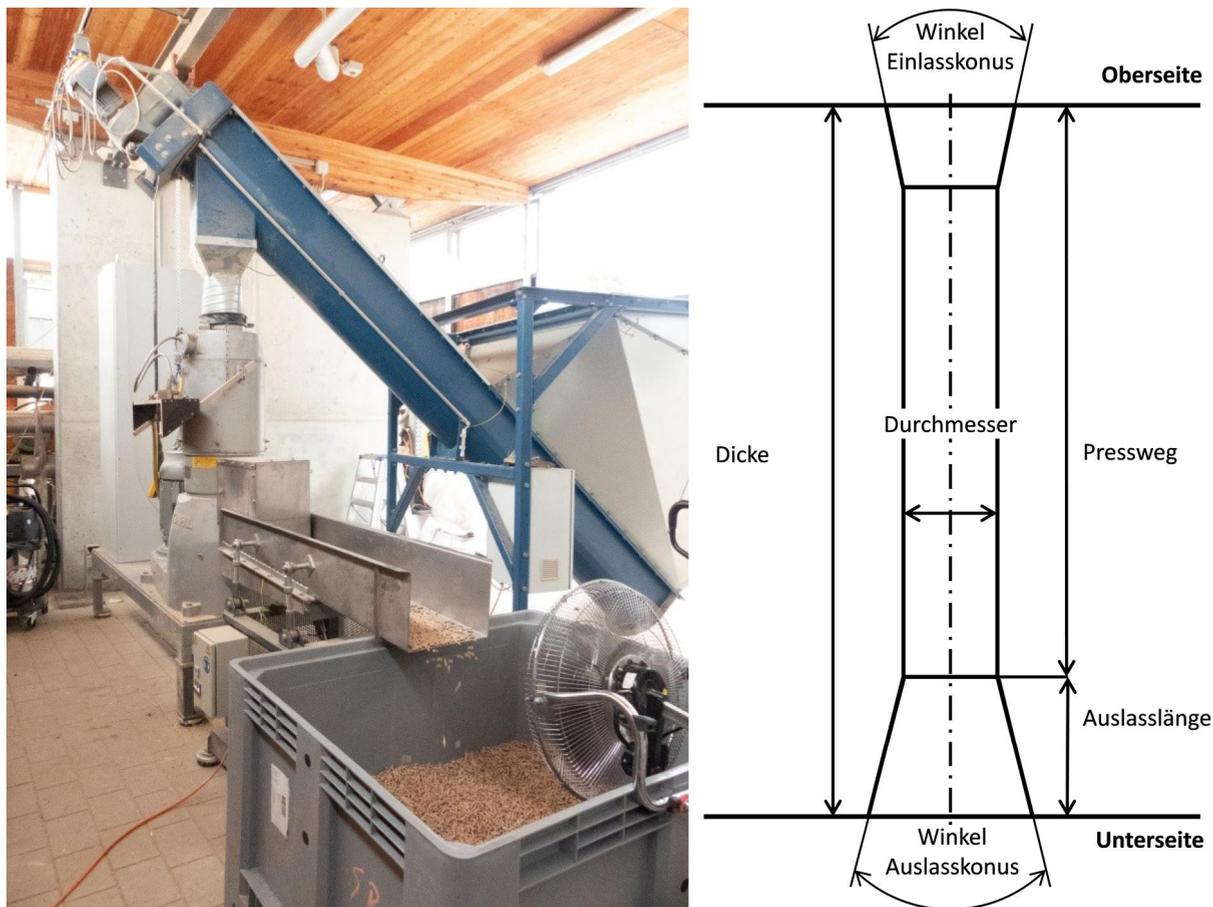


Abbildung 2: Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) am TFZ mit Materialzufuhr und Vibro-Rinne (links) sowie schematische Darstellung eines Presskanals einer beidseitig nutzbaren Flachmatrize (rechts)

Die technische Spezifikation der Flachmatrizenpresse ist in Tabelle 7 zusammengestellt. Der Vorteil einer Flachmatrizenpresse liegt darin, dass sie – ausgestattet mit den entsprechenden Matrizen – sowohl zur Zerkleinerung der Biomasse als Kollermühle als auch zum Pelletieren verwendet werden kann. 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 2) [63].

Tabelle 7: Technische Spezifikationen der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390

Parameter	Wert
Kollerdurchmesser/-breite in mm	230/77
Matrizendurchmesser in mm	390
Anzahl der Koller	2
Antriebsmotor in kW/bei Umdrehungen pro min	15–30/1500
Kollergeschwindigkeit in m/s	2,2
Matrizenlochfläche in cm ²	617
Maschinengewicht in kg	1150

Für die Konditionierung des zerkleinerten Materials mit Wasser und Additiv kam ein Futtermittelmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK) zum Einsatz (Abbildung 3, Tabelle 8). Die Einwaage der Biomasse erfolgt in großen Hartkunststoffkisten mittels eines Hubwagens mit integrierter Waage mit einer Auflösung von 1,0 kg (Sax GmbH, HP ESR 20). Die Wasserzugabe erfolgte mittels einer Weißel-Spritze, die mit konstantem Druck über am Deckel des Futtermittel-mischers verbaute Düsen Wasser zugibt. Die zugegebene Menge an Wasser wurde über die Gewichtsänderung der Weißel-Spritze definiert. Hierzu wurde die Plattformwaage B2.2 der PESA WAAGEN GmbH mit einer Genauigkeit von 0,01 kg verwendet. Das Additiv wurde auf einer Plattformwaage mit einer Auflösung von 0,001 kg (PESA WAAGEN AG, GPW-30K-B1 W2) eingewogen. Die Zugabe des Additivs erfolgte manuell über dafür vorgesehene Schlitze im Deckel des Futtermittel-mischers. Sowohl Wasser als auch Additiv wurden gleichzeitig während des Homogenisierungsprozesses zugegeben.

Tabelle 8: Technische Spezifikationen des verwendeten Futtermittel-mischers

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



Abbildung 3: Konditionierung gemahlener Paludibrennstoffe mit Kaolin im Futtermittelmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK)

Vor der Pelletierung besteht zudem 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.

4.1.4 Zerkleinerung und Pelletierung der Paludibrennstoffe

Die Häckselgutbrennstoffe aus der Ernte im Februar 2019 wurden in der Pelletieranlage des TFZ zunächst zerkleinert und anschließend pelletiert. Die Zerkleinerung erfolgte in der Kollermühle mit einer 6-mm-Lochmatrize (Matrize „A“, siehe Tabelle 9). Anschließend wurde der Wassergehalt des gemahlene Materials nach DIN EN ISO 18134-1 [24] bestimmt. Die zerkleinerte Biomasse wurde dann mit einer definierten Menge Wasser im Futtermittelmischer vermischt. Im Fall additiver Pellets wurde das Kaolin in einem zweiten Schritt zu der bereits befeuchteten Biomasse hinzugegeben, um eine bessere Adhäsion des Additivs an den Biomassepartikeln zu erzielen. Die Masse an Kaolin von 0,6 bis 2,3 m-%, die je Material benötigt wurde, ergab sich aus stöchiometrischen Berechnungen nach den in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Formeln sowie inhaltsstofflichen Analysen der Brennstoffe und des Additivs. Anschließend wurde die Biomasse im Futtermittelmischer für weitere 15 min gemischt und über Nacht stehen gelassen, um einen homogenen Wassergehalt gemäß Tabelle 10 für die Pelletierung zu gewährleisten.

Tabelle 9: Im Projekt „MOORuse“ verwendete Matrizen für die Zerkleinerung und Pelletierung von Paludibrennstoffen

Matrize	Einheit	A	B
Matrizendicke	mm	30	36
Lochdurchmesser	mm	6,0	6,0
Beidseitig nutzbar	–	ja	ja
Einlasskonus oben	°	60,0	30,0
Auslasskonus unten	°	60,0	60,0
Pressweg	mm	6,0	24,0
Auslasslänge	mm	24,0	12,0
Pressverhältnis oben	–	1 : 1,0	1 : 4,0
Pressverhältnis unten	–	1 : 5,0	1 : 6,0
Anwendung	–	Zerkleinern	Pelletieren

Je nach Art der Biomasse bzw. Mischung und des Additivgehalts muss zur Pelletierung eine geeignete Matrize ausgewählt werden. Für die hier dargestellten Versuche wurde eine Matrize mit einer Stärke von 36 mm und einem Pressverhältnis von 1 : 4,0 bzw. von 1 : 6,0 gewählt (Tabelle 9).

Tabelle 10: Ausgangswerte für die Pelletierung von Paludibrennstoffen

Brennstoff	Variante	Wassergehalt für Pelletierung in m-%	Pressverhältnis
<i>Typha ssp.</i>	ohne Kaolin	14	1:4,0 (Matrize „B“ oben)
<i>Phragmites australis</i>	ohne Kaolin	15	1:6,0 (Matrize „B“ unten)
<i>Phalaris arundinacea</i>	ohne Kaolin	16	1:6,0 (Matrize „B“ unten)
<i>Carex ssp.</i>	ohne Kaolin	14	1:6,0 (Matrize „B“ unten)
<i>Typha ssp.</i>	2,3 m-% Kaolin	14	1:4,0 (Matrize „B“ oben)
<i>Phragmites australis</i>	0,6 m-% Kaolin	14	1:4,0 (Matrize „B“ oben)
<i>Phalaris arundinacea</i>	1,2 m-% Kaolin	14	1:4,0 (Matrize „B“ oben)
<i>Carex ssp.</i>	1,5 m-% Kaolin	14	1:4,0 (Matrize „B“ oben)



Abbildung 4: Seggenpellets (*Carex ssp.*) mit 1,5 m-% Kaolin, produziert mit der Pelletieranlage des TFZ

4.1.5 Probenahme und Brennstoffanalysen

Die Probenahme der Brennstoffe (Häckselgut, gemahlenes Material, Pellets) erfolgte nach DIN EN ISO 18135 [32] repräsentativ für die jeweilige Charge direkt am Tag der Anlieferung bzw. während der Produktion. Für größere Pelletchargen kam eine Probenahmezanze zum Einsatz. Alle Brennstoffe wurden hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Brennstoffqualitätsparameter nach DIN EN ISO Norm für biogene Festbrennstoffe analysiert (Tabelle 11). Die Messung der physikalischen Parameter erfolgte über die Labore des TFZ. Die Analyse der chemischen Brennstoffqualität sowie des Ascheschmelzverhaltens wurde an externe Labore vergeben.

Je Häckselgutcharge wurden zum Zeitpunkt der Anlieferung sechs bis zwölf Proben für die Bestimmung des Wassergehalts und drei Proben zur Bestimmung der Schüttdichte gewonnen, abhängig vom Gesamtumfang der Lieferung. Gleichzeitig erfolgte die Probenahme für die Analyse des Aschegehalts ($n = 3$), des Heizwerts (Mischprobe, $n = 1$) und der chemischen Inhaltsstoffe (Mischprobe, $n = 1$). Hierzu wurden mehrere über die Gesamtcharge verteilte Teilproben zu größeren Mischproben vereint. Diese wurden in einer Laborschneidmühle vollständig gemahlen, homogenisiert und repräsentativ auf die jeweils gewünschte Probenmenge nach DIN EN ISO 14780 [31] reduziert.

Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Messprogramm für die allgemeine Untersuchung der Brennstoffqualität wurde vor jedem Feuerungsversuch der Wassergehalt der Brennstoffe analysiert ($n = 3$) um die Bedingungen zum Zeitpunkt der Verbrennung genau darstellen zu können.

4.2 Feuerungsversuche

Die Feuerungsversuche wurden am Feuerungsprüfstand des TFZ durchgeführt (siehe Unterkapitel 5.3). Hierzu wurden zwei Kessel verwendet, ein 30-kW-Biomassekessel (Kessel 1) und ein 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2). Zum Einsatz kamen zwölf (+ 1) Pelletbrennstoffe und zwei Brennstoffe aus Häckselgut (siehe Tabelle 12). Für die Häckselgutversuche musste auf Material zurückgegriffen werden, das mit der Flachmatrizenpresse vorge-mahlen worden war, da eine Zuführung des nicht gemahlene Materials über die Förder-schnecke des verwendeten Kessels aufgrund von Verstopfungen der Förderwege nicht möglich war.

Tabelle 12: Paludi- und Referenzbrennstoffe für Versuche am TFZ

Biomasse	Aufbereitung	Additivierung/ Mischung	Herkunft
Holz (1) ¹	Pellets (Referenz)	–	Bioflex! [73]
Holz (2) ²	Pellets (Referenz)	–	FuturePelletSpec [75]
Weizenstroh ³	Pellets (Referenz)	–	Bioflex! [73]
<i>Typha</i> ^{1, 2}	Pellets	–	Freisinger Moos
<i>Phragmites</i> ¹	Pellets	–	Freisinger Moos
<i>Phalaris</i> ^{1, 2}	Pellets	–	Freisinger Moos
<i>Carex</i> ¹	Pellets	–	Freisinger Moos
<i>Typha</i> ^{1, 2}	Pellets	2,3 m-% Kaolin	Freisinger Moos
<i>Phragmites</i> ¹	Pellets	0,6 m-% Kaolin	Freisinger Moos
<i>Phalaris</i> ^{1, 2}	Pellets	1,2 m-% Kaolin	Freisinger Moos
<i>Carex</i> ¹	Pellets	1,5 m-% Kaolin	Freisinger Moos
<i>Phalaris</i> -Holz-Mischung ²	Pellets	10:90 Mischung	Freisinger Moos
<i>Phalaris</i> -Holz-Mischung ²	Pellets	30:70 Mischung	Freisinger Moos
<i>Phalaris</i> ¹	Gem. Häckselgut	–	Freisinger Moos
<i>Phalaris</i> ¹	Gem. Häckselgut	1,2 m-% Kaolin	Freisinger Moos

¹ Verwendung in Kessel 1 (Biomassekessel, 30 kW).

² Verwendung in Kessel 2 (Pelletkessel, 15 kW).

³ Nicht im Verbrennungsversuch verwendet.

Versuche im Kessel 1 fanden mit allen Paludibrennstoffen (pur und mit Kaolin) statt, wohingegen in Kessel 2 eine Auswahl an 7 Brennstoffen inkl. 2 Mischungen zwischen *Phalaris* und Holzbrennstoffen (Mischungsverhältnis 10:90 und 30:70) verwendet wurde.

Homogene Mischungen aus *Phalaris arundinacea* Pellets und Holzpellets wurden manuell durch Mischen der Pellets mit einer Schaufel und anschließendem dreimaligen Umsetzen der kompletten Schüttung hergestellt.

4.2.1 Kessel 1 – 30-kW-Biomassekessel

Beim Kessel 1 handelt es sich um den 30-kW-Biomassekessel. Dieser Kessel ist laut Hersteller für die Verbrennung von Holzhackschnitzel und Pellets, aber auch für Energiekorn und Miscanthus geeignet. In Deutschland ist er für Holzbrennstoffe zugelassen.

Der Brennstoff wird über eine Stokerschnecke seitlich in die Brennkammer gefördert und gelangt so auf den bewegten Treppenrost. Die Füllmenge wird mittels einer Füllstandszunge überwacht. Die Primärluft tritt von unten durch den Rost in den Brennraum ein. Der Brennstoff wird während der Verbrennung über den bewegten Treppenrost und nach dem Holzkohleausbrand am Ende des Rosts über eine Ascheschnecke in den Aschebehälter befördert. Die erzeugten Brenngase verlassen die Primärbrennkammer über eine Wirbeldüse. 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. Das abgekühlte Abgas wird aktiv über das integrierte Saugzuggebläse abgeführt. Im Abgasstutzen des Kessels ist die Lambdasonde zur Messung des Restsauerstoffgehalts im Abgas verbaut.

Der Kessel liefert nach Herstellerangaben eine Wärmeleistung von 7 bis 30 kW bei einer Vorlauftemperatur von 65 bis 80 °C für Holzhackschnitzel 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.

Dieser Kessel wurde für die Feuerungsversuche ausgewählt, da er aufgrund des bewegten Treppenrosts wenig störanfällig für aschereiche Brennstoffe mit einem niedrigeren Ascheschmelzpunkt sein sollte. Dennoch wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei den meisten der hier verwendeten Brennstoffe zwar um Regelbrennstoffe gemäß § 3 Abs. 1 der 1. BImSchV handelt, der Kessel nach deutschem Recht auf diese aber nicht zugelassen ist und Paludibrennstoffe auch vom Hersteller nicht für diesen Kessel freigegeben sind.

4.2.2 Kessel 2 – 15-kW-Pelletkessel

Als Kessel 2 kam ein 15-kW-Pelletkessel zum Einsatz. Dieser ist ausgelegt für die Verwendung von Holzpellets (A1-Qualität nach ENplus oder DIN EN ISO 17225-2) und nicht für die Verwendung von Agrarbrennstoffen.

Die Pellets werden in der Praxis aus einem bis zu 20 m entfernten Lagerraum mit einer Saugturbine in den Vorratsbehälter im Kessel gefördert. Dieser Behälter hat ein Fassungsvermögen von 30 kg. Der Brennstoff passiert vom Vorratsbehälter über eine Dosierschnecke zunächst eine Zellradschleuse und wird dann über eine Stokerschnecke seitlich in die Brennkammer gefördert. Er gelangt so auf den bewegten Drehrost. Bei einem Neustart werden die Pellets mit einem keramischen Glühkörper entzündet. Der Ausbrand erfolgt in einer ungekühlten, heißen Brennkammer aus Edelstahl, bevor die Heizgase im Wärmetauscher die Wärme an das Heizwasser abgeben. Eine Lambdasonde soll in Verbindung mit dem drehzahlgeregelten Saugzugventilator einen hohen Wirkungsgrad gewährleisten. In Feuerpausen erfolgt eine automatische Reinigung, indem der Rost gegen einen Kamm gedreht wird. Durch Bewegung der Wirbulatoren werden alle Wärmetauscherzüge täglich automatisch gereinigt. Unter dem Rost und dem Wärmetauscher fördern zwei Ascheschnecken die Asche in eine abnehmbare Aschebox.

Der Kessel liefert nach Herstellerangaben eine Wärmeleistung von 4,4 bis 14,9 kW bei einer Vorlauftemperatur von 65 bis 80 °C für Holzpellets. Der vom Hersteller geforderte Schornsteinzug beträgt > 3 Pa bei Nennlast. Über 15 Pa ist ein Zugbegrenzer notwendig. Das Aschebehältervolumen liegt bei 12 l.

Besonders für Kessel 2 wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den meisten der hier verwendeten Brennstoffe nicht um Regelbrennstoffe gemäß § 3 Abs. 1 1. BImSchV handelt, für die der Kessel zugelassen ist und die auch vom Hersteller nicht für diesen Kessel freigegeben wurden.

4.2.3 Prüfstands Aufbau

Die Feuerungsversuche wurden am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums durchgeführt. Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Messstrecke sowie die Anordnung der Messgeräte.

Um den Brennstoffverbrauch während der Feuerungsversuche zu bestimmen, wurde Kessel 2 auf eine Plattformwaage (Plattformwaage MT KD600, Mettler-Toledo GmbH) mit einer Auflösung von 0,005 kg platziert. Bei den Versuchen mit Kessel 1 befand sich der Vorratsbehälter zur kontinuierlichen Erfassung des Brennstoffverbrauchs auf derselben Waage.

Die Abgasmessstrecke bestand aus Edelstahlrohren (V2A). Der untere Teil der Messstrecke, vom Abgasstutzen bis zur Messstelle für den Gasanalysator, hatte einen Innendurchmesser von 150 mm (Kessel 1) bzw. 110 mm (Kessel 2). Der obere Teil der Messstrecke wurde auf 100 mm (Kessel 1) bzw. 80 mm (Kessel 2) verjüngt. Die Messung der Staubemissionen erfolgte in Anlehnung an die VDI 2066 Blatt 1 mit Quarzplanfiltern und vorgeschalteter, mit Quarzwolle gestopfter Hülse (Staubprobenahmeapparatur Paul Gothe GmbH) [98]. 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 160 °C, da bei dieser Temperatur auch die organischen Kohlenwasserstoffe (org. C) mittels Flammenionisationsdetektor (Mess- & Analysentechnik GmbH CnHm-Analysator ThermoFID) gemessen wurden. Die Vorbehandlung der Filter erfolgte bei 180 °C, die Nachbehandlung ebenfalls bei 160 °C. 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.

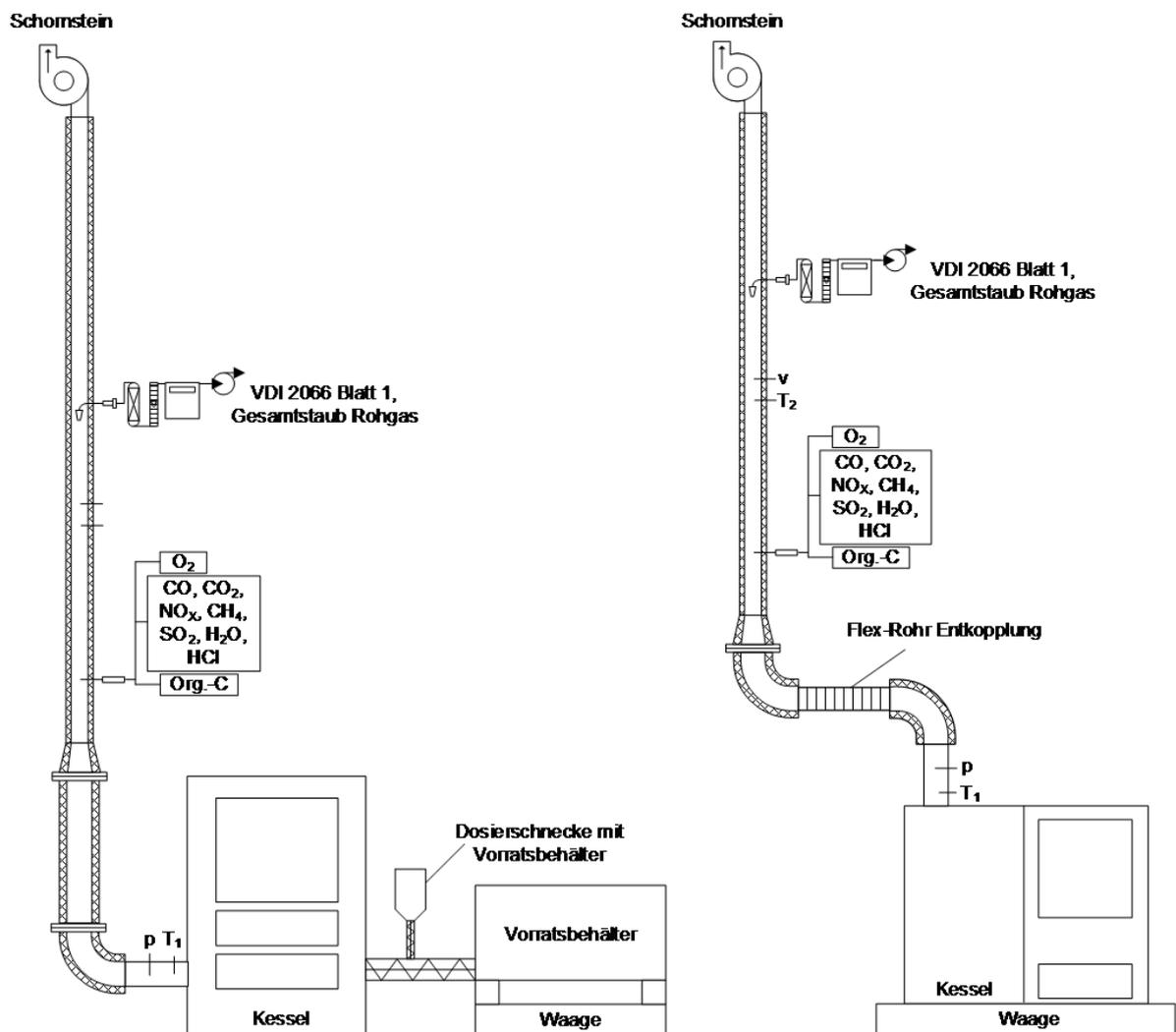


Abbildung 5: Versuchsaufbau der Abgasmessstrecke für Kessel 1 (links) und Kessel 2 (rechts) am Feuerungsprüfstand des TFZ (Skizze nicht maßstäblich; T: Temperaturmessung, v: Gasgeschwindigkeitsmessung, p: Förderdruckmessung)

Die verwendeten Kessel wurden wasserseitig an eine Wärmeleistungsmessstrecke angeschlossen, die den Anforderungen der DIN EN 303-5 [35] zur Erfassung der Wärmeleistung entspricht. Dadurch kann die abgegebene Nutzwärme direkt über den Wasserdurchfluss (Endress + Hauser Promag 53) und die Spreizung zwischen Vor- und Rücklaufemperatur (PT100 Thermokon) ermittelt werden. Gleichzeitig kann über diese Wärmeleistungsmessstrecke die Abnahme der Wärmeleistung vom Kessel geregelt werden (Nennlast- und Teillastbetrieb). Die Kessel wurden soweit möglich bei Nennlast (30 kW bzw. 15 kW) und bei einem vom Hersteller vorgegebenen konstanten Förderdruck (Kessel 1: -15 ± 2 Pa; Kessel 2: -12 ± 2 Pa) betrieben.

Für die Versuche mit gemahlenem Häckselgut (nur an Kessel 1) wurde das Additiv direkt über eine in die Förderschnecke, d. h. zwischen Brennstoffaustrag und Kessel integrierte separate Zuführung zu dem Brennstoff während des Versuchs hinzudosiert (Abbildung 6). Um die gewünschte Menge Additiv sicherzustellen, wurden zunächst die Durchsätze des gemahlenen Häckselguts und des Additivs mit den jeweiligen Förderschnecken individuell bestimmt. Die Dosierschnecke wurde anschließend mit der Zuführung zum Kessel getaktet. Die Dosierschnecke und der Austragsbehälter der Brennstoffe standen währenddessen zusätzlich auf einer Waage, mit der die genaue Additivmenge errechnet werden kann.

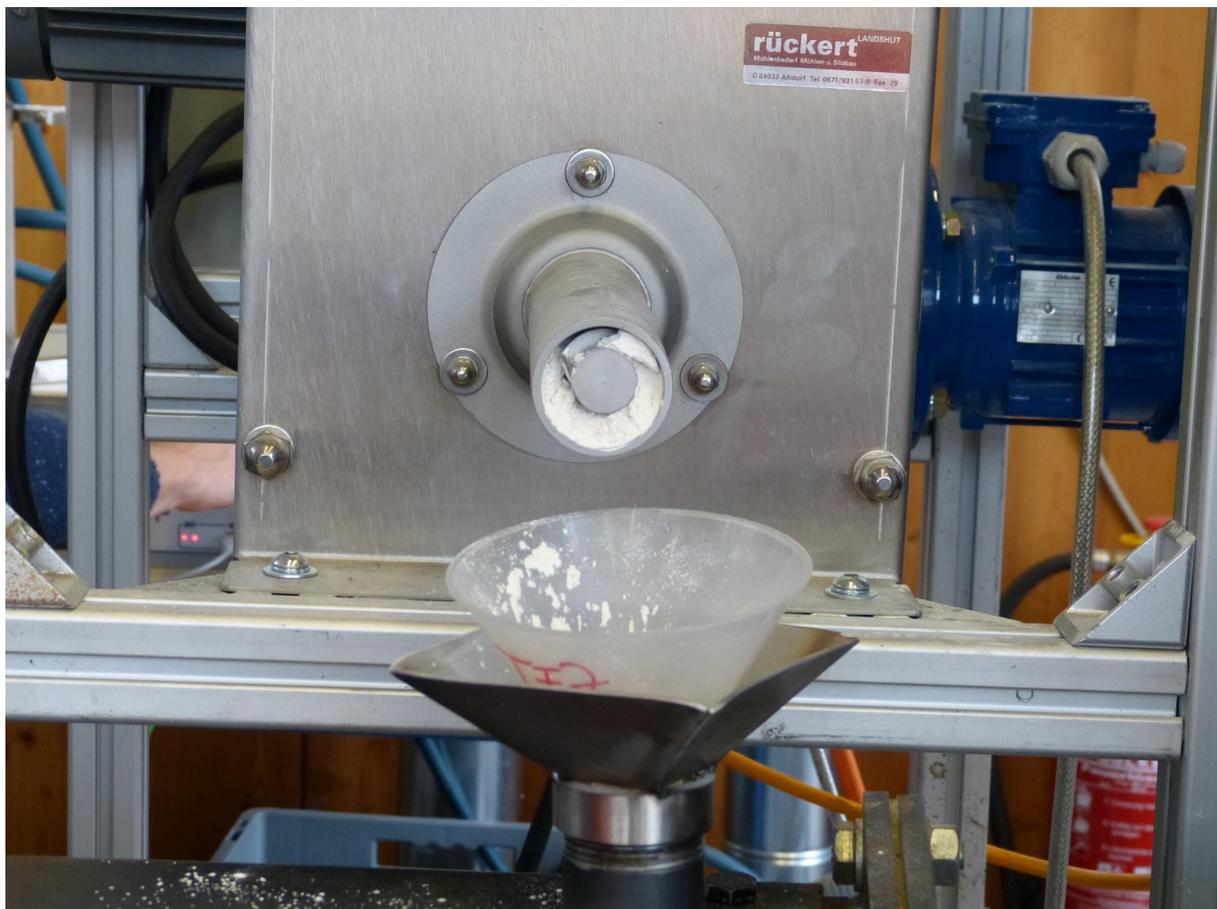


Abbildung 6: Beimischung von Kaolin über eine separate Zuführung in die Förderschnecke zwischen Brennstoffbunker und Feuerung für die Versuche mit gemahlenem Häckselgut

4.2.4 Versuchsdurchführung

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb des Projekts zu gewährleisten, wurde die Prüfmethodik vor Beginn der Versuche festgelegt. 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 den gesamten Versuch bei Nennlast exklusive der Anheizphase.
- Fünf gravimetrische Gesamtstaubmessungen bei Nennlastbetrieb über je 30 min.
- Vorbehandlung der Filtermedien bei 180 °C, Filtrationstemperatur während der Staubprobenahme bei 160 °C, Nachbehandlung der Filtermedien bei 160 °C.
- 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 Brennstoffwasseranteils.
- Siebanalyse der Aschen.

Für die Versuche am Kessel 2 musste das Versuchsprogramm wegen hoher Schlackebildung für die meisten der eingesetzten Brennstoffe weiter modifiziert werden. Nach jeder Messung des Gesamtstaubs wurde manuell die Abreinigung des Rosts ausgelöst. Nach der jeweiligen Abreinigung und nach erneutem Erreichen der Nennlast (15 kW) wurde die nächste Staubmessung durchgeführt. Die Anpassung war nicht notwendig für den Referenzbrennstoff Holzpellets sowie die 10:90-Mischung (*Phalaris arundinacea* zu Holz).

4.3 Verschlackung

Zur Bewertung der Verschlackungsanfälligkeit wurde zunächst das Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe bestimmt sowie die PASSA-Methode angewendet. Zusätzlich wurde die gesamte Kesselasche je durchgeführtem Feuerungsversuch untersucht, um eine Aussage über die Vergleichbarkeit der Prüfmethoden mit dem realen Kesselbetrieb treffen zu können.

4.3.1 Ascheschmelzverhalten

Die Brennstoffe wurden hinsichtlich ihres Ascheschmelzverhaltens gemäß DIN EN ISO 21404 analysiert [36]. Zur Sicherstellung der Homogenität wurde die Veraschung durch das beauftragte Prüflabor vorgenommen. Hierzu wurden je Pelletbrennstoff 0,5 Liter Probenmenge verschickt. Die Proben wurden durch das Prüflabor vermahlen und bei 550 °C oxidierend verascht. Im Anschluss wurde das Ascheschmelzverhalten mittels Ascheschmelzmikroskop analysiert. Hierbei wurden die Temperatur zum Beginn der Schrumpfung (SST in °C), die Erweichungstemperatur (DT in °C), die Halbkugeltemperatur (HT in °C) und die Fließtemperatur (FT in °C) notiert. Die maximal mögliche Temperatur lag bei 1550 °C.

4.3.2 PASSA-Methode

Die PASSA Methode (*Pellet Ash and Slag Sieving Assessment*) wurde in einem europäischen Verbundprojekt (EU-AshMeIT) entwickelt [84] [85]. Für die hier dargestellten Versuche kam eine optimierte Variante des Verfahrens zum Einsatz.

Für die PASSA-Methode werden 200 g eines pelletierten Brennstoffs in einer Glühschale (Tiegel) eingewogen. Diese muss eine Temperaturbeständigkeit von mindestens 1050 °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 Brennstoffprobe wird in einem Muffelofen (L40/11 BO, Nabertherm GmbH) thermisch behandelt. Dabei folgt man dem in Abbildung 7 vorgegebenen Temperaturprogramm mit einer Aufheizrate von 10 K/min. Die maximale Temperatur beträgt 1000 °C.

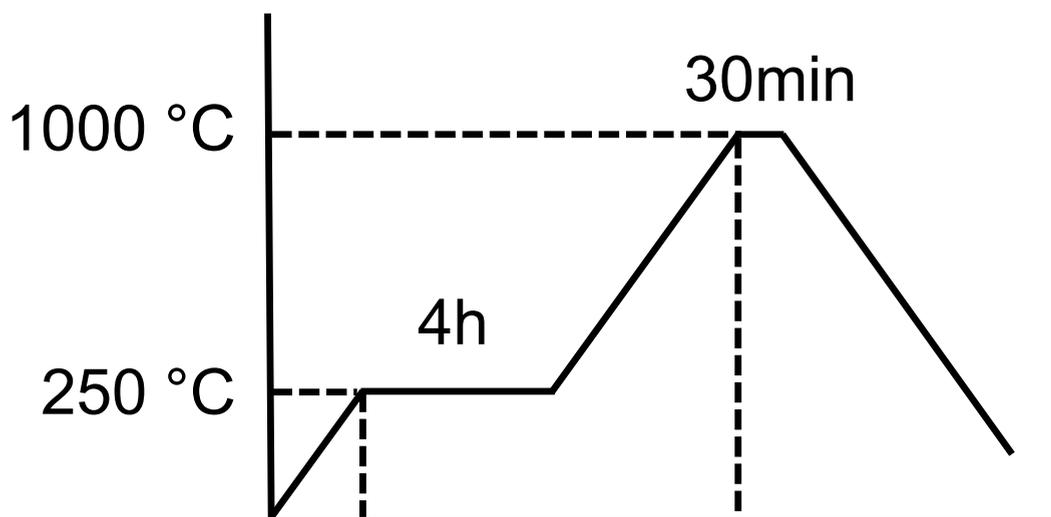


Abbildung 7: Temperaturprogramm bei der Veraschung in der PASSA-Methode (modifiziert)

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 vorsichtig 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 Maschensiebe ($\varnothing = 100$ mm) mit einer Maschenweite von 2 mm und 1 mm nach ISO 3310-1 [34]. Dafür wird der lose Anteil der Probe in das Sieb mit 2-mm-Lochdurchmesser gefüllt und das 1-mm-Sieb sowie der Siebboden darunter platziert. Die Probe wird dann mittels einer Siebmaschine (Retsch GmbH & Co. KG, Siebmaschine, AS200 Control) bei 200 rpm für 5 min dreidimensional (Amplitude: 0,5) gesiebt. Das Gewicht der gewonnenen Aschefractionen wird mit einer Waage mit einer Auflösung von mindestens 0,001 g ermittelt (Analysewaage 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 prozentualen Anteil einer Aschefraktion an der Gesamtaschemenge nach der thermischen Behandlung der Probe. Für die Untersuchungen in diesem Projekt wurde v. a. der Slag-Index für die Fraktion $> 2,0$ mm berechnet, siehe die Formeln (4.4) und (4.5).

$$\text{Slag Index} = \frac{m_{> 2,0 \text{ mm}}}{m_{\text{ges}}} \quad (4.4)$$

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{voll, nach}} - m_{\text{leer, vor}} \quad (4.5)$$

$$\Delta m_{\text{haft}} = m_{\text{leer, nach}} - m_{\text{leer, vor}} \quad (4.6)$$

Wobei:

$m_{> 2,0 \text{ mm}}$ = Siebrückstand auf dem 2,0-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 und nach Formel (4.6) berechnet wird. Dieser Anteil wird zu der Fraktion $> 2,0$ mm gerechnet.

4.3.3 Bewertung der Kesselaschen

Für die Bewertung der Kesselaschen (siehe Abschnitt 4.2.4) wurde die komplette Asche (Rostasche und Asche aus dem Aschekasten) aus dem Kessel vorsichtig entnommen und die Gesamtmenge bestimmt. Danach erfolgte die Siebung der Asche. Hierzu wurde die gesamte Probe zunächst mit einem 8-mm-Rundlochsieb (in Einzelfällen auch mit einem 3,15-mm-Rundlochsieb) planar für eine Minute bei 200 rpm gesiebt (Retsch GmbH & Co. KG, Siebmaschine, AS200 Control). Anschließend erfolgte mit der Siebfraktion < 8 mm (bzw. $< 3,15$ mm) eine dreidimensionale Siebung analog dem in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Verfahren für die PASSA-Methode. Aus den Ergebnissen wurde je Feuerungsversuch der Slag-Index nach Formel (4.4) bestimmt. Für die Masse $m_{> 2\text{ mm}}$ des Slag-Index wurden die Fraktionen > 8 mm (planare Siebung) und > 2 mm (dreidimensionale Siebung) zusammengezählt.

4.4 Statistische Auswertung

Varianzanalysen (ANOVA) mit Tukey-Post-hoc-Tests wurden durchgeführt, um signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Mittelwerten der Brennstoffe zu identifizieren, z. B. bezüglich ausgewählter physikalischer Brennstoffeigenschaften, aber auch hinsichtlich des unterschiedlichen Emissionsverhaltens der Paludibrennstoffe bei der Verbrennung in Kessel 1 und Kessel 2. Die Grundgesamtheiten wurden hinsichtlich homogener Varianzen unter Verwendung des Brown-Forsythe-Tests getestet. Alle statistischen Analysen wurden mit Origin Lab 2019 durchgeführt.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Brennstoffqualität des Häckselguts

Der Wassergehalt des Häckselguts nach der Ernte im Februar 2018, 2019 und 2020 variierte von 19,9 bis 48,2 m-% mit hohen Standardabweichungen von bis zu 19,1 m-% (Abbildung 8). Die niedrigsten Werte wies jeweils *Phragmites australis* auf. Eine hohe Streuung der Werte wurde erwartet, da die Brennstoffe von einer Testfläche stammen, auf der ein variabler Wassergradient im Torf von trockenen zu nassen Wachstumsbedingungen etabliert wurde. Zudem hängt nach WICHTMANN et al. [101] der Wassergehalt von Paludikulturstroh, das im Winter geerntet wird, von klimatischen Bedingungen wie dem Niederschlag ab und kann zwischen < 15 m-% und 60 m-% liegen. Da die hier untersuchten Brennstoffe alle von derselben Testfläche stammen, könnte dieser Effekt Unterschiede zwischen den Erntejahren erklären, nicht jedoch die Unterschiede zwischen den Arten innerhalb desselben Erntejahrs. Insgesamt war der Wassergehalt des Häckselguts für die Verwendung als Brennstoff in Kleinfeuerungsanlagen zu hoch. Eine aktive Trocknung der Biomasse vor der Verbrennung wird somit empfohlen, auch wenn im Winter abgestorbene Pflanzenmasse geerntet wurde.

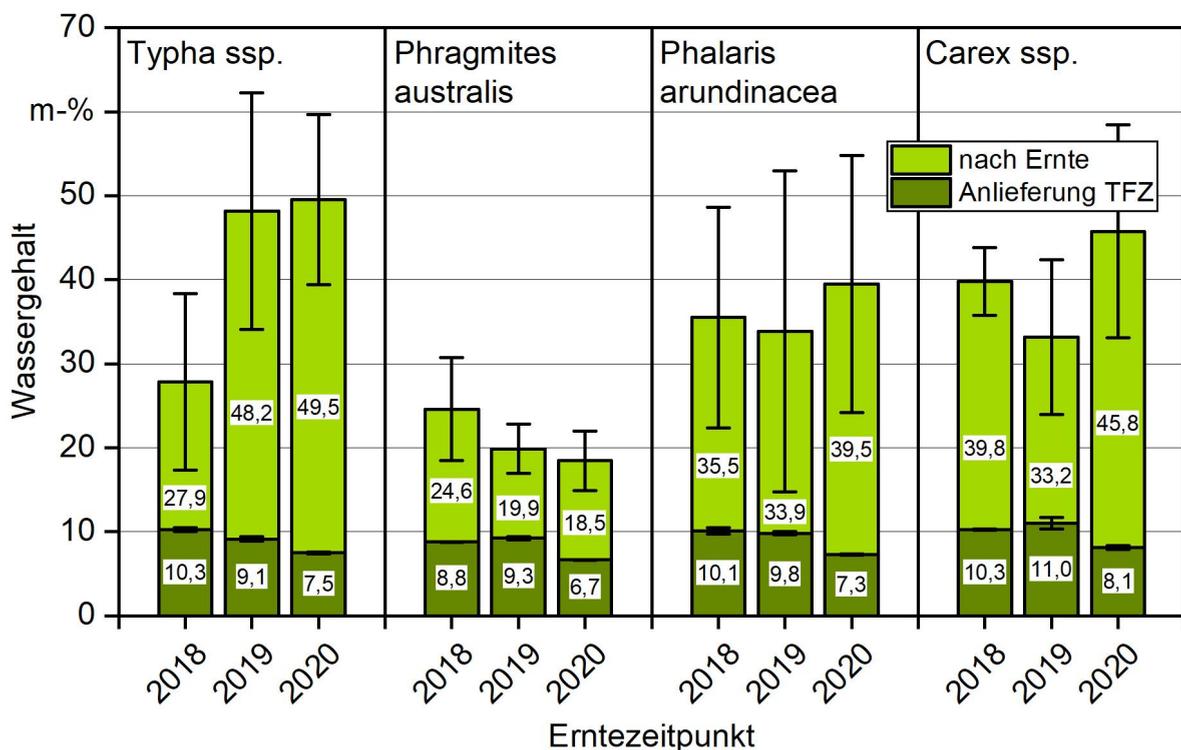


Abbildung 8: Mittlerer Wassergehalt (\pm Standardabweichung) der Häckselgutchargen direkt nach der Ernte ($n = 9$) und bei Anlieferung an das TFZ ($n \geq 6$, Ernte 2020: $n = 3$)

Vor der Anlieferung an das TFZ erfolgte zunächst eine aktive Trocknung des Häckselguts in Containern und anschließend für mehrere Wochen die großflächige Ausbreitung und

Lagerung des Materials in einer überdachten Lagerhalle (vgl. Abschnitt 4.1.1). Dadurch kam es zu einer regen- und windgeschützten Vortrocknung der Brennstoffe. Das unpelletierte Häckselgut hatte bei Anlieferung an das TFZ einen Wassergehalt von 6,7 bis 11,0 m-% (Abbildung 8). Die Brennstoffe waren somit als „lagerstabil“ zu bewerten (Wassergehalte < 20 m-%) [19] [63]. In diesem Zustand sollte es auch bei einer längeren Zwischenlagerung zu keiner Zersetzung der Biomasse durch mikrobielle Aktivität kommen. Eine weitere technische Trocknung der Häckselgutchargen am TFZ für eine direkte Verwendung als Brennstoff in Kleinf Feuerungsanlagen bzw. für die Nutzung als Rohmaterial für die Pelletierung war in der hier dargestellten Studie nicht notwendig (vgl. Klasse A für nicht holzige Pellets nach DIN EN ISO 17225-6, Tabelle 4, [37]).

Die Schüttdichten der Häckselgutproben (im Anlieferungszustand) lagen im Jahr 2018 bei 35 bis 95 kg/m³, im Jahr 2019 bei 23 bis 49 kg/m³ und im Jahr 2020 bei 59 bis 81 kg/m³ (Abbildung 9). Dies entspricht Literaturwerten für Schilf (< 40 bis 120 kg/m³ [19]), wohingegen Literaturwerte für Miscanthus oder Getreideganzpflanzen mit durchschnittlich 110 kg/m³ und 150 kg/m³ (jeweils bei einem Wassergehalt von 15 m-%) oft höher liegen [63]. Gründe hierfür können die generelle Rohdichte des Materials und das Fehlen von Körnern (im Vergleich zu Getreideganzpflanzen), aber auch die Aufbereitung, beispielsweise die Schnittweite beim Häckseln, sein [63]. Die höhere Schüttdichte aller Materialien aus der Ernte 2018 und der Ernte 2020 im Vergleich zu 2019 ist möglicherweise auch auf eine niedrigere Schnittweite beim Häckseln in den Jahren 2018 und 2020 zurückzuführen, wodurch kürzere Häcksel und damit eine insgesamt bessere Verdichtung im Lager zu erwarten wären.

Unabhängig vom Betrachtungsjahr ist die Schüttdichte der Häckselgutproben als sehr gering einzustufen. Eine direkte Verwendung der Materialien als Brennstoff schließt sich aufgrund der zu erwartenden geringen Energiedichten (MJ/m³) für die meisten Anwendungsfälle aus. Im Fall von Anlagen < 100 kW_{th} bietet sich eine Verdichtung des Materials in Form von Pellets an [19] [63] [73]. Für einen größeren Leistungsbereich ab 100 kW_{th} können die Brennstoffe auch als Ganzballen eingesetzt werden, wie es beispielsweise am Heizwerk in Malchin (800 kW) erfolgreich demonstriert wurde [4] [19] [62]. Hierdurch erhöht sich zudem die Transportwürdigkeit der Materialien, wodurch längere Transportwege wirtschaftlich möglich wären. Inwieweit eine Pelletierung direkt auf der Fläche möglich ist, beispielsweise mittels mobiler Stroh-Vollernter mit integrierter Pelletieranlage (z. B. Krone Premos 5000, Schaidler Pellettec 5.0), ist für den Anwendungsfall „Paludikultur“ erst noch zu prüfen [99]. Problematisch dürfte die eingeschränkte Befahrbarkeit der Flächen mit schweren Erntemaschinen sein. Unter Umständen ist auch der stationäre Betrieb der Vollernter als mobile Pelletieranlage am Feldrand möglich, wodurch der Prozessschritt entkoppelt von der eigentlichen Ernte stattfinden würde [19].

Generell kam es bei der Messung der Häckselgut-Schüttdichten nach DIN EN ISO 17828 [30] zu einer hohen Staubfreisetzung (Befüllung des Probenbehälters etc.). Vor allem die Proben aus *Typha ssp.* beinhalteten wesentliche Mengen gehäckselter Fruchtstände, die für die luftgetragene Ausbreitung der Samenkörner zuständig sind. Diese bestehen aus einem sehr feinen, leicht zerfallenden Material mit einer besonders geringen Dichte. In der Folge war auch die Staubentwicklung bei allen manuellen Arbeiten mit *Typha ssp.* am

höchsten. Die Fruchtstände können gleichzeitig auch ein Grund für die insgesamt sehr niedrige Schüttdichte von *Typha ssp.* sein, die im Vergleich zu den anderen drei Paludikulturen sowohl 2018 als auch 2019 deutlich reduziert war (Abbildung 9). Ein zweiter möglicher Grund hierfür ist das für die Gattung *Typha* typische, sehr leichte Schwammgewebe im Inneren der Pflanzenstängel, das ebenfalls eine sehr geringe Rohdichte aufweist.

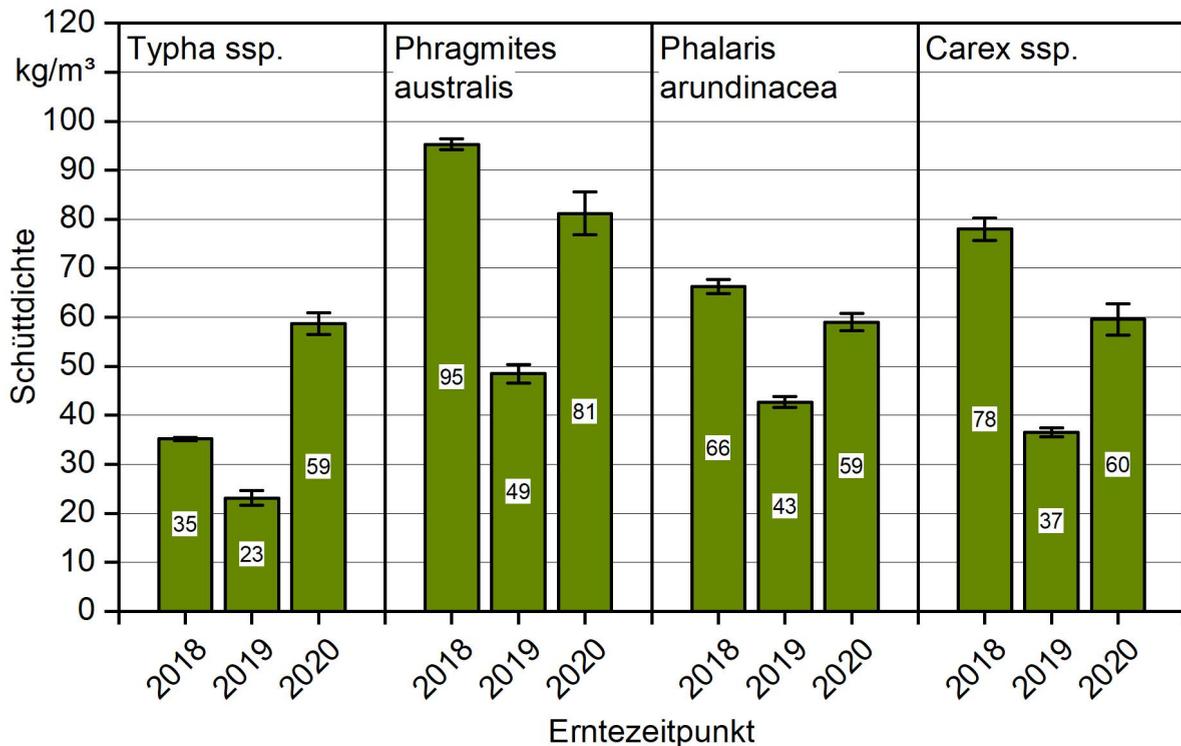


Abbildung 9: Mittlere Schüttdichte (\pm Standardabweichung) der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ ($n = 3$, im Anlieferungszustand)

Der Aschegehalt der Häckselgutbrennstoffe lag meistens zwischen 3,9 und 6,3 m-% (wf) (Abbildung 10). Er befand sich somit in dem Wertebereich, der von DAHMS et al. (2016) [19] oder WICHTMANN et al. (2014) [101] für Paludikulturen berichtet wird. Die Anforderungen der Klasse A für nicht holzige Pellets nach DIN EN ISO 17225-6 (Aschegehalt $\leq 6,0$ m-%, siehe Tabelle 4) wäre demnach bereits von fast allen Häckselgutproben eingehalten worden.

Auffällig war der deutlich erhöhte Aschegehalt von *Phalaris arundinacea* aus der Ernte 2019 mit 9,9 m-% (wf) (Abbildung 10). Durchschnittswerte aus der Literatur [19] [101] sowie die eigenen Messungen aus den Jahren 2018 und 2020 deuten darauf hin, dass es bei der 2019er Probe zu einer Kontamination des Häckselguts wahrscheinlich durch Anhaftungen mit Bodenmaterial oder Torf bei der Ernte oder Zwischenlagerung gekommen ist (vgl. auch Siliziumgehalt in Tabelle 14). Kürzlich am TFZ durchgeführte Versuche an Holzhackschnitzeln und Holzpellets, die künstlich mit Mineralboden kontaminiert wurden, zeigten, dass es dabei je nach Bodentyp zu teils erheblichen Verschlechterungen im Verbrennungsverhalten biogener Festbrennstoffe kommen kann, beispielsweise bezüglich

der Emissionen an Gesamtstaub oder der Bildung von Schlacke [67] [68]. Ein Eintrag von Bodenmaterial im Brennstoff ist generell zu vermeiden.

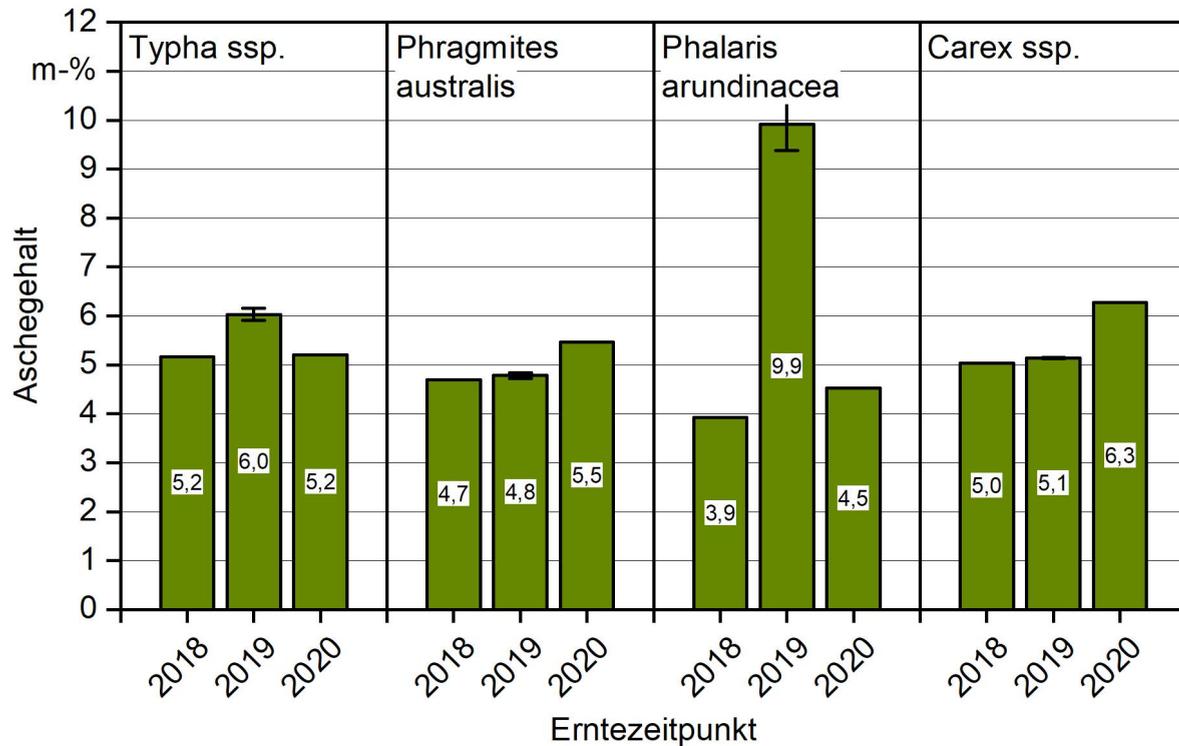


Abbildung 10: Mittlerer Aschegehalt (\pm Standardabweichung) der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ (Ernte 2018 und 2020: $n = 1$, Ernte 2019: $n = 3$, jeweils Doppelbestimmung, wasserfreie Bezugsbasis)

Der Heizwert der meisten Häckselgutproben lag zwischen 17,1 und 17,9 MJ/kg (wf) (Abbildung 11). Er befand sich damit in einem typischen Wertebereich für Stroh Brennstoffe ohne wesentliche Anteile an Körnern [39] [63]. DAHMS et al. (2017) berichteten Heizwerte von 17,4 bis 17,7 MJ/kg (wf) für *Phalaris arundinacea*, *Phragmites australis* und *Carex ssp.* [19]. Analog zum zuvor gemessenen hohen Aschegehalt von *Phalaris arundinacea* aus dem Jahr 2019 war der Heizwert derselben Probe in der hier dargestellten Studie deutlich reduziert (16,9 MJ/kg). Dies deutet erneut auf einen hohen Anteil mineralischen, nicht brennbaren Materials im Brennstoff hin, beispielsweise durch Verunreinigung des Häckselguts mit Bodenmaterial oder Torf bei der Ernte oder bei der Lagerung [67] [68].

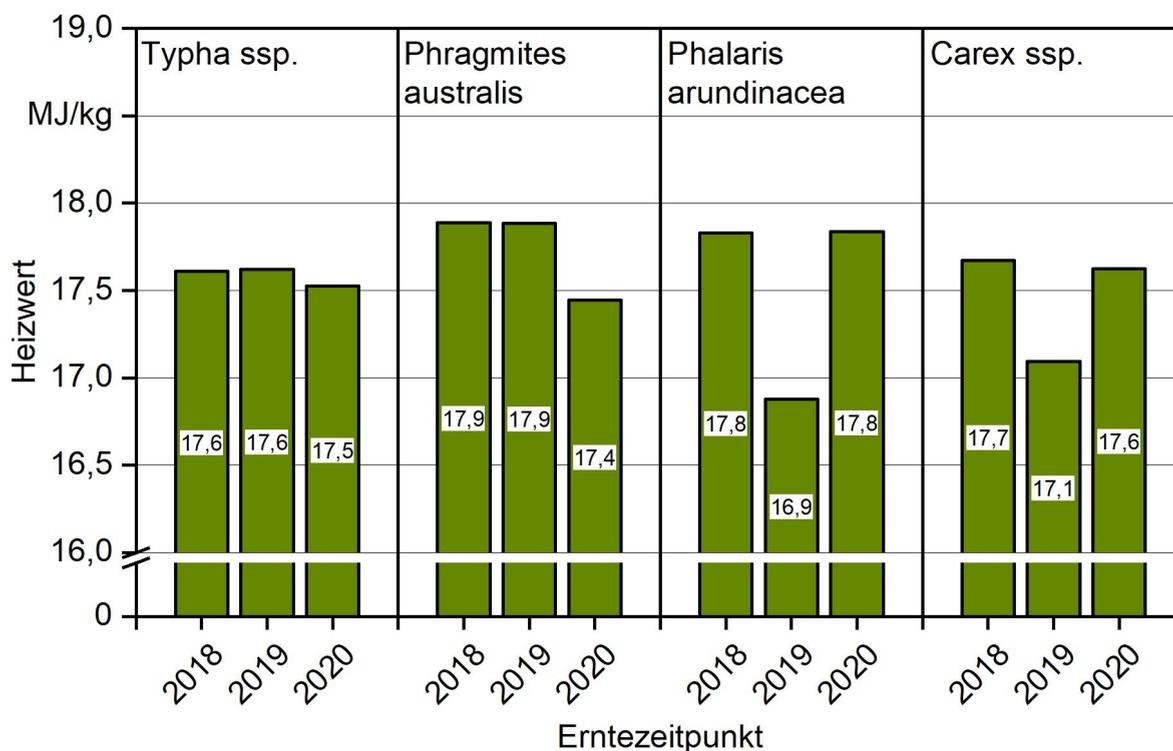


Abbildung 11: Mittlerer Heizwert der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ ($n = 1$, Doppelbestimmung, wasserfreie Bezugsbasis)

Für die Überprüfung der These, dass die auffällige 2019er-Probe von *Phalaris arundinacea* mit Bodenmaterial oder Torf verschmutzt war, wurde eine Bodenprobe des Torfkörpers auf den *Phalaris*-Pflanzparzellen von der Versuchsfläche „Freisinger Moos“ beschafft und analysiert. In dieser Probe lag der Aschegehalt bei $54,3 \pm 0,08$ m-% (wf) (Tabelle 13). Der Heizwert der Torfprobe lag bei $8,69 \pm 0,06$ MJ/kg (wf). Die Werte sind dabei höher (Aschegehalt) bzw. niedriger (Heizwert), als typischerweise für reinen Torf berichtet wird [1] [72] [76] [88] [89] [93]. Ein wesentlicher Anteil an mineralischer Verschmutzung, beispielsweise durch Bodenmaterial, wird daher vermutet [67] [70].

Tabelle 13: Berechneter Torfanteil in der Häckselgutprobe aus *Phalaris arundinacea* (Ernte 2019; wf = wasserfreie Bezugsbasis)

Parameter	<i>Phalaris</i> 2019	Torf	Mittelwert <i>Phalaris</i> 2018 und <i>Phalaris</i> 2020	Torfanteil be- rechnet
Aschegehalt (m-%, wf)	9,9	54,3	4,2	11,4 %
Heizwert (MJ/kg, wf)	16,88	8,69	17,83	10,5 %

Legt man den Aschegehalt und den Heizwert des Torfs und die Werte von *Phalaris arundinacea* aus den Jahren 2018 und 2020 zugrunde, ergibt sich für die *Phalaris-arundinacea*-Probe aus dem Jahr 2019 ein rechnerischer Torfanteil im Brennstoff von ca. 10 bis 11 % (Tabelle 13). Gleichzeitig waren in der reinen Torfprobe, aber auch in der *Phalaris*-Probe aus dem Jahr 2019 wesentliche Inhaltsstoffe wie die Gehalte an Aluminium, Calcium, Eisen, Magnesium, Natrium und Silizium im Vergleich zu den Paludibrennstoffen erhöht (Tabelle 14, vgl. auch Anhang 0).

Tabelle 14: Gehalte verbrennungsrelevanter chemischer Inhaltsstoffe der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ auf wasserfreier Bezugsbasis ($n = 1$)

Brennstoff	Ernte	N m-%	Cl m-%	S m-%	Al mg/kg	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	Si mg/kg
<i>Typha</i>	2018	0,95	0,16	0,06	165	14.500	1.730	1.980	2.350	836
	2019	0,99	0,20	0,09	262	13.300	1.420	1.740	1.750	681
	2020	0,89	0,18	0,09	445	12.300	3.620	1.310	1.490	4.100
<i>Phragmites</i>	2018	0,82	0,06	0,06	71	2.050	1.620	457	119	14.700
	2019	0,59	0,07	0,07	171	1.800	740	637	277	11.800
	2020	0,63	0,17	0,08	62	1.640	2.130	734	623	20.000
<i>Phalaris</i>	2018	0,88	0,09	0,11	129	2.590	1.080	775	199	11.200
	2019	1,24	0,07	0,12	1.290	5.270	1.910	611	369	19.600
	2020	1,16	0,05	0,12	1.070	2.860	1.760	932	150	12.800
<i>Carex</i>	2018	1,12	0,28	0,12	54	4.330	3.370	3.300	589	9.840
	2019	1,17	0,18	0,12	172	4.660	2.460	2.530	401	9.070
	2020	1,15	0,19	0,13	501	5.410	4.010	2.350	336	46.500

Ein wesentlicher Indikator für die Verunreinigung von Brennstoffen mit Bodenmaterial ist der Siliziumgehalt (Si, Tabelle 14) [41]. Dieser ist zunächst abhängig von der Pflanzenart. Viele grasartige Pflanzen wie *Carex ssp.* reichern Silizium im Vergleich zu nicht holzigen Pflanzen an [61]. Gräser weisen häufig Siliziumgehalte von 3000 bis 12.000 mg/kg (wf) auf [39] [61]. Auffällig war der sehr geringe Siliziumgehalt von *Typha ssp.* mit < 840 mg/kg, der vermutlich als rein pflanzenspezifisch zu bewerten ist. Der um den Faktor 1,5 bis 1,75 erhöhte Gehalt an Si in *Phalaris arundinacea* aus der Ernte 2019 im Vergleich zur Ernte 2018 und zur Ernte 2020 ist dagegen nicht mehr rein der Pflanzenbiomasse zuzuordnen und deutet auf eine Kontamination der Probe mit Torf oder Bodenmaterial hin. Die in dieser Studie analysierte Torf- und Bodenprobe lag mit einem Si-Gehalt von 127.000 mg/kg (wf) deutlich über allen Paludibrennstoffen (vgl. auch Anhang 0). Analog war 2019 der Calciumgehalt (Ca) in *Phalaris arundinacea* um den Faktor 1,8 bis 2,0 im Vergleich zu den

beiden Ernten 2018 und 2020 erhöht. Auch andere Elemente, wie beispielsweise Aluminium (Al), Eisen (Fe) oder Kalium (K), deuten auf einen Torfanteil im Brennstoff von 8 bis 11 % hin.

Zur Vermeidung einer Kontamination der Brennstoffe mit Bodenmaterial oder Torf könnten Vollernteverfahren gegenüber entkoppelten Verfahren (z. B. manuelle Ernte und Schwaden) vorteilhaft sein, bei denen der Brennstoff ohne Ablegen direkt von der Fläche geerntet wird bzw. es direkt zur Ballenpressung kommt [19]. Auch bei der Zwischenlagerung muss auf eine sachgerechte Vorbehandlung der Fläche, z. B. eine Reinigung der Lagerräume, geachtet werden.

Der Stickstoffgehalt (N) der Paludibrennstoffe lag mit 0,59 bis 1,24 m-% (wf) in einem typischen Bereich für nicht holzige Stroh- und Grasbrennstoffe (Tabelle 14) [39] [63]. Er entsprach damit der Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 (< 1,5 m-%). Folglich ist bei der Verbrennung von Paludibiomasse mit höheren Emissionen an NO_x im Vergleich zu Holzbrennstoffen zu rechnen [73].

Der Kaliumgehalt (K) schwankte zwischen 740 und 3370 mg/kg (wf) (Tabelle 14). Er lag somit in einem deutlich niedrigeren Bereich, als für halmgutartige Brennstoffe zu erwarten gewesen wäre (typische Werte: 2.000 bis 26.000 mg/kg [39] [63]). In der Folge lagen die Paludibrennstoffe bezüglich K näher an den Gehalten von Holz als an den Gehalten von anderen Stroh- oder Grasbrennstoffen. Der Kaliumgehalt hat einen direkten Einfluss auf die Aerosolbildung bei der Verbrennung [90]. Die Brennstoffe aus Paludikulturen sollten demnach bei der thermischen Nutzung geringere Emissionen an Gesamtstaub verursachen als beispielsweise Weizenstroh [73]. Auffällig war in diesem Kontext der vor allem in *Typha ssp.* sehr hohe Gehalt an Natrium (Na ≥ 1000 mg/kg, wf). Na zählt ebenso wie K zu den aerosolbildenden Elementen (siehe Abschnitte 3.1.2 und 3.1.5). Im Gegensatz zu Holzbrennstoffen, bei denen K meist über 90 m-% der aerosolbildenden Elemente ausmacht [69] [71], wurde vor allem in *Typha ssp.* ein Anteil von bis zu 66 m-% der $\sum(K + Na + Pb + Zn)$ durch Na bereitgestellt (siehe auch Tabelle 15). Somit sollte die Aerosolbildung von *Typha ssp.* vor allem durch Na und weniger durch K im Brennstoff bedingt sein. Die hier berichteten Wertebereiche für K und Na in *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* lagen nah an den Werten nach WICHTMANN et al. (2014) [101] von Winterernten derselben Arten und sind demnach als typisch für die Materialien zu bewerten.

Die höchsten Gehalte an Schwefel (S) wurden in *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* gemessen (Tabelle 14). Die Anforderungen der Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 [37] wurden jedoch von keinem Paludibrennstoff überschritten. Alle Werte für S lagen im typischen Bereich für Stroh- oder Grasbrennstoffe (0,05 bis 0,20 m-%, wf) [39] [63].

Die höchsten Gehalte an Chlor wurden in der hier dargestellten Studie in *Typha ssp.* und *Carex ssp.* gemessen (Tabelle 14). Beide Häckselgüter überschritten die Cl-Anforderungen der Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 [37]. Die Materialien wären demnach nur für Brennstoffe der Klasse B mit einem Chlorgehalt von ≤ 0,30 m-% geeignet. Die Werte für Chlor lagen insgesamt im unteren Bereich typischer Werte für Stroh- oder Grasbrennstoffe (0,2 bis 1,3 m-%, wf) [39] [63].

Ergebnisse des MOORuse-Arbeitspakets 3.3.1 (Torfersatzstoffe), bei denen u. a. die Gehalte an Cl zu mehreren Erntezeitpunkten im Jahr gemessen wurden, zeigen, dass bei Ernten im Sommer und im Herbst zum Teil deutlich höhere Cl-Werte als bei der Ernte im Winter zu erwarten sind (Chlorid-Gehalt am Beispiel *Typha ssp.* von einer Fläche mit einem hohen Wasserstandgradienten: Juni 2017: ca. 230 mg/kg, Oktober 2017: ca. 130 mg/kg, Januar 2018: ca. 14 mg/kg, jeweils wasserfreie Bezugsbasis) [53]. Die Cl-Gehalte überschritten bei Ernten im Sommer und Herbst die Vorgaben der DIN EN ISO 17225-6 [37]. Ähnliche Ergebnisse wurden für andere, ebenfalls für den Pflanzenmetabolismus essenzielle Elemente wie N und S von DAHMS et al. (2017) berichtet [19]. Die Ergebnisse lassen somit höhere Emissionen an NO_x und Gesamtstaub sowie größere Probleme mit Hochtemperaturkorrosion oder Schlackebildung erwarten, wenn die Brennstoffe im Sommer oder Herbst geerntet wurden, anstelle einer Winterernte. Für eine Brennstoffnutzung von Paludibiomasse sollte daher ausschließlich auf Ernten im Winter zurückgegriffen werden.

Die Berechnung von Brennstoffindizes aus den Elementgehalten der Häckselgutproben ergab, dass die höchste Freisetzung an Aerosolen bzw. an Gesamtstaub bei den Brennstoffen *Typha ssp.* und *Carex ssp.* zu erwarten ist (Tabelle 15). Die Summe der aerosolbildenden Elemente $\sum(K + Na + Pb + Zn)$ [90] lag in einem Bereich, der häufig für Holzhackschnitzel aus Waldrestholz oder Landschaftspflegeholz angegeben wird (1000 bis 2500 mg/kg [69] [71]). Werte für nicht holzige Pellets, beispielsweise aus Weizenstroh, Sonnenblumenspelzen oder Gras, liegen i. d. R. um ein Vielfaches höher (7000 bis 20.000 mg/kg, [73]). Bei einer Ernte der Paludibrennstoffe im Winter ist also im Vergleich mit anderen meist im Sommer geernteten Agrarbrennstoffen mit eher geringen Staubemissionen zu rechnen.

Das molare Cl/Si-Verhältnis erlaubt eine erste Einschätzung der Kaliumfreisetzung in die Gasphase [9]. Außer bei den Brennstoffen aus *Typha ssp.* ist das molare Cl/Si-Verhältnis dabei als äußerst niedrig zu bewerten (Tabelle 15). Die Werte für *Typha ssp.* sind vergleichbar mit Werten von Holzbrennstoffen [73]. Die Interpretation des molaren Cl/Si-Verhältnisses deutet somit für die meisten Paludibrennstoffe auf eine gute Einbindung des K in die Verbrennungsasche hin. Allerdings waren die absoluten Si-Gehalte in *Typha ssp.* sehr niedrig, sodass nur eine geringe Fixierung von K in der Asche zu erwarten ist [63]. Analog lag auch das Si/K-Verhältnis von *Typha ssp.* mit 0,67 deutlich unter dem Wert von 2,5, bei dem eine erhöhte Freisetzung von K in die Gasphase erfolgt [90] [91]. Somit ist bei *Typha ssp.* neben einem hohen absoluten Anteil aerosolbildender Elemente auch mit einer erhöhten Freisetzung dieser Elemente während der Verbrennung zu rechnen.

Ausgehend vom molaren 2S/Cl-Verhältnis besteht bei allen Paludibrennstoffen das Risiko der Hochtemperaturkorrosion (Tabelle 15, [90]). Werte kleiner 2 (*Typha ssp.*, *Carex ssp.*) deuten dabei auf ein erhöhtes Risiko, Werte zwischen 2 und 4 (*Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*) auf ein geringes Risiko hin (vgl. Abschnitt 3.1.2). Entsprechend sollten die verwendeten Biomassekessel durch geeignete Konstruktionsmaterialien für Cl-reiche Brennstoffe ausgelegt sein. Zu beachten ist diesbezüglich allerdings auch die insgesamt

eher geringe Konzentration von Cl und S in den Paludibrennstoffen im Vergleich zu sonstigen Stroh- und Brennstoffen, v. a. aufgrund der Ernte im Winter. Hierdurch wird das Risiko der Hochtemperaturkorrosion generell verringert.

Tabelle 15: Brennstoffindizes, berechnet aus den Gehalten chemischer Inhaltsstoffe der Häckselgutchargen bei Anlieferung an das TFZ

Brennstoff	Ernte	K + Na + Pb + Zn	K + Na + Pb + Zn + Cl + S	Molar (Si + P + K)/ (Ca + Mg + Al)	Molar Cl/Si	Molar Si/K	Molar 2S/Cl
<i>Typha</i>	2018	4.114	6.354	0,27	0,15	0,67	0,83
	2019	3.170	6.110	0,24	0,24	0,67	1,01
	2020	5.140	7.830	0,73	0,03	1,58	1,17
<i>Phragmites</i>	2018	1.773	3.053	7,90	0,00	12,63	2,14
	2019	1.017	2.437	5,78	0,00	22,19	2,21
	2020	2.789	5.239	10,64	0,01	13,07	1,05
<i>Phalaris</i>	2018	1.338	3.288	4,49	0,01	14,43	2,58
	2019	2.279	4.129	3,80	0,00	14,28	3,81
	2020	1.950	3.580	3,53	0,00	10,12	5,62
<i>Carex</i>	2018	3.986	7.976	2,01	0,02	4,06	0,95
	2019	2.861	5.871	1,88	0,02	5,13	1,39
	2020	4.372	7.612	7,19	0,00	16,14	1,56

Bezüglich der Verschlackungsneigung deutet das molare $(\text{Si} + \text{P} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al})$ -Verhältnis in den Brennstoffen darauf hin, dass vor allem die Aschen aus *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* zum Aufschmelzen neigen sollten [9] [46] [91] (siehe auch Unterkapitel 5.4). Die Werte des Index lagen dabei teils deutlich über typischen Werten für Weizenstroh mit ca. 5,29 (siehe Abschnitt 5.2.2). Verbrennungsversuche mit reinen Weizenstrohpellets im ERA-NET-Projekt „BioFlex!“ führten bei Verbrennung in Kessel 1 (siehe Abschnitt 4.2.1) zu Wirkungsgradeinbrüchen und zum Abschalten der Feuerung aufgrund extremer Schlackebildung [73] [74]. Dieser Effekt dürfte somit auch bei der Verbrennung von reinen *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* eintreten.

Ausgehend von den Elementgehalten der Häckselgutproben aus dem Jahr 2019 und den „Guidelines for advanced fuel and boiler design“ aus dem ERA-NET Projekt „BioFlex!“ [8] wurde der stöchiometrische Kaolinbedarf berechnet (Tabelle 16, vgl. auch Abschnitt 4.1.2). Folglich sollte die minimale Menge an Additiv, die benötigt wird, um das bei der Verbrennung frei werdende K und Na als Aluminiumsilikat in der Asche zu binden, zwischen 0,6 m-% (*Phragmites australis*) und 2,3 m-% (*Typha ssp.*) liegen. Die so entstehenden Brennstoffe würden die Vorgaben für die Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 bezüglich eines Additivgehalts < 5 m-% einhalten [37].

Tabelle 16: Berechnung des stöchiometrischen Kaolinbedarfs (inkl. Sicherheitszuschlag von 10 %), ausgehend von den Elementgehalten in den Häckselgut-Analyseproben aus dem Jahr 2019, nach den Guidelines des ERA-NET Projekts „BioFlex!“ [8] (alle Angaben auf wasserfreier Bezugsbasis)

Brennstoff	K in mg/kg	K in mol/kg	Na in mg/kg	Na in mol/kg	Stöchiometrischer Kaolinbedarf in m-% (inkl. 10 % Sicherheitszuschlag)
<i>Typha</i>	1.420	0,04	2.350	0,08	2,28
<i>Phragmites</i>	740	0,02	119	0,01	0,57
<i>Phalaris</i>	1.910	0,05	199	0,02	1,20
<i>Carex</i>	2.460	0,06	589	0,02	1,49

Werden für den benötigten Gehalt an Additiv die Werte anderer Analyseproben (u. a. die Häckselgutchargen aus den Jahren 2018 und 2020) zugrunde gelegt, wird beispielsweise für *Typha ssp.* ein Kaolinbedarf von 2,19 m-% bis 2,97 m-% vorgeschlagen (vgl. Anhang 0). Auch für die anderen Paludikulturen kam es hierbei zu Abweichungen. Somit besteht im Nachfolgenden die Gefahr, dass der tatsächlich benötigte Kaolinbedarf durch das beschriebene Vorgehen unterschätzt wurde.

5.2 Pellets aus Paludibrennstoffen

Die Zerkleinerung und Pelletierung der Häckselgutbrennstoffe erfolgte in der Pelletieranlage des TFZ (siehe Abschnitt 4.1.4). Insgesamt wurden acht Pelletbrennstoffe aus Paludibiomasse mit einem Durchmesser von 6 mm mit der Pelletieranlage des TFZ produziert. Vier der Brennstoffe wurden mit Kaolin additiviert (Tabelle 6, Tabelle 16). Als Referenzbrennstoffe kamen zwei Chargen Holzpellets (ENplus-Qualität A1) sowie Weizenstrohpellets aus dem ERA-NET Projekt „BioFlex!“ und dem Verbundprojekt „FuturePelletSpec“ zum Einsatz. Holzbrennstoff 1 (nachfolgend „Holz 1“) wurde dabei als Referenzbrennstoff bei den Versuchen mit Kessel 1 verwendet (siehe Abschnitt 5.3.1), Holzbrennstoff 2 (nachfolgend „Holz 2“) als Referenzbrennstoff für Kessel 2 (Abschnitt 5.3.2) [74] [75]. Mit den reinen *Phalaris-arundinacea*-Pellets und den Holzpellets aus dem Projekt „FuturePelletSpec“ („Holz 2“) wurden zudem zwei Paludi-Holz-Mischungen (*Phalaris arundinacea* zu Holz 30 : 70 und 10 : 90) hergestellt.

5.2.1 Physikalische Brennstoffqualität

Der mittlere Wassergehalt der Paludipellets lag zwischen 5,5 und 11,8 m-% (Abbildung 12). Alle Brennstoffe hielten somit die Vorgaben der Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 (Wassergehalt ≤ 12 m-%) ein [37]. Dabei kam es bei der Pelletierung zu einer zusätzlichen Trocknung der Brennstoffe, die vorab bei dem Homogenisierungsschritt im Futtermittelmischer auf einen für die Pelletierung geeigneten Wassergehalt von ca. 14 bis 16 m-% eingestellt wurden (siehe Tabelle 10).

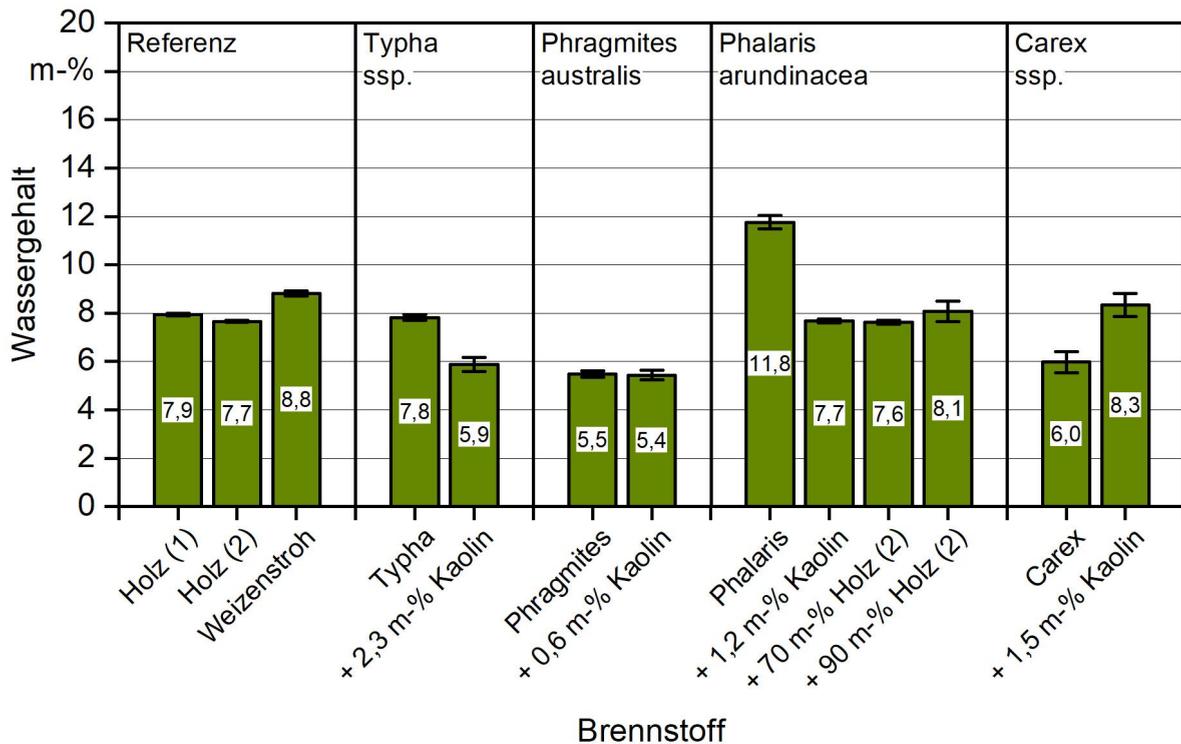


Abbildung 12: Mittlerer Wassergehalt (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 3$)

Die Schüttdichten der Paludipellets lagen zwischen 747 und 796 kg/m³ (Abbildung 13), was einen außergewöhnlich hohen Wert für Pellets darstellt. Alle Brennstoffe erfüllten die Vorgaben der Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 (Schüttdichte ≥ 600 kg/m³) [37]. Interessanterweise lagen die Schüttdichten der am TFZ produzierten Paludipellets damit auch über den Werten der Referenzbrennstoffe. Pelletiersuche mit Paludikulturen bei der Deutschen Biomasseforschungszentrum GmbH (DBFZ) mit einer Münch Ringmatrizenpresse führten zu leicht niedrigeren Werten als in der hier dargestellten Studie (688 kg/m³ für *Phragmites australis*, 658 kg/m³ für *Phalaris arundinacea* und 678 kg/m³ für *Carex ssp.*) [19]. Folglich kam es bei der Pelletierung am TFZ zu einer höheren Verdichtung des Materials (vgl. auch mechanische Festigkeit, Abbildung 16) und damit ggf. zu einem unverhältnismäßig hohen Energieeinsatz für die Pelletieranlage.

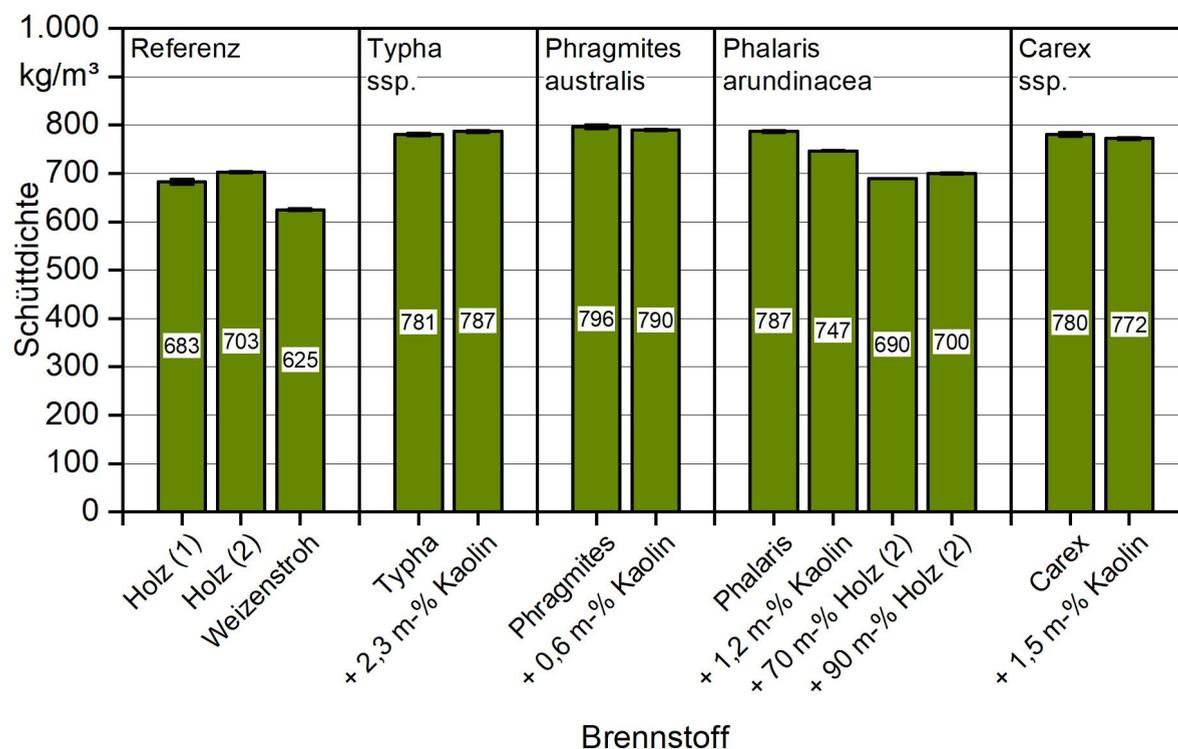


Abbildung 13: Mittlere Schüttdichte (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 3$)

Bei additivierten Pellets war hinsichtlich der Schüttdichten keine spezifische Auswirkung erkennbar. Dies lag voraussichtlich an der insgesamt als sehr niedrig einzuordnenden Menge an Additiv ($< 2,5$ m-%), die den Rohmaterialien zugegeben wurde. MACK et al. (2019) konnten dagegen bei höheren Additivierungsstufen (3,5 bis 10,8 m-%) eine deutliche Zunahme der Schüttdichte in Agrarpellets feststellen [73] [74].

Anders war die Beobachtung bei den Mischungen. Hier war bei den untersuchten *Phalaris arundinacea*-Holzpellet-Mischungen (nach Pelletierung) ein deutlicher Effekt auf die Schüttdichte zu erkennen. Sie nahm aufgrund der niedrigeren Werte des Referenzbrennstoffs ab.

Der gemessene Aschegehalt der Paludipellets lag zwischen 4,8 und 7,1 m-% (wasserfreie Bezugsbasis, Abbildung 14). Vier der Paludipellets konnten hinsichtlich ihres Aschegehalts in die Klasse A ($\leq 6,0$ m-%) und vier in die Klasse B (≤ 10 m-%) nach DIN EN ISO 17225-6 eingeordnet werden. In drei von vier Fällen (*Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, *Carex ssp.*) war der Aschegehalt in additivierten Pellets signifikant höher als in den Pellets ohne Additiv ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test). Durch eine Zugabe von Kaolin (Aschegehalt: 89,7 m-%, wf) erhöht sich der nicht brennbare mineralische Anteil im Brennstoff, weshalb dieser Effekt zu erwarten war [58] [73]. Die Ausnahme stellte interessanterweise *Typha ssp.* dar, denn hier wurde keine Änderung im Aschegehalt trotz einer Additivzugabe von 2,3 m-% gemessen. Die Ursache hierfür könnte in den hohen Karbonatanteilen der bei 550 °C veraschten *Typha-ssp.*-Pellets liegen. *Typha* ist reich an Ca, wodurch die Bildung von Calciumkarbonat (CaCO_3) bei der Verbrennung gefördert wird. Durch die

Additivierung mit Kaolin werden Karbonatbildner (Ca, Na, K) als Aluminiumsilikate in der Asche gebunden. Aufgrund ähnlicher Atomgewichte ist dabei zunächst kein Effekt auf den Aschegehalt sichtbar. Wird der Karbonatanteil vom Aschegehalt abgezogen, liegt der Aschegehalt von *Typha ssp.* bei 5,4 m-% (pur) und 6,0 m-% (mit Kaolin). Ein ähnlicher Effekt konnte bei den übrigen Brennstoffen nicht beobachtet werden, was auf die insgesamt geringfügige Karbonatbildung (*Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, *Carex ssp.*) oder die insgesamt niedrigen Aschegehalte (z. B. Holzpellets) zurückzuführen ist.

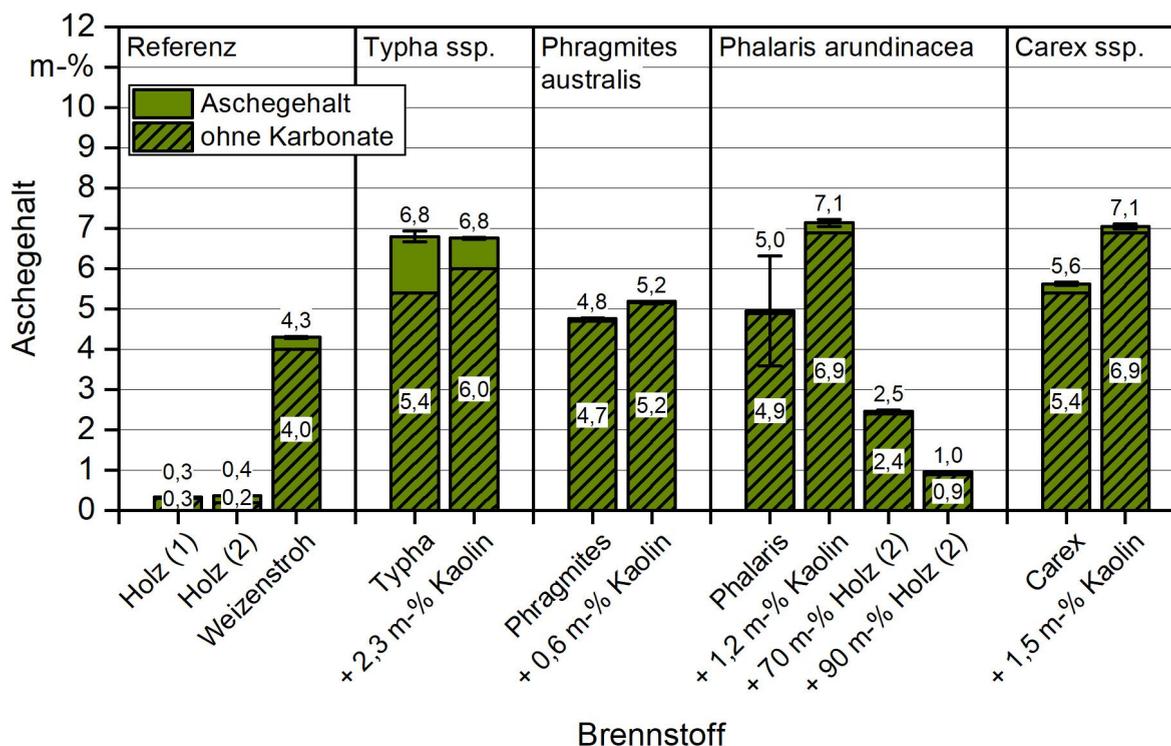


Abbildung 14: Mittlerer Aschegehalt mit und ohne Karbonate (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 3$ bis 4 , karbonatfreier Aschegehalt $n = 1$, wasserfreie Bezugsbasis)

Im Fall von *Phragmites australis* und *Carex ssp.* war die Zunahme im Aschegehalt von 0,4 m-% und 1,5 m-% durch die zugeführte Menge an Additiv (0,6 m-% und 1,5 m-%) und unter Berücksichtigung des Aschegehalts des Kaolins rechnerisch plausibel. Im Fall von *Phalaris arundinacea* kam es im Vergleich zum Häckselgut dagegen zunächst zu einer deutlichen Reduzierung des Aschegehalts von 9,9 auf 5,0 m-% in den nicht additivierten Pellets. Die Additivierung führte wiederum zu einem deutlichen Anstieg auf ca. 7,1 m-%. Dieser Effekt ist nicht allein durch das Additiv erklärbar. Die starken Schwankungen im Aschegehalt von *Phalaris arundinacea* zwischen Häckselgut und reinen Pellets lassen sich vermutlich auf ein sehr heterogenes Rohmaterial mit teilweiser Kontamination mit Torf oder Mineralboden in den Analyseproben zurückführen (siehe auch Unterkapitel 5.1). Die Aschegehalte der nicht additivierten *Phalaris-arundinacea*-Pellets lagen nahe an den

Aschegehalten der Häckselgutproben aus den Jahren 2018 und 2020 (Abbildung 10) sowie den Werten von WICHTMANN et al. (2014) [101]. Sie stellen somit die plausibelsten Messungen des 2019er Ausgangsmaterials für *Phalaris arundinacea* dar (siehe auch Abschnitt 5.2.2).

Die Mischung von *Phalaris arundinacea* mit Holzpellets („Holz 2“) hatte einen deutlichen Effekt auf den Aschegehalt. Dieser sank durch die Mischung auf Werte bis zu 1,0 m-% (wf). Die gemessenen Wertebereiche von ca. 1 und 2,5 m-% (wf) ergeben sich auch rechnerisch aufgrund der Aschegehalte in den Ausgangsproben und der Mischungsverhältnisse und sind demnach zu erwarten gewesen.

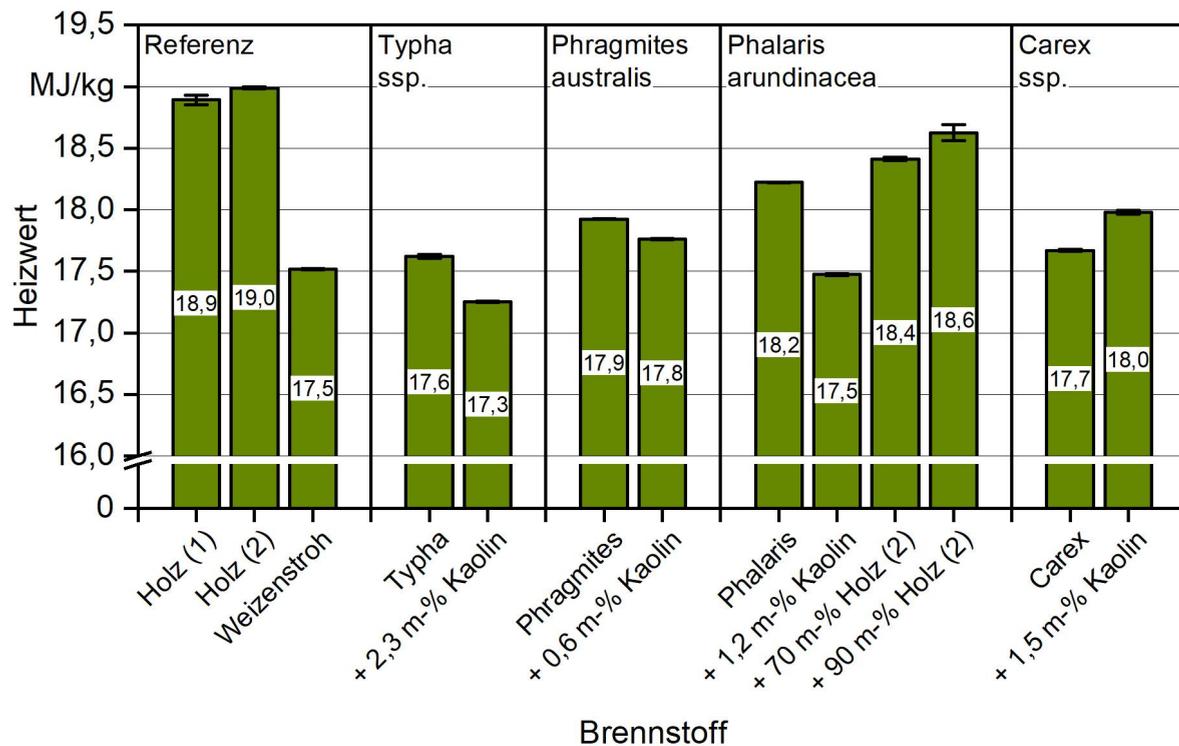


Abbildung 15: Mittlerer Heizwert (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 1$, SD angegeben aus Doppelbestimmung, wasserfreie Bezugsbasis)

Die Heizwerte der Paludipellets lagen zwischen 17,3 und 18,2 MJ/kg (wf, Abbildung 15). Alle Brennstoffe hielten die Anforderung der DIN EN ISO 17225-6 ein (Heizwert $\geq 14,5$ MJ/kg) [37]. Die Werte zeigten untereinander eine höhere Schwankung als die Heizwerte der Häckselgutchargen. Dabei nahmen die Heizwerte der Paludipellets linear mit zunehmenden Aschegehalten und somit aufgrund der Additivzugabe ab, ggf. auch aufgrund von Kontamination mit Bodenmaterial ($R^2 = 69$). Eine Mischung von *Phalaris arundinacea* mit Holz führte dagegen aufgrund der höheren Heizwerte in den Referenzbrennstoffen zu einer Zunahme der Werte.

Die mechanische Festigkeit der Paludipellets war mit 98,6 bis 99,3 m-% als sehr hoch einzuordnen (Abbildung 16). Sie erreichte damit Werte, die typischerweise für Holzpellets angegeben werden, wohingegen Agrarpellets häufig eine niedrigere mechanische Festigkeit von ca. 96 m-% aufweisen [73]. Die Vorgabe der DIN EN ISO 17225-6 [37] (mechanische Festigkeit $\geq 97,5$ m-% für Klasse A) wurde von allen Paludipellets eingehalten. Ähnlich gute, jedoch minimal geringere Werte konnten in der Studie von DAHMS et al. (2017) für *Phalaris arundinacea* (98,2 m-%) und *Carex spp.* (98,6), nicht jedoch für *Phragmites australis* (96,2 m-%) eingehalten werden [19]. Dies deutet ebenfalls auf eine höhere Verdichtung der am TFZ produzierten Pellets verglichen mit den Pellets des DBFZ hin (vgl. Schüttdichte in Abbildung 13). Bezüglich der mechanischen Festigkeit konnte kein Unterschied zwischen additivierten und nicht additivierten Pellets aufgezeigt werden.

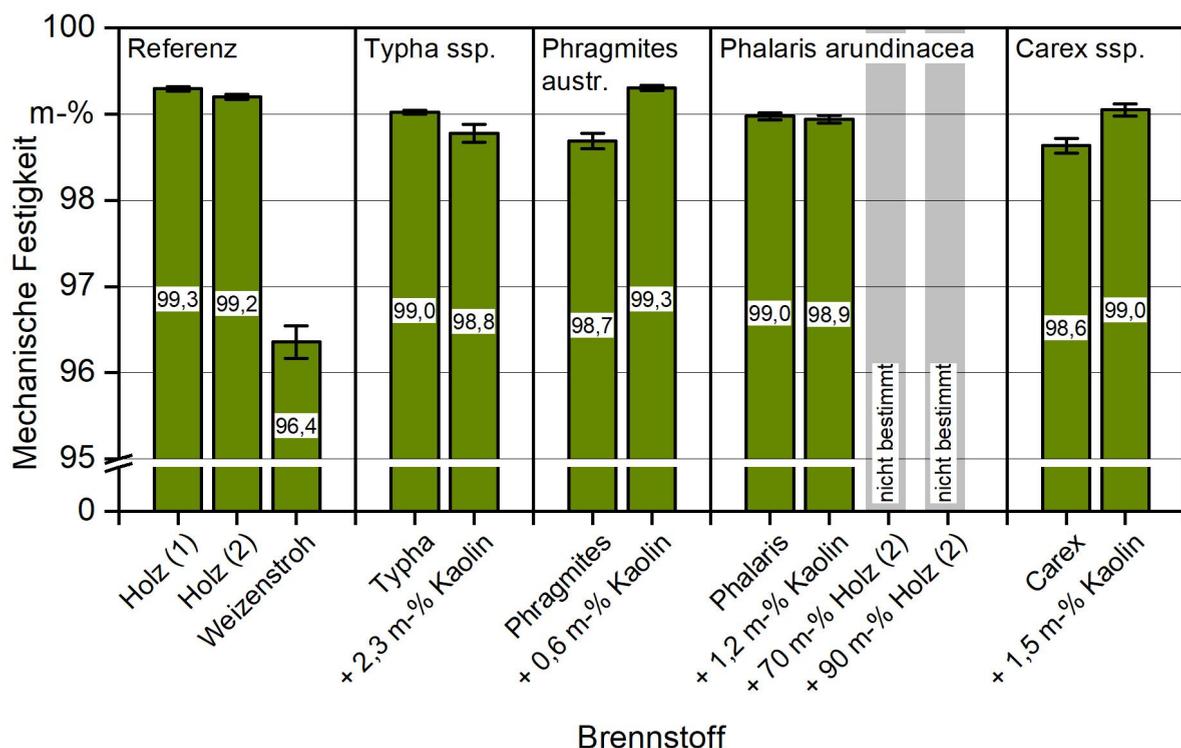


Abbildung 16: Mittlere mechanische Festigkeit (\pm Standardabweichung) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe ($n = 3$)

Die maximale Länge der Paludipellets lag aufgrund der Einstellungen des Abschermessers an der TFZ-Pelletieranlage zwischen 25,3 und 27,8 mm (Abbildung 17) und damit deutlich unter einer maximalen Länge von 40 mm nach DIN EN ISO 17225-6 [37]. Überlängen > 40 mm konnten in keinem Fall nachgewiesen werden. Die mittlere Pelletlänge betrug 11,3 bis 20,1 mm. Dabei konnte kein Trend bezüglich der verwendeten Paludikultur oder bezüglich der Additivierung festgestellt werden. Ähnlich hohe Schwankungen in der mittleren Länge wurde auch zwischen unterschiedlichen Chargen hochwertiger ENplus-Holzpellets (A1) gemessen [87].

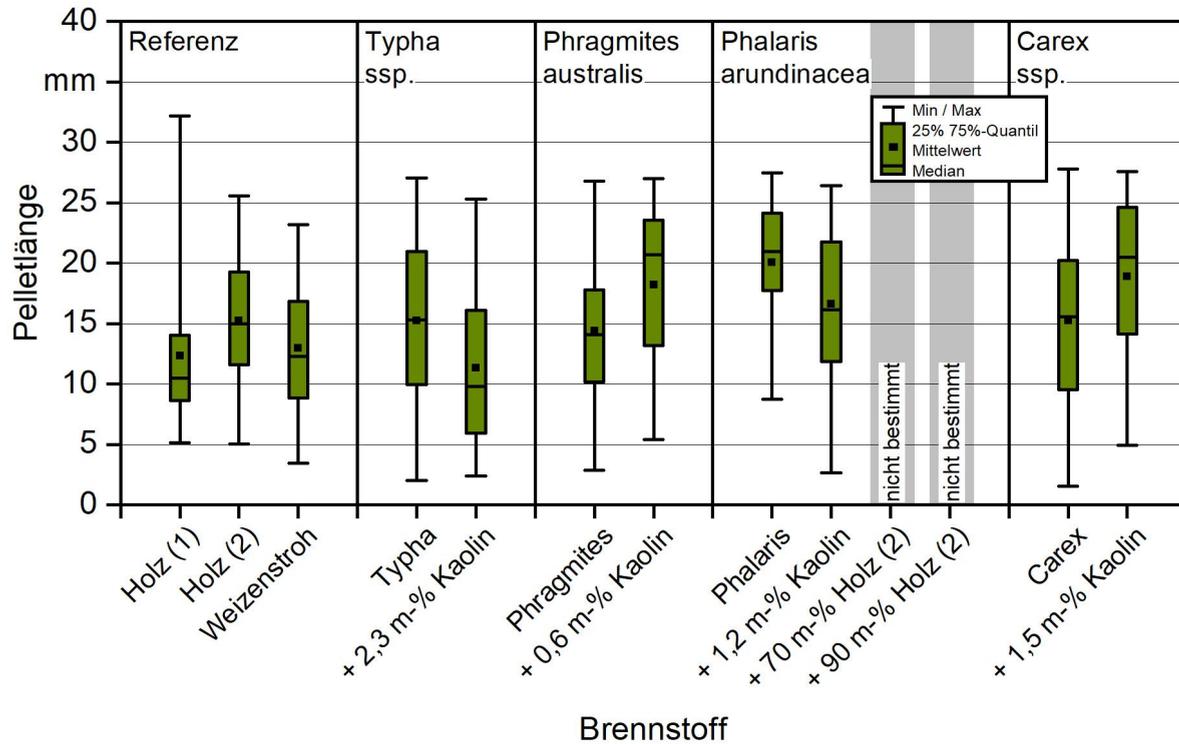


Abbildung 17: Längenverteilung der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe

Insgesamt können die Voreinstellungen der Pelletieranlage am TFZ (Wassergehalt der Brennstoffe, Matrizenwahl etc., siehe Tabelle 10) für die Produktion von Paludipellets empfohlen werden. Möglicherweise kann der Prozess aber energetisch optimiert werden, da v. a. die Schüttdichte und die mechanische Festigkeit insgesamt sehr hoch waren.

5.2.2 Inhaltsstoffliche Brennstoffqualität

Die gemessenen Gehalte verbrennungsrelevanter chemischer Inhaltsstoffe in den Paludipellets sind in Tabelle 17 dargestellt. Diese waren abhängig vom Ausgangsmaterial, dem verwendeten Additiv und der Probenahme.

Verglichen mit Holzpellets zeigten alle nicht additivierten Pellets aus Paludibiomasse (analog zu den Häckselgutproben, siehe Unterkapitel 5.1) eine deutliche Erhöhung in den Gehalten verbrennungsrelevanter chemischer Inhaltsstoffe (z. B. N, Cl, S, K etc., siehe Tabelle 17). Auch im Vergleich mit Pellets aus Weizenstroh waren die meisten Elementgehalte in den Paludipellets erhöht (N, Al, Ca, Mg, Na, Si). Lediglich beim für die Bildung von Aerosolen maßgeblich verantwortlichen Kaliumgehalt lagen die Weizenstrohpellets weit über den Brennstoffen aus Paludikulturen. Eine Mischung der *Phalaris-arundinacea*-Pellets mit Holz führte erwartungsgemäß in den meisten Fällen zu einer deutlichen Abnahme der Elementgehalte aufgrund der niedrigeren Gehalte im Referenzbrennstoff.

Tabelle 17: Gemessene Gehalte ausgewählter verbrennungsrelevanter Inhaltsstoffe in den Pelletbrennstoffen aus Paludikulturen und in den verwendeten Referenzbrennstoffen ($n = 1$, wasserfreie Bezugsbasis)

Brennstoff	N m-%	Cl m-%	S m-%	Al mg/kg	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	Si mg/kg
Holz (1)	0,10	0,006	0,005	25	811	414	131	15	55	166
Holz (2)	0,07	< 0,005	0,007	< 10	677	402	129	< 10	46	254
Weizenstroh	0,44	0,209	0,072	145	2.860	8.450	767	42	638	9.460
<i>Typha</i>	1,26	0,080	0,163	636	17.200	2.390	2.260	2.080	1.160	3.800
<i>Typha</i> + 2,3 m-% Kaolin	0,89	0,261	0,156	2.810	11.800	2.500	1.440	2.300	1.270	5.170
<i>Phragmites</i>	0,69	0,252	0,115	228	2.270	1.030	824	380	361	13.200
<i>Phragmites</i> + 0,6 m-% K.	0,70	0,084	0,096	1.140	1.960	1.190	823	387	347	13.900
<i>Phalaris</i>	1,27	0,094	0,139	568	4.230	2.150	1.140	292	1.160	8.460
<i>Phalaris</i> + 1,2 m-% Kaolin	1,14	0,067	0,098	2.120	4.500	2.480	592	242	1.220	1.600
<i>Phalaris</i> + 70 m-% Holz (2)	0,55	0,029	0,044	672	2.110	1.040	519	108	458	5.300
<i>Phalaris</i> + 90 m-% Holz (2)	0,26	0,019	0,016	215	1.160	614	246	36	157	1.810
<i>Carex</i>	1,35	0,224	0,130	304	5.530	3.350	3.190	493	1.690	10.700
<i>Carex</i> + 1,5 m-% Kaolin	1,38	0,181	0,146	557	5.210	3.080	751	442	1.470	11.400

Die Paludipellets wiesen sehr niedrige Schwermetallgehalte auf (Tabelle 18). Die Werte befanden sich dabei in vielen Fällen, z. B. für Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni) und Blei (Pb) unter der Nachweisgrenze des externen Labors. Die Häckselgutproben lagen in denselben Wertebereichen wie die Pellets (Daten nicht gezeigt). Insgesamt lagen die Schwermetallgehalte der Paludibrennstoffe meist deutlich niedriger als typische Gehalte von Holzbrennstoffen [41] [63]. Lediglich in zwei Fällen (*Typha ssp.*, *Phalaris arundinacea* mit Kaolin) überschritt der gemessene Arsengehalt (As) minimal die Grenzwerte der DIN EN ISO 17225-6 [37]. Für südbayerische Niedermoore wie das Freisinger Moos wurde in früheren Studien des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) auf einen hohen geogenen Arsengehalt in den Böden hingewiesen [48]. Dieser lässt sich in den betreffenden Regionen bei einer Verschmutzung von Brennstoffen mit Bodenmaterial, beispielsweise in Holzhackschnitzeln, nachweisen [41]. Folglich kann sich Arsen über Kontamination mit Bodenmaterial leicht in den Brennstoffen wiederfinden, weshalb besonders bei Ernte und Lagerung der Paludikulturen in den betroffenen Gebieten auf ein gutes Qualitätsmanagement geachtet werden sollte. Nichtsdestotrotz waren die Paludibrennstoffe in der hier dargestellten Studie als größtenteils unkritisch bezüglich ihrer Schwermetallgehalte einzuordnen.

Tabelle 18: Gemessene Schwermetallgehalte in den Pelletbrennstoffen aus Paludikulturen in mg/kg ($n = 1$, wasserfreie Bezugsbasis, Fettdruck = Überschreitung des Grenzwerts nach DIN EN ISO 17225-6 [37], n. d. = nicht bestimmt [engl. „not determined“])

Brennstoff	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Holz (1)	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Holz (2)	< 0,8	0,3	< 1	< 1	< 0,05	< 1	< 2	13
Weizenstroh	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
<i>Typha</i>	1,1	< 0,2	3	3	< 0,05	< 1	< 2	28
<i>Typha</i> + 2,3 m-% Kaolin	< 0,8	< 0,2	2	2	< 0,05	< 1	< 2	50
<i>Phragmites</i>	< 0,8	< 0,2	< 1	2	< 0,05	< 1	< 2	18
<i>Phragmites</i> + 0,6 m-% K.	1,3	< 0,2	5	5	< 0,05	2	< 2	55
<i>Phalaris</i>	< 0,8	< 0,2	2	5	< 0,05	< 1	< 2	33
<i>Phalaris</i> + 1,2 m-% Kaolin	< 0,8	< 0,2	3	3	< 0,05	< 1	< 2	31
<i>Phalaris</i> + 70 m-% Holz (2)	< 0,8	0,2	5	4	< 0,05	2	< 2	29
<i>Phalaris</i> + 70 m-% Holz (2)	< 0,8	0,2	2	1	< 0,05	< 1	< 2	18
<i>Carex</i>	< 0,8	< 0,2	1	3	< 0,05	< 1	< 2	31
<i>Carex</i> + 1,5 m-% Kaolin	< 0,8	< 0,2	3	3	< 0,05	< 1	< 2	30

Die gemessenen chemischen Inhaltsstoffe der mit Kaolin additivierten Pellets müssen allerdings bezüglich ihrer Plausibilität hinterfragt werden. Durch die Zugabe des Additivs stieg beispielsweise der Aluminiumgehalt in den additivierten Pellets wie zu erwarten um ein Vielfaches an (Tabelle 17) [73]. Die gemessene Zunahme war in *Typha ssp.*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* allerdings niedriger, als sich rechnerisch durch die Aluminiumzufuhr über das Additiv und durch das Mischungsverhältnis „Biomasse zu Additiv“ hätte ergeben müssen. Gleichzeitig hätte auch der Siliziumgehalt in allen additivierten Pellets deutlich stärker ansteigen müssen. Gründe hierfür sind voraussichtlich in der Heterogenität der Ausgangsmaterialien, d. h. ggf. auch in einer Kontamination der Brennstoffe mit Bodenmaterial/Torf sowie in der Probenahme zu suchen (vgl. auch Aschegehalt und Heizwert in Abschnitt 5.2.1, [74]). Mögliche Verluste an Kaolin bei der Vorbereitung der Brennstoffe im Futtermittelmischer und bei der Pelletierung sind aus bisherigen Erfahrungen am TFZ eher nicht zu erwarten [67] [73]. Additivverluste bei der Brennstoffproduktion werden zudem in den hier angewendeten Guidelines des „BioFlex!“-Projekts durch einen Sicherheitszuschlag von 10 %, d. h. durch Teilung des benötigten Additivgehalts mit dem Faktor 0,9 berücksichtigt [8]. Siehe dazu auch die Formel (4.3) in Abschnitt 4.1.2.

Als Folge dieser Unterschiede wurden zunächst die gemessenen Ausgangswerte der nicht additivierten Materialien (Häckselgut, Pellets) auf Plausibilität hin untersucht. Hierzu wurden die Analysewerte für das Häckselgut aus der Ernte 2019 mit den Häckselgutproben aus den Jahren 2018 und 2020, mit den nicht additivierten Pelletproben 2019 und mit

Werten aus der Literatur [19] [101] verglichen. Hervorzuheben sind dabei die starken Unterschiede von *Phalaris arundinacea* im Aluminium- und Siliziumgehalt sowie im Aschegehalt (Abbildung 10, Abbildung 14) zwischen den Häckselgutproben und den beiden Pelletproben (mit und ohne Additiv). Dies deutet auf eine ungleichmäßige Verunreinigung des *Phalaris-arundinacea*-Ausgangsmaterials aus der Ernte 2019 und damit auf eine Heterogenität dieser Analyseproben hin. Folglich ist vor allem die Repräsentativität der Häckselgutprobe 2019 aus *Phalaris arundinacea* mit einem Aschegehalt von 9,9 m-% (wf) und einem Siliziumgehalt von 19.000 mg/kg (wf) anzuzweifeln. Für alle anderen Materialien (*Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Carex ssp.*) wurden die Häckselgutproben 2019 dagegen als repräsentativ eingestuft.

Für die Elementgehalte der additivierten Pellets wird im Folgenden daher auf berechnete Werte zurückgegriffen, ausgehend von der durch Wiegung exakt bestimmbar zugegebenen Masse an Additiv zu der Brennstoffmasse sowie von den Elementgehalten der nicht pelletierten Häckselgutproben 2019 und der Kaolinprobe (Tabelle 19). Im Fall von *Phalaris arundinacea* wird auf die nicht additivierte Pelletprobe als Ausgangswert für die Berechnung zurückgegriffen. Dieses Verfahren wurde bereits bei MACK et al. (2019) [73] und KUCHLER et al. (2020) [67] plausibel für Holz- und Agrarpellets angewendet und als deutlich genauer für die Elementzusammensetzung gesamtter Chargen additivierter Pellets im Vergleich zu Stichprobenmessungen beschrieben.

Tabelle 19: Gemessene Elementgehalte repräsentativer, nicht additivierter Proben aus der Ernte 2019 (_H = Häckselgut, _P = Pellets) und der verwendeten Referenzpellets sowie die daraus berechneten Gehalte (*) der mit Kaolin additivierten Pellets und der Paludi-Holzpellet-Mischungen (wasserfreie Bezugsbasis)

Brennstoff	N m-%	Cl m-%	S m-%	Al mg/kg	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	Si mg/kg
Holz (1) _P	< 0,10	0,006	0,005	25	811	414	131	15	55	166
Holz (2) _P	0,07	< 0,005	0,007	< 10	677	402	129	< 10	46	245
Weizenstroh _P	0,44	0,209	0,072	145	2.860	8.450	767	42	638	9.460
<i>Typha</i> _H	0,99	0,202	0,092	262	13.300	1.420	1.740	1.750	1.180	681
<i>Typha</i> + Kaolin*	0,97	0,197	0,090	4.062	13.020	1.661	1.748	1.733	1.153	5.246
<i>Phragmites</i> _H	0,59	0,071	0,071	171	1.800	740	637	277	276	11.800
<i>Phragmites</i> + Kaolin*	0,58	0,069	0,069	1.128	1.795	805	645	281	270	12.885
<i>Phalaris</i> _P	1,27	0,094	0,139	568	4.230	2.150	1.140	292	1.160	8.460
<i>Phalaris</i> + Kaolin*	1,24	0,092	0,136	2.568	4.191	2.268	1.152	301	1.134	10.773
<i>Phalaris</i> : Holz (30:70)*	0,43	0,032	0,047	177	1.743	926	432	95	380	2.710
<i>Phalaris</i> : Holz (10:90)*	0,19	0,014	0,020	66	1.032	577	230	38	157	1.067
<i>Carex</i> _H	1,17	0,185	0,116	172	4.660	2.460	2.530	401	1.270	9.070
<i>Carex</i> + Kaolin*	1,14	0,181	0,113	2.654	4.606	2.602	2.524	410	1.241	11.925

Als Effekt der berechneten Additivierung der Pellets mit Kaolin steigt demnach der Gehalt an Aluminium und Silizium im Brennstoff deutlich an (Tabelle 19). Weitere, ebenfalls im Kaolin enthaltene Elemente (Ca, K, Mg, Na) führten aufgrund nahezu identischer Elementgehalte im Additiv verglichen mit den Paludikulturen, aber auch aufgrund der insgesamt geringen Mengen Additiv nur zu minimalen Änderungen im Brennstoff. Dasselbe trifft auch auf die übrigen Elemente wie N, Cl, S etc. zu, die nicht im Kaolin enthalten sind und die somit durch die Additivierung im Brennstoff minimal abnahmen.

Berechnete Aschegehalte der additivierten Pellets lagen zwischen 5,3 m-% (*Phragmites australis*) und 8,1 m-% (*Typha ssp.*). Additivierte Pellets aus *Typha ssp.* und *Carex ssp.* konnten demnach nicht mehr der Klasse A nach DIN EN ISO 17225-6 zugeordnet werden (Aschegehalt $\leq 6,0$ m-%, wf), sondern entsprachen der Klasse B (Aschegehalt ≤ 10 m-%).

Analog zu den in Unterkapitel 5.1 dargestellten Ergebnisse für Häckselgut wurden Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens der additivierten und nicht additivierten Pellets berechnet (Tabelle 20). Hierzu wurden die berechneten Elementgehalte aus Tabelle 19 verwendet.

Tabelle 20: Brennstoffindizes (wasserfreier Bezugsbasis), berechnet aus den Gehalten chemischer Inhaltsstoffe in den Paludibrennstoffen (Tabelle 19) und in den verwendeten Referenzbrennstoffen (Tabelle 17)

Brennstoff	K + Na + Pb + Zn	K + Na + Pb + Zn + Cl + S	Molar (Si + P + K)/ (Ca + Mg + Al)	Molar Cl/Si	Molar Si/K	Molar 2S/Cl
	mg/kg	mg/kg	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol
Holz (1)	438	554	0,69	0,03	0,56	1,79
Holz (2)	415	545	0,91	0,02	0,85	3,10
Weizenstroh	8.499	11.306	5,29	0,02	1,56	0,76
<i>Typha</i>	3.198	6.138	0,24	0,24	0,67	1,01
<i>Typha</i> + 2,3 m-% Kaolin	3.422	6.294	0,49	0,03	4,39	1,01
<i>Phragmites</i>	1.050	2.470	5,78	0,00	22,19	2,21
<i>Phragmites</i> + 0,6 m-% K.	1.119	2.506	4,31	0,00	22,28	2,21
<i>Phalaris</i>	2.497	4.822	2,27	0,01	5,48	3,27
<i>Phalaris</i> + 1,2 m-% Kaolin	2.624	4.895	1,93	0,01	6,61	3,27
<i>Phalaris</i> + 70 m-% Holz (2)	1.045	1.828	1,95	0,01	4,07	3,25
<i>Phalaris</i> + 90 m-% Holz (2)	632	973	1,53	0,01	2,57	3,21
<i>Carex</i>	2.892	5.902	1,88	0,02	5,13	1,39
<i>Carex</i> + 1,5 m-% Kaolin	3.043	5.984	1,67	0,01	6,38	1,39

Eine Additivierung der Paludipellets mit Kaolin führte i. d. R. zu einer Reduzierung des molaren $(\text{Si} + \text{P} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al})$ -Verhältnisses [46] [90]. Demnach sollte es bei der Verbrennung der additivierten Pellets zu weniger Problemen mit Verschlackung kommen [73]. Auffällig war dabei ein recht hoher Wert für *Phragmites australis*, der dem Wert für Weizenstroh sehr ähnlich war. Aus früheren Projekten des TFZ ist bekannt, dass Weizenstrohpellets ohne Additiv in dem hier verwendeten 30-kW-Biomassekessel (Kessel 1) aufgrund sehr hoher Schlackebildung nicht eingesetzt werden können [73]. Dieser Effekt wäre demnach auch für *Phragmites australis* zu erwarten. Neben *Phragmites australis* könnte auch die Verwendung von *Phalaris arundinacea*, gefolgt von *Carex ssp.* zu Problemen mit Schlackebildung führen, wobei eine Additivierung sich jeweils positiv auf den Index auswirkte. Tatsächliche Verbrennungsversuche mit den Paludipellets sind in Unterkapitel 5.3, die Analyse der dabei entstehenden Aschen in Unterkapitel 5.4 dargestellt.

Bezüglich der aerosolbildenden Elemente kam es aufgrund der Additivierung mit Kaolin zu keiner wesentlichen Veränderung. Wie bereits bei den Häckselgutproben beobachtet (siehe Unterkapitel 5.1) sollte es bei der Verbrennung von *Typha ssp.* zur höchsten Staubfreisetzung, gefolgt von *Carex ssp.*, *Phalaris arundinacea* und *Phragmites australis* kommen (Tabelle 20). Bezüglich des ohnehin schon niedrigen molaren Cl/Si-Verhältnisses, das als Indikator für die Einbindung von K in die Asche herangezogen wird [8] [47] [73], deutet sich eine leichte Verbesserung bei *Typha ssp.* durch die Additivierung der Brennstoffe an. Vor allem der erhöhte absolute Gehalt an Silizium nach der Additivierung und das deutlich erhöhte molare Si/K-Verhältnis deuten an, dass sich das Kaolin positiv auf das Verbrennungsverhalten von *Typha ssp.* auswirken sollte.

Inwieweit es zu einer tatsächlichen Verbesserung des Verbrennungsverhaltens durch die Additivierung der Paludibiomasse kommt, lässt sich erst durch reale Verbrennungsversuche oder durch die Anwendung der PASSA-Methode feststellen [74] [86].

5.3 Feuerungsversuche

Ausgehend von den Brennstoffanalysen wurden die am TFZ produzierten Paludipellets in zwei Biomassekesseln thermisch verwertet. Die dabei frei werdenden gasförmigen und partikelförmigen Emissionen sind in den Abschnitten 5.3.1 (Kessel 1, 30-kW-Biomassekessel mit Treppenrost) und 5.3.2 (Kessel 2, 15-kW-Pelletkessel mit Drehrost) dargestellt. Die Analysen der dabei entstehenden Aschen werden in den Abschnitten 5.4.3 und 5.4.4 wiedergegeben.

5.3.1 Versuche mit Kessel 1 (30-kW-Biomassekessel)

Feuerungsversuche an Kessel 1 wurden mit allen in diesem Projekt produzierten Versuchspellets aus Paludibiomasse (mit und ohne Additiv), aber auch mit gemahlenem Häckselgut von *Phalaris arundinacea* durchgeführt. Die Additivierung des Häckselguts erfolgte über eine separate Hinzudosierung direkt in die Förderschnecke zwischen Brenn-

stoffbunker und Kessel (siehe Abschnitt 4.2.3). Als Referenzbrennstoff kamen handelsübliche Holzpellets (A1 Qualität nach ENplus) zum Einsatz. Obwohl Kessel 1 für die Verwendung von Agrarbrennstoffen nach Herstellerangaben prinzipiell geeignet sein sollte, ist er in Deutschland nicht auf Brennstoffe der Ziffer 8 und 13 nach 3 § der 1. BImSchV zugelassen.

Die mittleren CO-Emissionen von Kessel 1 sind in Abbildung 18 wiedergegeben. Alle eingesetzten Brennstoffe hielten den CO-Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Nm³ (Stufe 2 für Holz- und Agrarbrennstoffe bei 13 % O₂) ein [12]. Somit sind alle Brennstoffe in Kessel 1 als unkritisch bezüglich ihrer CO-Emissionen zu bewerten. *Phragmites australis* und *Carex ssp.* lagen auf demselben Niveau wie der Referenzbrennstoff, gefolgt von pelletierten und gehäckselten *Phalaris arundinacea*. Ähnlich niedrige Werte wurden bei DAHMS et al. (2017) gemessen [19]. Die höchsten CO-Emissionen wurden für *Typha ssp.* gemessen. Diese waren signifikant höher als alle übrigen Messungen ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test).

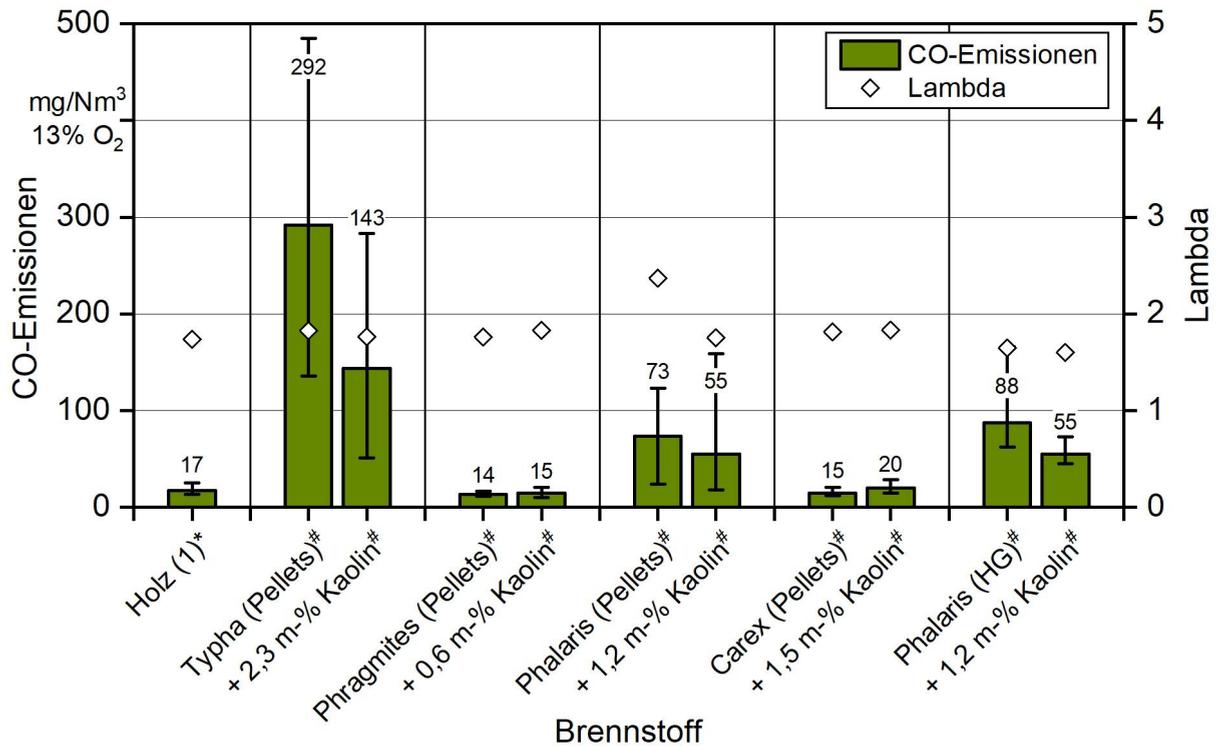


Abbildung 18: Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; $n = 5$; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist für diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Hohe CO-Emissionen deuten immer auf eine unvollständige Verbrennung hin [63] [86]. Eine Additivierung mit Kaolin führte zu tendenziell niedrigeren CO-Emissionen. Dieser Effekt wurde bereits in früheren Studien beschrieben [58] [73], wobei die Ursache noch nicht

abschließend geklärt ist. Eine mögliche Erklärung könnten positive Effekte bei der Belüftung des Glutbetts durch ein verbessertes Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe sein. Eine andere Erklärung könnte in einer poröseren Struktur der bereits verkohlten Pellets während des Ausbrennens liegen, die das Eindringen von Sauerstoff in die Holzkohle verstärken könnte. BOZHAGHIAN et al. [5] diskutierten zudem, dass hohe CO-Emissionen möglicherweise auf einen noch zu identifizierenden Effekt hoher Anteile gasförmiger Alkaliverbindungen im Rauchgas zurückzuführen sein könnten, die die Oxidation von CO zu CO₂ beeinflussen. Folglich würde eine Additivierung mit Kaolin zu einer Reduzierung nicht nur der Gesamtstaubemissionen (siehe weiter unten), sondern auch der CO-Emissionen durch Verringerung von Alkaliverbindungen im Rauchgas führen.

Interessanterweise stiegen die CO-Emissionen während der Studie von BOZHAGHIAN et al. [5] an, wenn CaCO₃ als Additiv zu Strohreststoffen zugegeben wurde. Sehr hohe CO-Emissionen wurden auch bei der Verbrennung von Ca-reichen Graspellets durch MACK et al. [73] [74] gemessen. Bei den hier vorgestellten Versuchen war der CO-Wert für *Typha ssp.* am höchsten, d. h. für die Paludikultur mit den höchsten Werten für anorganischen Kohlenstoff („total inorganic carbon“, TIC) in der Asche (gemessen bei 550 °C veraschten Proben) und Calcium, was auf einen hohen Anteil an Ca-Karbonaten im Brennstoff hinweist. Somit scheinen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung landwirtschaftlicher Brennstoffe nicht nur die NO_x-, SO_x-, HCl- oder Gesamtstaubemissionen zu beeinflussen (siehe weiter unten), sondern möglicherweise auch die CO-Emissionen. Weitere Studien sind erforderlich, um diese Effekte abschließend zu erklären.

Ein Brennstoffparameter, der die CO-Emission bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe häufig beeinflusst, ist der Wassergehalt im Brennstoff [63] [86]. Hohe Wassergehalte können zu einer Abkühlung in der Brennkammer führen, was eine unvollständige Verbrennung zur Folge hat. Während dieser Studie wurde kein Trend zwischen dem Wassergehalt und den CO-Emissionen von Kessel 1 festgestellt ($R^2 = 0,02$, berechnet nur für Pelletbrennstoffe). Dieses Ergebnis wurde aufgrund des insgesamt niedrigen Wassergehalts der Pellets erwartet (siehe Abschnitt 5.2.1).

Die mittleren Emissionen organischen Kohlenstoffs (org. C) zeichnen erwartungsgemäß ein ähnliches Bild wie die Emissionen an CO (Abbildung 19). Dabei waren die Org.-C-Emissionen von *Typha ssp.* signifikant gegenüber allen anderen Brennstoffen erhöht ($p \leq 0.05$, ANOVA, Tukey-Test). Hohe Org.-C-Emissionen deuten analog den CO-Emissionen auf eine unvollständige Verbrennung hin [63].

Die Org.-C-Emissionen lagen insgesamt, wie für automatisch beschickte Feuerungen üblich, auf einem niedrigen Niveau. Der Org.-C-Grenzwert nach der europäischen Ökodesign-Richtlinie [44] wurde bei allen am TFZ durchgeführten Nennlastmessungen an Kessel 1 eingehalten. Der Grenzwert der Ökodesign-Richtlinie bezieht sich allerdings auf einen gewichteten Mittelwert aus Nennlast- (15 %) und Teillastmessung (85 %) (vgl. Unterkapitel 3.3). Teillastmessungen mit Paludipellets wurden nicht durchgeführt, weshalb zur tatsächlichen Einhaltung des Org.-C-Grenzwertes nach Ökodesign keine finalen Angaben gemacht werden können.

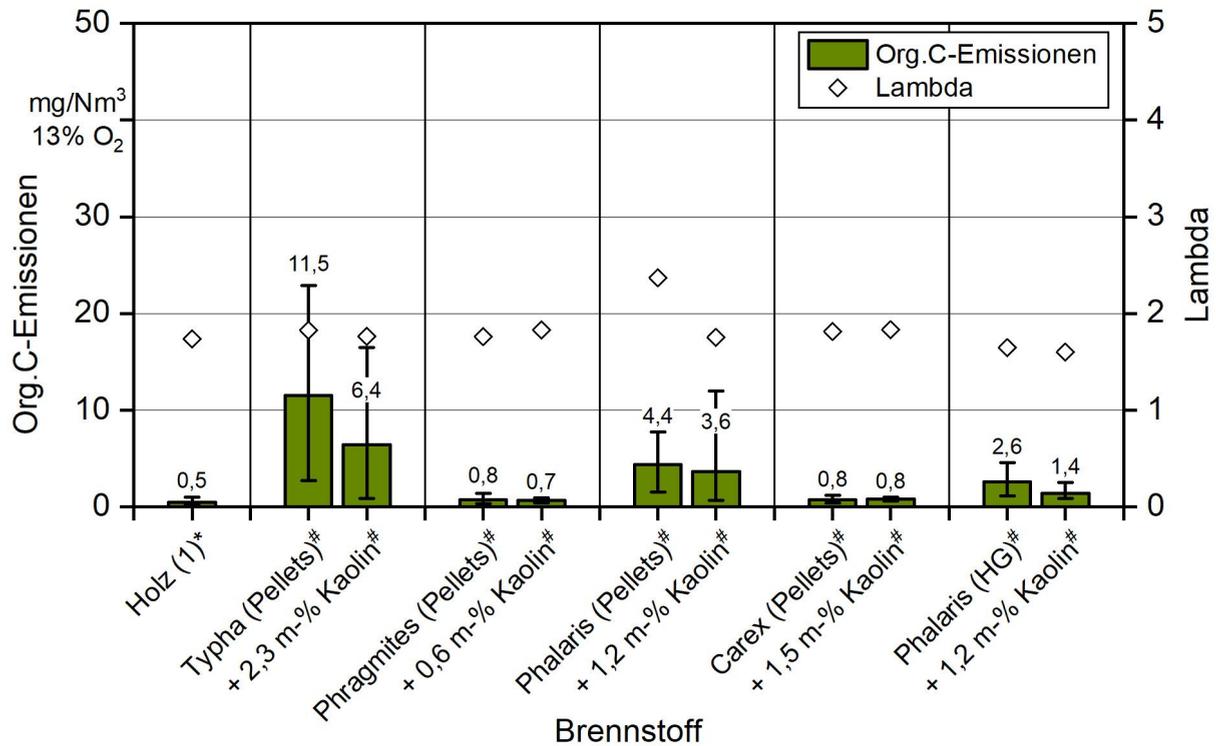


Abbildung 19: Mittlere Org.-C-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; $n = 5$; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist für diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Die mittleren NO_x -Emissionen bei Nennlast lagen für die Paludibrennstoffe zwischen 320 und 595 mg/Nm^3 und damit signifikant höher als beim Referenzbrennstoff ($p \leq 0.05$, ANOVA, Tukey-Test) (Abbildung 20). Sie lagen damit in einem ähnlichen Bereich wie bei DAHMS et al. [19] und überschritten teilweise den Grenzwert der 1. BImSchV für Brennstoffe der Ziffern 8 und 13, der bei der Typenprüfung für Anlagen < 100 kW eingehalten werden muss (500 mg/Nm^3) [12]. Ebenso überschritten sie teils deutlich den Grenzwert der europäischen Ökodesign-Richtlinie (145 mg/Nm^3 bezogen auf 13 % O_2) [44]. Analog zu den Org.-C-Emissionen bezieht sich der Ökodesign-Grenzwert auch für NO_x auf einen Mittelwert aus 85 % Teil- und 15 % Nennlast. Ebenso wurde der Grenzwert nach der – hier allerdings nicht anzuwendenden – 44. BImSchV für Anlagen > 1 MW (je nach Anlagengröße 107 bis 197 mg/Nm^3 , bezogen auf 13 % O_2) nicht eingehalten. Generell ist bei Paludibrennstoffen demzufolge mit hohen NO_x -Emissionen zu rechnen, die kritisch für die Einhaltung aktuell gültiger NO_x -Grenzwerte bewertet werden könnten.

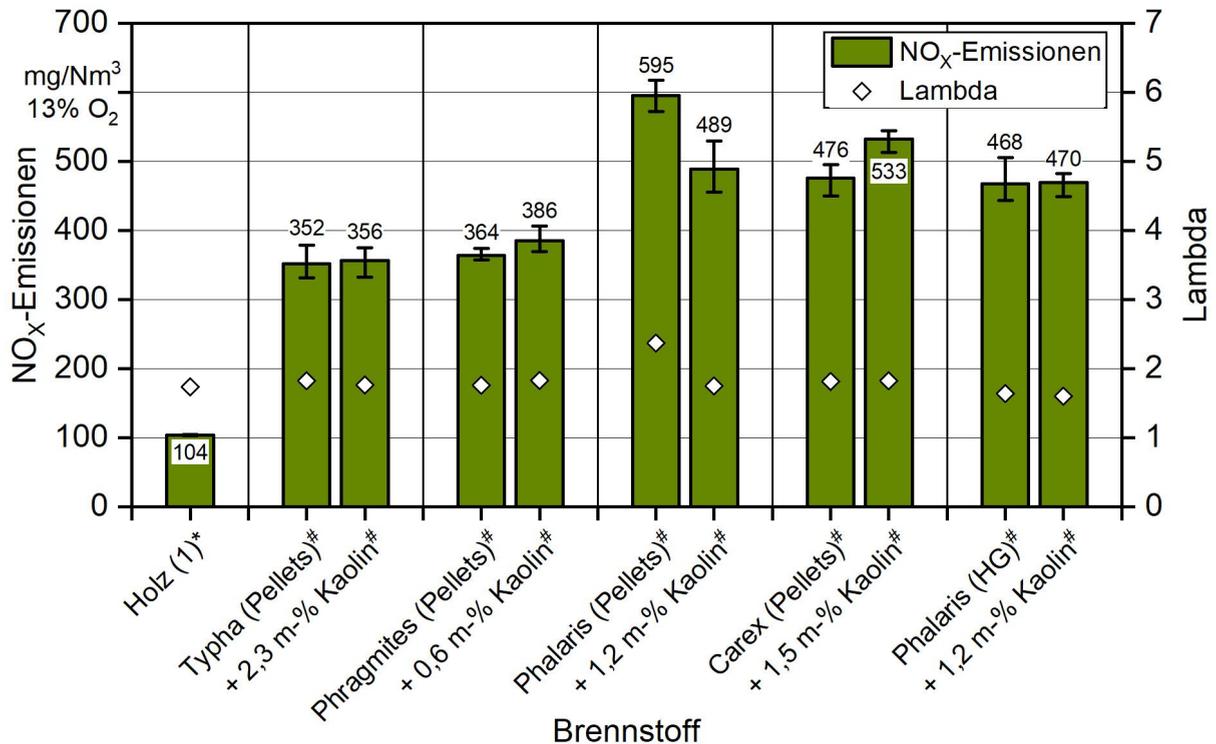


Abbildung 20: Mittlere NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Die Emissionen an NO_x waren linear abhängig vom Stickstoffgehalt im Brennstoff (Abbildung 21) [73] [86] [91] [104]. Neben technischen Maßnahmen bei der Verbrennung (Luftstufung im Kessel, SNR, SNCR etc.) liegen Möglichkeiten zur Reduzierung der NO_x-Emissionen somit vor allem in der Reduzierung des Stickstoffgehalts in der Biomasse, beispielsweise durch Mischung stickstoffreicher mit stickstoffarmen Brennstoffen [73]. Versuche zu Brennstoffmischungen stickstoffreicher Paludipellets mit stickstoffarmen Holzpellets wurden mit Kessel 2 durchgeführt und sind in Abschnitt 5.3.2 dargestellt. Eine weitere Maßnahme für die Senkung des Stickstoffgehalts ist möglicherweise die Wahl des Erntezeitpunkts von Paludibiomasse. DAHMS et al. (2014) berichteten von einer leichten Abnahme des Stickstoffgehalts in der Biomasse, wenn die Brennstoffe im Winter statt im Sommer oder Herbst geerntet wurden [19]. Ähnliche Effekte wurden von HARTUNG et al. (2020) im Projekt MOORuse gemessen, wobei sich der N-Gehalt vom Sommerschnitt (Mai) bis in den Herbst (September) nahezu halbiert hat [51]. Die Additivierung mit Kaolin hatte keinen Einfluss auf die NO_x-Emissionen.

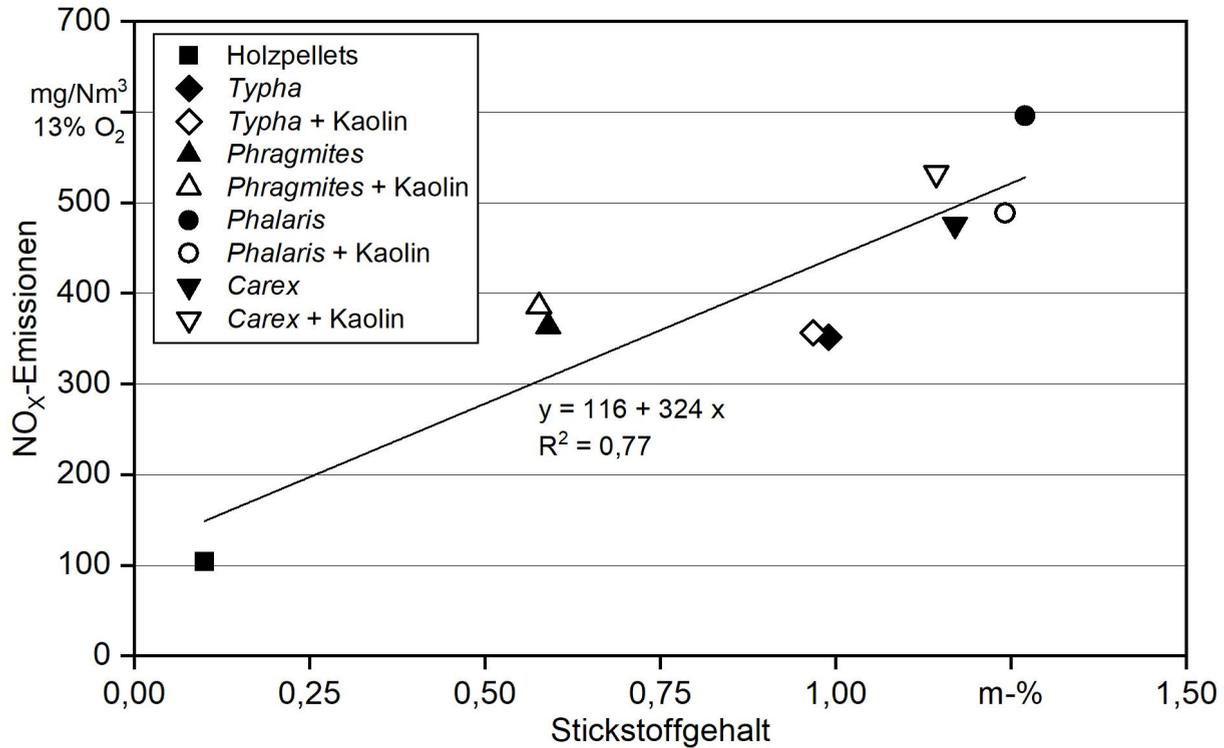


Abbildung 21: Mittlere NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludipellets in Kessel 1 (30-kW-Treppenrostfeuerung) im Verhältnis zum Stickstoffgehalt der Brennstoffe

Die Emissionen an HCl und SO_x werden nicht über die 1. BImSchV oder die europäische Ökodesign-Richtlinie limitiert. Für die Verbrennung von Agrarbrennstoffen ist jedoch eine erhöhte Freisetzung von HCl und SO_x zu erwarten [73]. Neben gesundheits- und umweltrelevanten Emissionen kommt es dadurch auch zur Korrosionsgefahr in den Feuerungen [63]. In den hier dargestellten Versuchen lagen die HCl- und SO_x-Emissionen der Paludipellets signifikant um ein Vielfaches über den Emissionen bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen (Abbildung 22, Abbildung 23, jeweils $p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test). HCl stieg linear mit dem Cl-Gehalt im Brennstoff an ($R^2 = 0,85$), SO_x mit dem Gehalt an Schwefel ($R^2 = 0,85$).

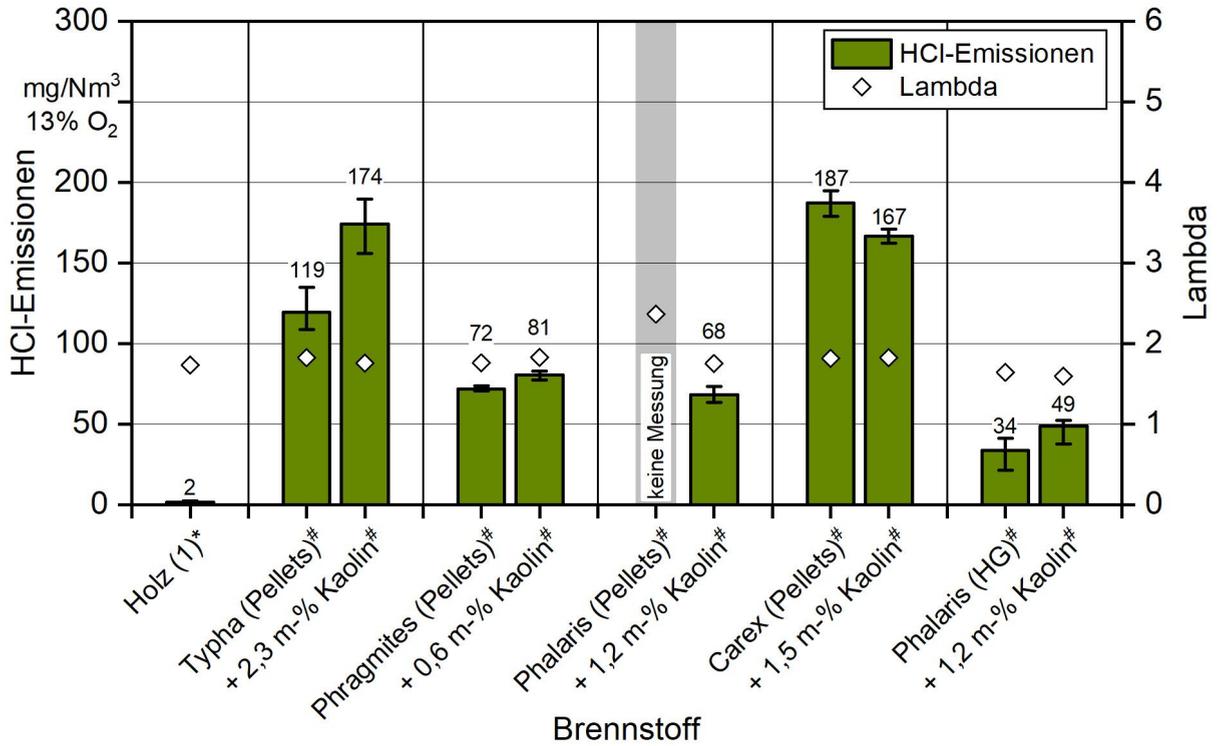


Abbildung 22: Mittlere HCl-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

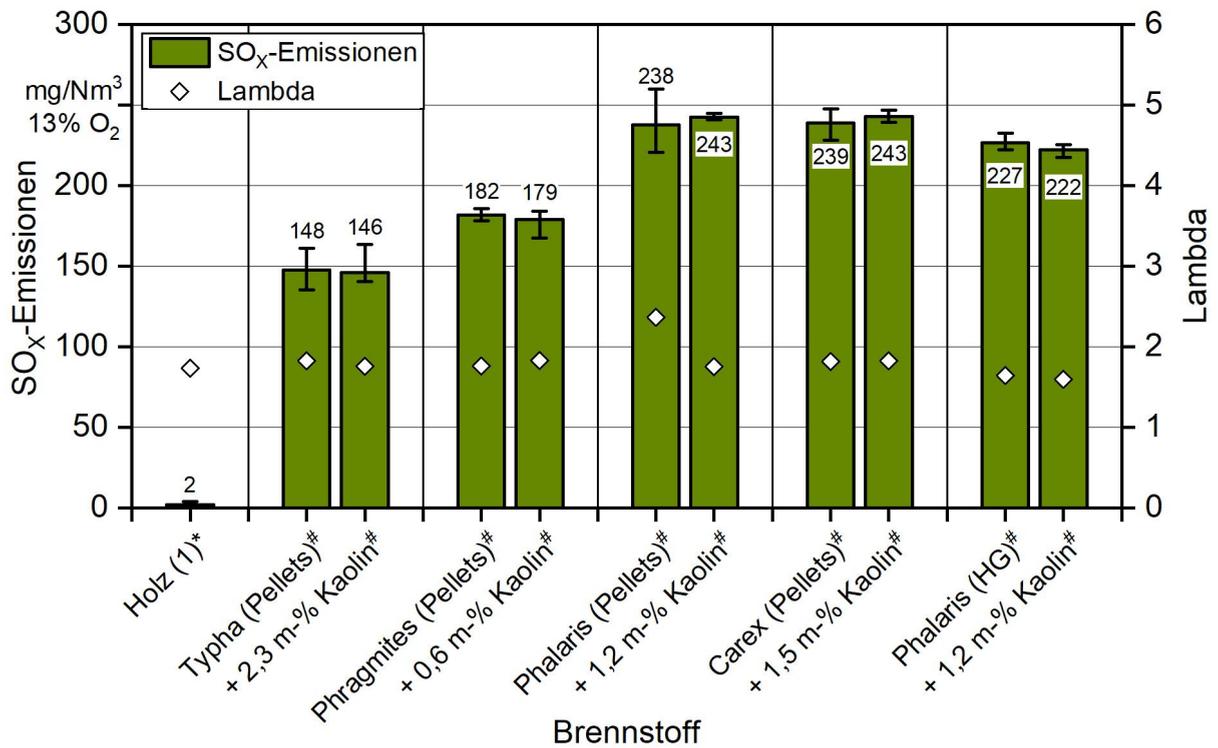


Abbildung 23: Mittlere SO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Eine Additivierung der Brennstoffe mit Kaolin führte vor allem bei *Typha ssp.* zu einer weiteren signifikanten Zunahme der HCl-Emissionen ($p \leq 0,05$) (Abbildung 22). Als Erklärung kann die Wirkungsweise des Additivs gelten, beschrieben in den Formeln (3.5) und (3.8) in Abschnitt 3.1.5. Durch die Bindung von K und Na als Aluminiumsilikat in der Asche wird das Cl im Brennstoff bei der Verbrennung nicht als KCl und damit als Aerosol freigesetzt, sondern steht für die Bildung von HCl zur Verfügung [8] [56] [58] [73]. Dieser Effekt tritt theoretisch auch bei den SO_x -Emissionen auf, wie es die Formeln (3.6) und (3.9) in Abschnitt 3.1.5 darlegen. Eine Erhöhung von SO_x durch Additivierung konnte allerdings aus den Messdaten nicht bestätigt werden (Abbildung 23).

Die Emissionen an Gesamtstaub sind in Abbildung 24 wiedergegeben. Der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV für Holz- und Agrarbrennstoffe (20 mg/Nm^3 bei $13\% \text{ O}_2$) wurde nach der zulässigen Rundung der Werte von dem Referenzbrennstoff sowie von Pellets aus *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und den additivierten Pellets aus *Carex ssp.* eingehalten. Reine Brennstoffe aus *Carex ssp.* überschritten den Grenzwert. Vor allem Pellets aus *Typha ssp.* führten zu einer deutlichen Grenzwertüberschreitung mit signifikant höheren Werten gegenüber dem Referenzbrennstoff ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test).

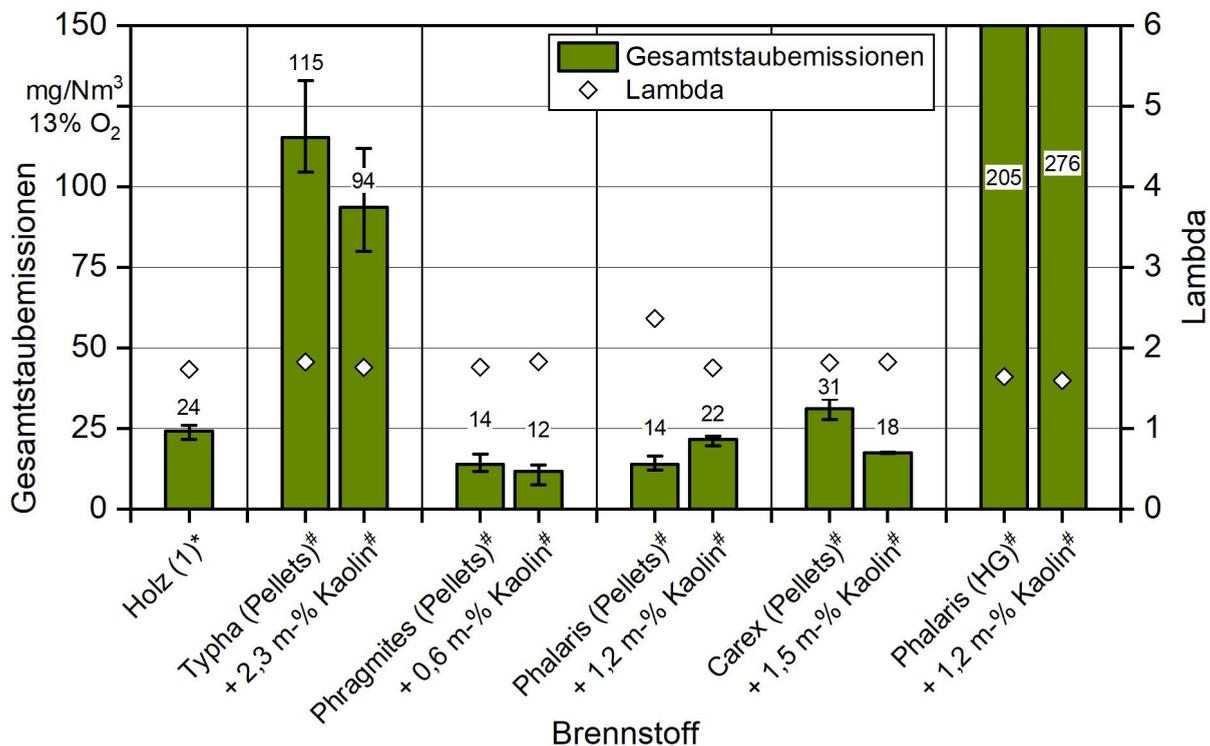


Abbildung 24: Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1; $n = 5$; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; HG = Häckselgut; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Hohe Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von Biomasse können an der Freisetzung mineralischer Aerosole, aber auch an der Bildung von Rußpartikeln und Teer aufgrund einer unvollständigen Verbrennung liegen [63]. Setzt sich der Staub vornehmlich aus Aerosolen zusammen, sollten die Werte gut mit der Summe der aerosolbildenden Elemente im Brennstoff (K, Na, Pb, Zn) korrelieren. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,34$ ist dieser Zusammenhang in der hier dargestellten Studie jedoch nicht besonders stark ausgeprägt, weshalb im Fall von *Typha ssp.* vornehmlich von einer unvollständigen Verbrennung ausgegangen wird. Auch die hohen Werte für CO und org. C deuten für *Typha ssp.* in dieselbe Richtung (Abbildung 18, Abbildung 19). Nichtsdestotrotz lagen die Gesamtstaubemissionen von *Typha ssp.* und *Carex ssp.* deutlich niedriger, wenn additivierte Pellets im Vergleich zu nicht additivierten Brennstoffen verbrannt wurden. Die Additiv-Beimischungen von 2,3 m-% und 1,5 m-% fielen höher als bei *Phalaris arundinacea* und *Phragmites australis* aus. Vor allem bei *Typha ssp.* sollte es durch die Additivierung zu einer besseren Einbindung des K in die Asche kommen (siehe Si/K-Verhältnis in Tabelle 20). Somit kann der Rückgang der Staubemissionen bei *Typha ssp.* und *Carex ssp.* als ein positiver Effekt des Kaolins gedeutet werden [56] [73]. Da der notwendige Gehalt an Additiv in dieser Studie möglicherweise unterschätzt wurde (vgl. Unterkapitel 5.1 und Anhang 0), könnte die positive Wirkung ggf. durch höhere Additivzugaben noch gesteigert werden.

Die höchsten Staubemissionen zeigte Kessel 1 bei der Verbrennung gemahlene Häckselguts aus *Phalaris arundinacea* (Abbildung 24). Da dieser Effekt nicht bei pelletierten *Phalaris-arundinacea*-Proben auftrat, können die sehr hohen Staubwerte von über 200 mg/Nm^3 nicht allein auf den Gehalt an Aerosolbildnern im Brennstoff zurückgeführt werden. Die gleichzeitig niedrigen Werte für CO (Abbildung 18) und org. C (Abbildung 19) deuten darauf hin, dass auch eine erhöhte Bildung von Teer- und Rußpartikeln aufgrund einer unvollständigen Verbrennung eher unwahrscheinlich ist. Eine Ursache für die hohen Emissionswerte könnte vielmehr in der Aufbereitungsform des gemahlene Häckselguts liegen, dass aufgrund der geringen Masse seiner Einzelpartikel über den Kaminzug aus dem Brennraum des Kessels mit dem Abgas mitgerissen werden könnte und sich dabei auf den Filtern für die Staubprobenahme nach VDI 2066 Blatt 1 anreichert. Ähnliche Beobachtungen wurden bei Verbrennungsversuchen mit Holzhackschnitzeln gemacht, bei denen fein gemahlener Mineralboden (Partikelgröße $\leq 2 \text{ mm}$) dem Brennstoff künstlich hinzudosiert wurde [68]. Hierdurch mag auch der höhere Emissionswert der additivierten *Phalaris-arundinacea*-Probe aus gemahlene Häckselgut mit 276 mg/Nm^3 bedingt sein, da sich neben Brennstoffpartikeln auch feine Kaolinpartikel im Abgasstrom befinden könnten. Zu beachten ist, dass der Kessel nicht für gemahlene Häckselgut ausgelegt ist und mit diesem Brennstoff nicht betrieben werden sollte. Ein ursprünglich vorgesehener Einsatz nicht gemahlene Häckselguts war jedoch aufgrund der Abmessungen der Einzelpartikel mit den hier eingesetzten Fördereinrichtungen des Kessels und des Austragsbunkers nicht möglich und führte zu Verstopfung der Förderschnecken.

Alle Versuche an Kessel 1 sollten bei Nennlast durchgeführt werden. Vor jedem Versuch wurde der Kessel so weit wie möglich auf den jeweiligen Brennstoff hin über einen separaten Vorversuch eingestellt (Luftsteuerung, Hinzudosierung etc.). Die hier dargestellten

Versuche stellen somit einen optimierten Kesselbetrieb pro Brennstoff dar. Die Messbedingungen während der Versuche unter Nennlast konnten jedoch in keinem Fall als stabil bezeichnet werden. Besonders deutlich wird dies, wenn die Wärmeleistung des Kessels über die Versuchsdauer betrachtet wird (Abbildung 25, Abbildung 26).

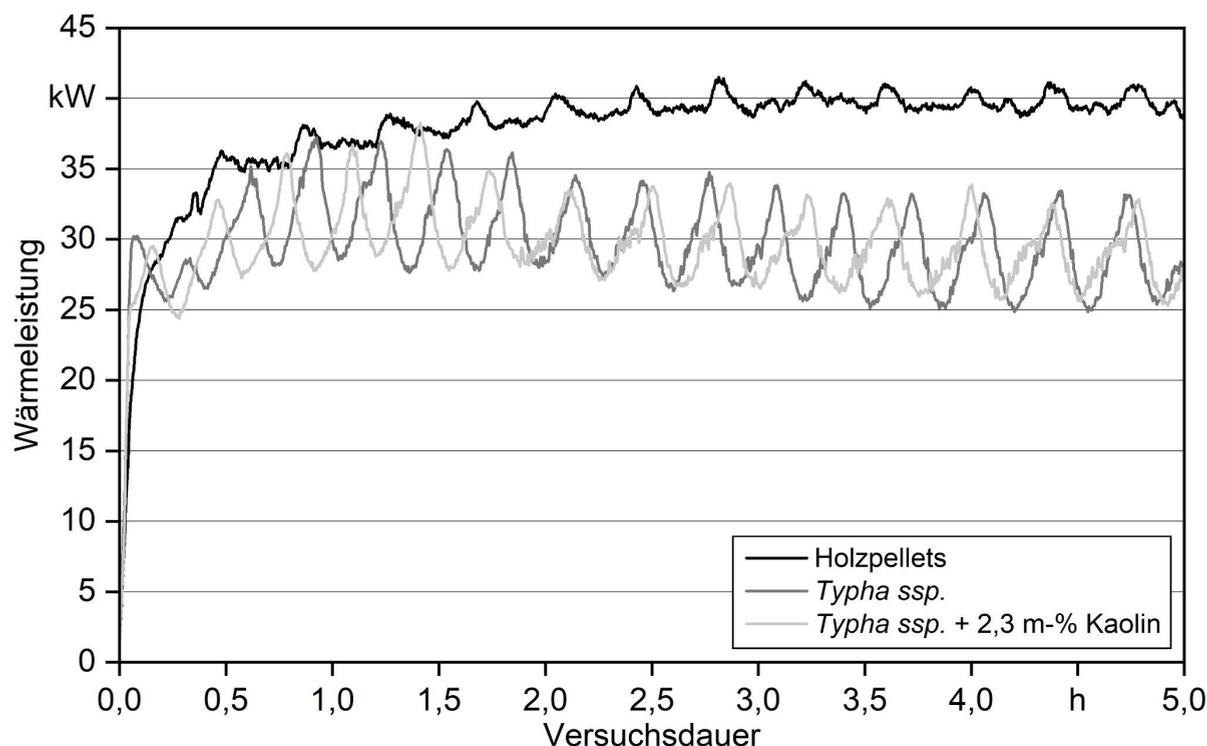


Abbildung 25: Beispiel für die Schwankung der Wärmeleistung von Kessel 1 (30-kW-Treppenrostfeuerung) beim Einsatz von Pellets aus Holz und Typha ssp.

Verglichen mit der sehr stabilen Wärmeleistung bei der Verbrennung von Holzpellets kam es bei der Verbrennung pelletierter Paludikulturen zu starken Schwankungen in der Wärmeleistung. Obwohl im Durchschnitt je Versuch stets die gewünschte Nennlast von 30 kW erreicht wurde, war der Kessel über den gesamten Versuchstag konstant am Regeln (Abbildung 25). Gleichzeitig variierte die O₂-Konzentration im Brenngas zwischen 6,4 und 14,7 % (Daten nicht gezeigt). Starke Schwankungen im Lastbereich führen i. d. R. zu einer Verschlechterung im Emissionsverhalten von Biomassefeuerungen [2] [82] [83] [102]. Die teilweise höheren Emissionen von Paludibrennstoffen im Vergleich zu Holzpellets sind demnach auch unter diesem Aspekt zu bewerten.

Die Varianz in der Wärmeleistung lässt sich vor allem auf den eingesetzten Brennstoff zurückführen, da solch starke Schwankungen bei der Verbrennung regulärer Holzbrennstoffe mit Kessel 1 in zahlreichen Versuchen am TFZ nie aufgetreten waren. Eine Ursache kann in einer ungleichmäßigen Ausformung des Glutbetts beim Einsatz von Paludibrennstoffen liegen, wobei es aufgrund einer erhöhten Schlackebildung (siehe Abschnitt 5.4.3) zu einer ungleichmäßigen Luftdurchströmung des Brennstoffs und damit zu Unregelmäßigkeiten bei der Verbrennung kommen könnte. Indes konnte kein Unterschied zwischen

den einzelnen Paludipellets oder dem Grad der Additivierung erkannt werden (Abbildung 26). Die Schwankungen in der Wärmeleistung nahmen jedoch bei der Verwendung gemahlene Häckselguts aus *Phalaris arundinacea* stark ab, vermutlich aufgrund einer gleichmäßigeren Glutbettausformung beim Einsatz dieses Materials (vgl. auch Abschnitt 5.4.3).

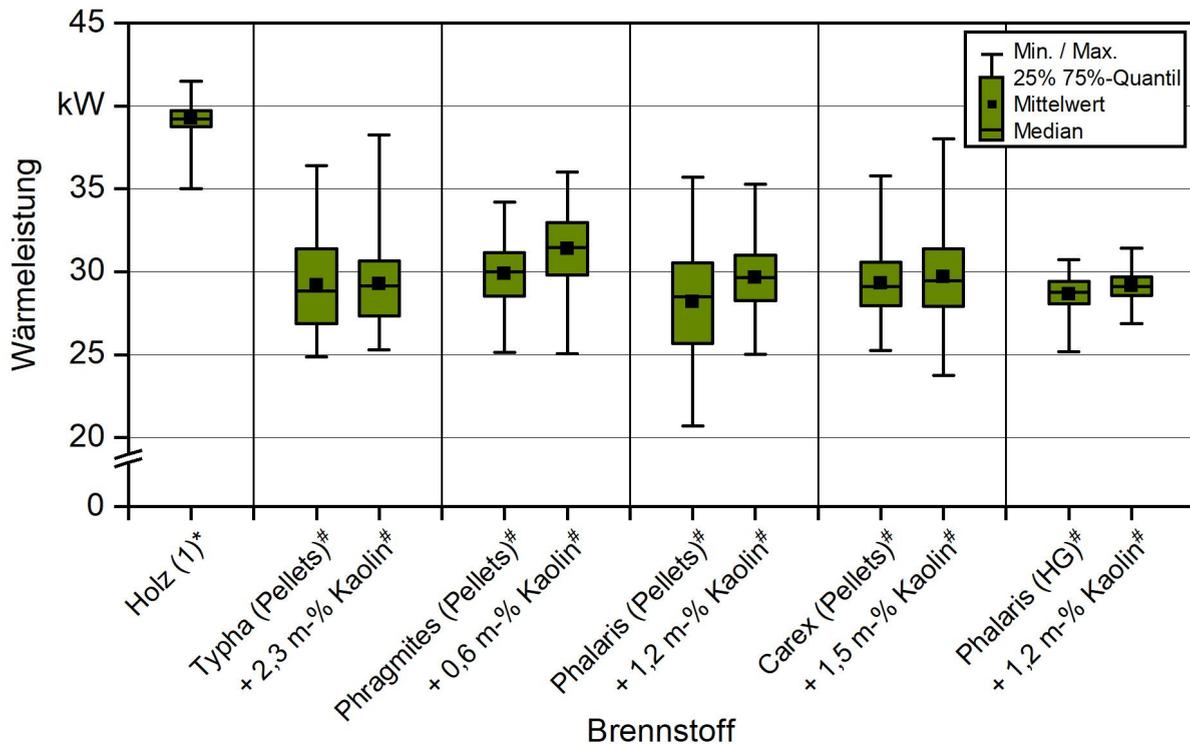


Abbildung 26: Mittlere Wärmeleistung von Kessel 1 (30-kW-Treppenrostfeuerung) beim Einsatz von Brennstoffen aus Paludikulturen und Holz nach dem ersten Erreichen der Nennlast (HG = Häckselgut; * = Kessel auf Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Mit regulären Holzpellets wurde eine deutlich höhere Wärmeleistung gemessen als mit den Paludibrennstoffen. Die Wärmeleistung lag mit maximal 35 kW höher, als vom Hersteller für den Betrieb des Kessels mit Holzpellets angegeben wird. Eine höhere Wärmeleistung bei der Verbrennung von Holzpellets wurde bereits in früheren Projekten mit demselben Kessel erreicht [74].

5.3.2 Versuche mit Kessel 2 (15-kW-Pelletkessel)

Die Feuerungsversuche mit dem 15-kW-Pelletkessel glichen den Erfahrungen mit Kessel 1. Neben reinen und additivierten Pellets aus *Typha ssp.* und *Phalaris arundinacea* wurden in Kessel 2 auch *Phalaris-arundinacea*-Holzpellet-Mischungen verbrannt.

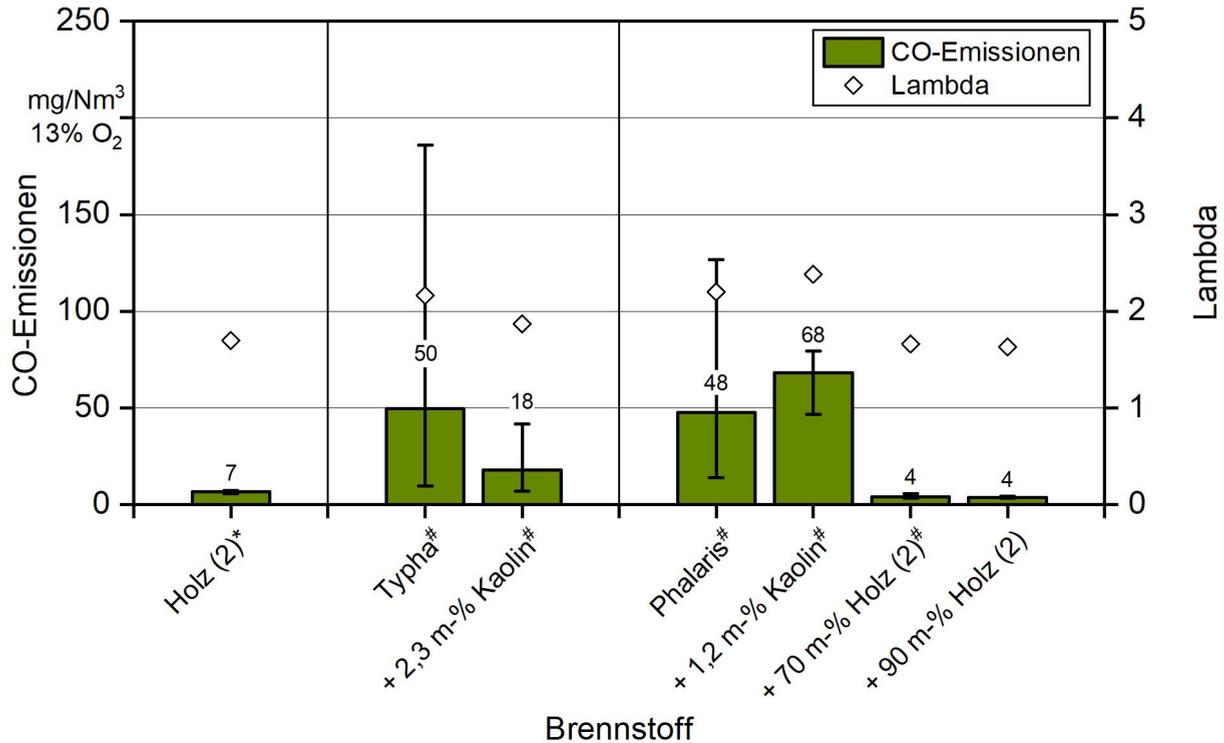


Abbildung 27: Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; $n = 5$; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Beide Paludibrennstoffe zeigten im 15-kW-Pelletkessel sowohl als purer Brennstoff als auch in der additivierten Variante signifikant erhöhte CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzbrennstoff oder zu den Paludi-Holzpellet-Mischungen ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test) (Abbildung 27). Die starken Schwankungen beim CO lassen sich dabei auf einen beträchtlich schwankenden Kesselbetrieb zurückführen. Deutlicher noch als mit Kessel 1 konnten auch mit Kessel 2 i. d. R. keine konstanten Lastbedingungen erreicht werden und es kam bereits während der ersten Staubmessung mit Paludipellets regelmäßig zu einem starken Einbruch der Wärmeleistung (Abbildung 35). In der Folge musste nach jeder Staubmessung, d. h. spätestens nach ca. jeder Stunde im Nennlastbetrieb, manuell die Kesselreinigung ausgelöst werden, damit ein weiterer Kesselbetrieb überhaupt möglich war. Ausnahme waren die Paludi-Holzpellet-Mischungen, bei denen nur eine Kesselreinigung (beim Mischungsverhältnis von 30 : 70) bzw. keine Reinigung (beim Mischungsverhältnis 10 : 90) notwendig war. Im letztgenannten Fall war ein stabiler Nennlastbetrieb über den gesamten Versuch möglich.

Hervorzuheben ist, dass der 15-kW-Pelletkessel für Holzpellets mit der Qualität ENplus A1 ausgelegt ist. Ein Betrieb mit den hier dargestellten Paludipellets ist in der Praxis nicht vorgesehen und zudem rechtlich nicht zulässig. Die Versuche mit Biomassekessel 1, aber auch DAHMS et al. [19] zeigen, dass eine andere Kesseltechnologie hier weniger problematisch ist.

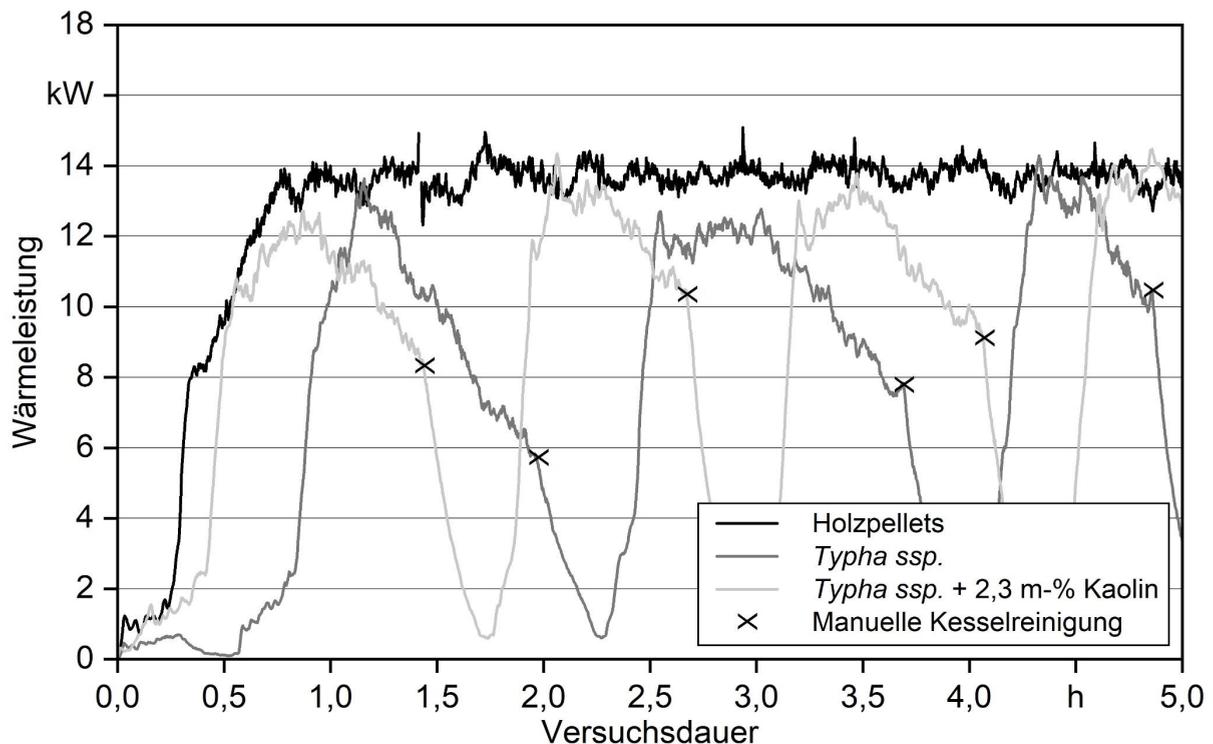


Abbildung 28: Beispiel für die Schwankung der Wärmeleistung des 15-kW-Pelletkessels (Kessel 2) beim Einsatz von Pellets aus Holz und *Typha ssp.* (x = manueller Start der Kesselreinigung)

Nichtsdestotrotz lagen die mittleren CO-Emissionen wie bereits bei Kessel 1 deutlich unter dem Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Nm³. Ebenso führte die Additivierung von *Typha ssp.* erneut zu einer Reduzierung der CO-Emissionen. Die ohnehin schon niedrigen Emissionswerte konnten durch eine Mischung der *Phalaris-arundinacea*-Brennstoffe mit Holzpellets (Mischungsverhältnisse 30 : 70 und 10 : 90) auf Werte von lediglich 4 mg/Nm³ reduziert werden.

Auch die Org.-C-Emissionen lagen mit durchschnittlich 4,1 bis 5,6 mg/Nm³ für Paludipellets niedrig (Abbildung 29). Sie waren damit vergleichbar mit den Ergebnissen von Kessel 1. Erneut kam es durch die Mischung von *Phalaris-arundinacea*-Pellets mit Holz zu einer deutlichen Reduzierung der Werte. Im Gegensatz zu den CO-Emissionen war dieser Effekt statistisch signifikant ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test).

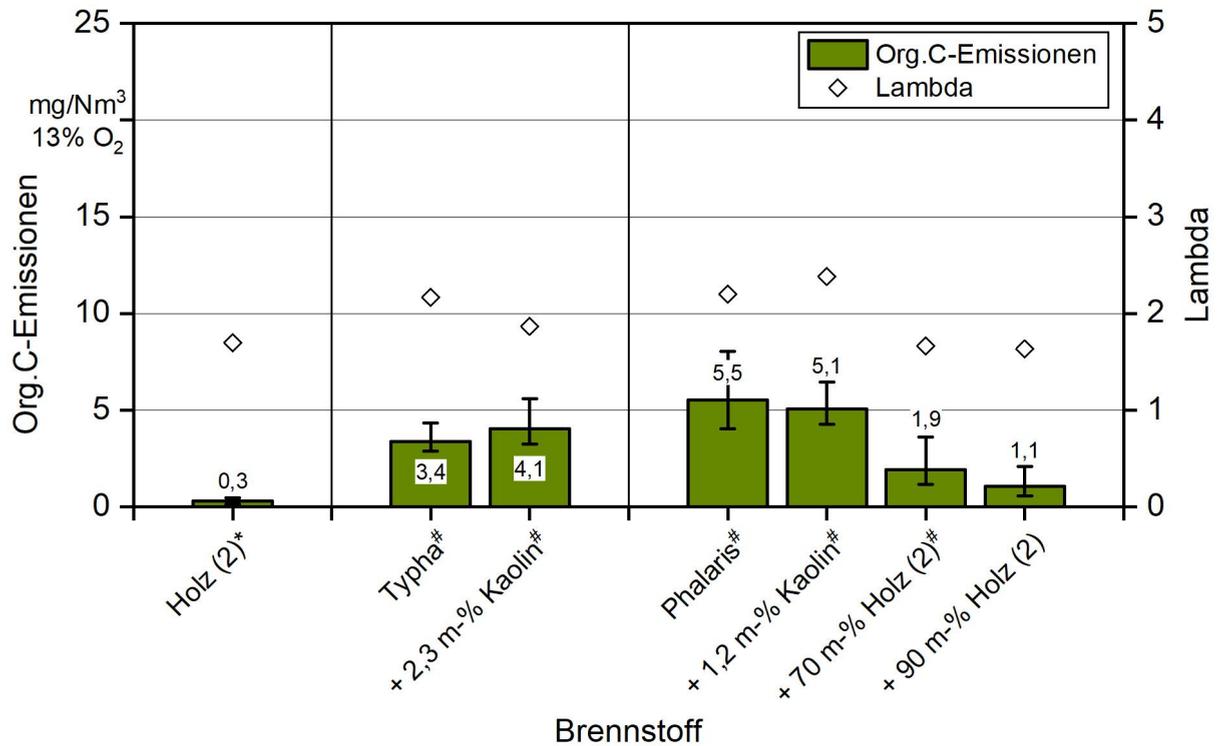


Abbildung 29: Mittlere Org.-C-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; $n = 5$; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Die Emissionen an NO_x lagen für Paludipellets signifikant über den Werten des Referenzbrennstoffs ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test) (Abbildung 30) und überschritten den Typenprüfungs-Grenzwert nach 1. BImSchV sowie den Jahresemissions-Grenzwert der Ökodesign-Richtlinie um ein Vielfaches. Obwohl sich Letzterer auf eine Mischung aus 15 % Nenn- und 85 % Teillastbetrieb bezieht, ist eine Einhaltung dieses Werts mit Paludibrennstoffen fraglich. Auch die Werte der 44. BImSchV wären nicht eingehalten worden. Im Vergleich zu Kessel 1 oder den Ergebnissen von DAHMS et al. [19] lagen die NO_x -Emissionen mit 791 bis 950 mg/Nm³ im Pelletkessel mehr als doppelt so hoch (vgl. Abschnitt 5.3.1). Das Niveau von NO_x -Emissionen ist häufig kesselspezifisch und u. a. abhängig vom Design der Brennkammer und der Luftsteuerung [63] [86].

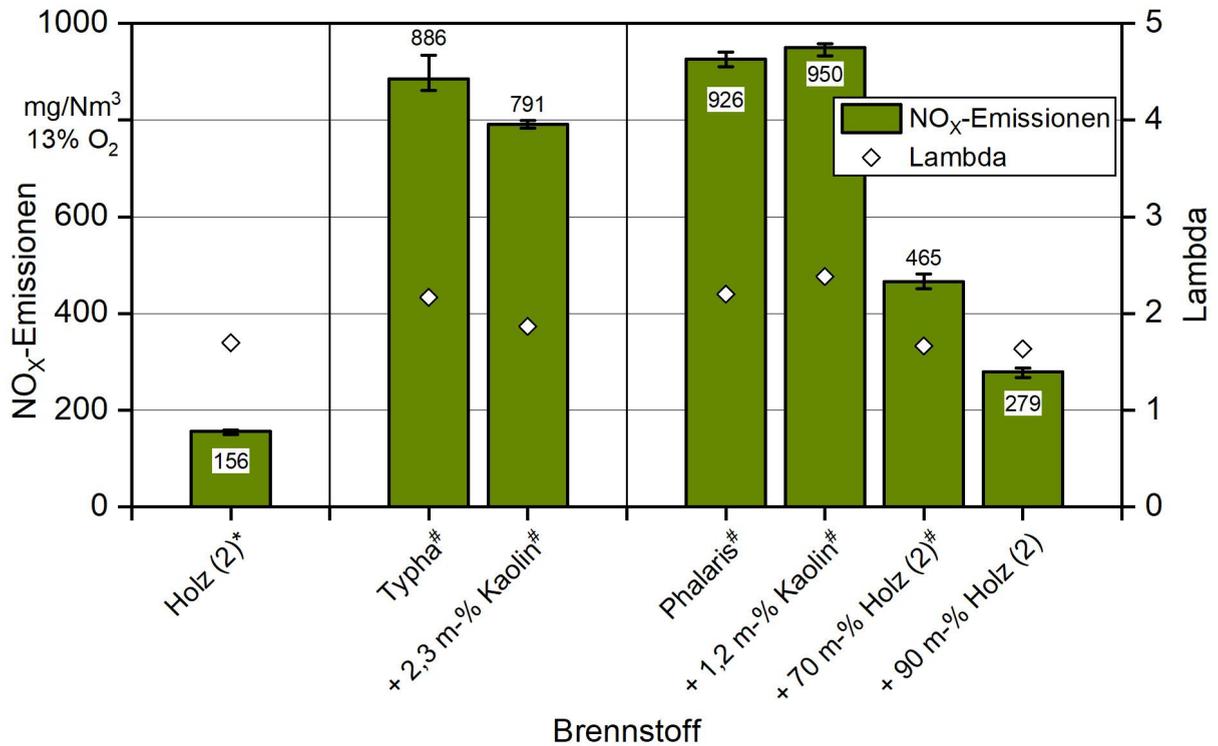


Abbildung 30: Mittlere NO_x-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; n = 5; Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

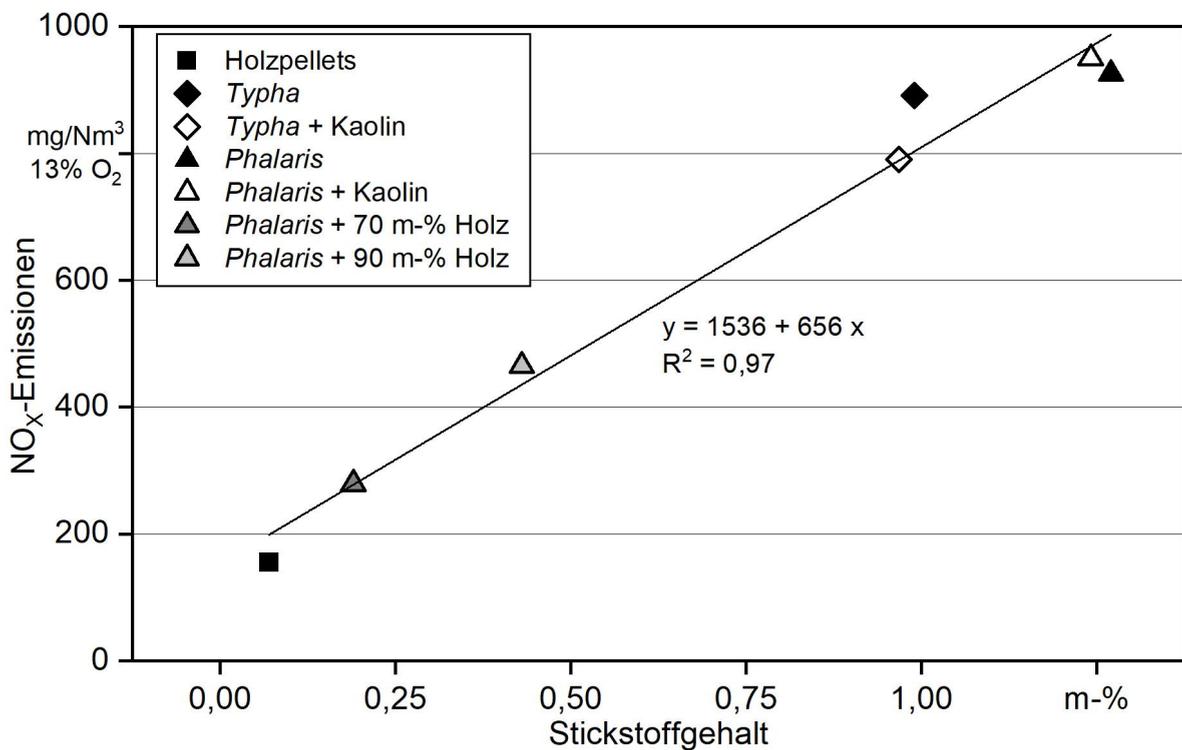


Abbildung 31: Mittlere NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Paludipellets in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2) im Verhältnis zum Stickstoffgehalt der Brennstoffe

Vor allem eine Mischung von *Phalaris arundinacea* mit Holzpellets führte zu einer signifikanten Reduzierung der NO_x-Emissionen von 50 % (bei 70 m-% Holz) bzw. 70 % (bei 90 m-% Holz, jeweils $p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test). Zumindest der Typenprüfungs-Grenzwert der 1. BImSchV (500 mg/Nm³, Brennstoffe Nr. 8 und 13) konnte dadurch eingehalten werden [12]. Wie bereits bei Kessel 1 waren die NO_x-Emissionen direkt auf den Stickstoffgehalt im Brennstoff zurückzuführen. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,97$ war der üblicherweise lineare Zusammenhang zwischen Brennstoffstickstoff und NO_x für Kessel 2 besonders deutlich ausgeprägt (Abbildung 31).

Die HCl-Emissionen von Kessel 2 lagen für die Paludipellets zwischen 59 und 122 mg/Nm³ (Abbildung 32) und damit auf einem vergleichbaren Niveau wie bei Kessel 1. Eine Additivierung von *Typha ssp.* mit Kaolin führte auch in dem verwendeten Pelletkessel zu einer signifikanten Erhöhung der Emissionen ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test). Dies lässt sich auf die Bindungseffekte des Additivs während der Verbrennung zurückführen [74]. Im Gegensatz zu Kessel 1 waren die HCl-Emissionen der additivierten *Typha-ssp.*-Pellets sogar nahezu verdoppelt. Ein Effekt des Additivs konnte für *Phalaris arundinacea* in Kessel 2 nicht nachgewiesen werden. Allerdings nahmen die Emissionen durch Mischung der Pellets mit Holz signifikant ab ($p \leq 0,05$). Dies lässt sich auf die insgesamt niedrigeren Cl-Gehalte im Referenzbrennstoff und dadurch auch in den Paludi-Holz-brennstoff-Mischungen zurückführen.

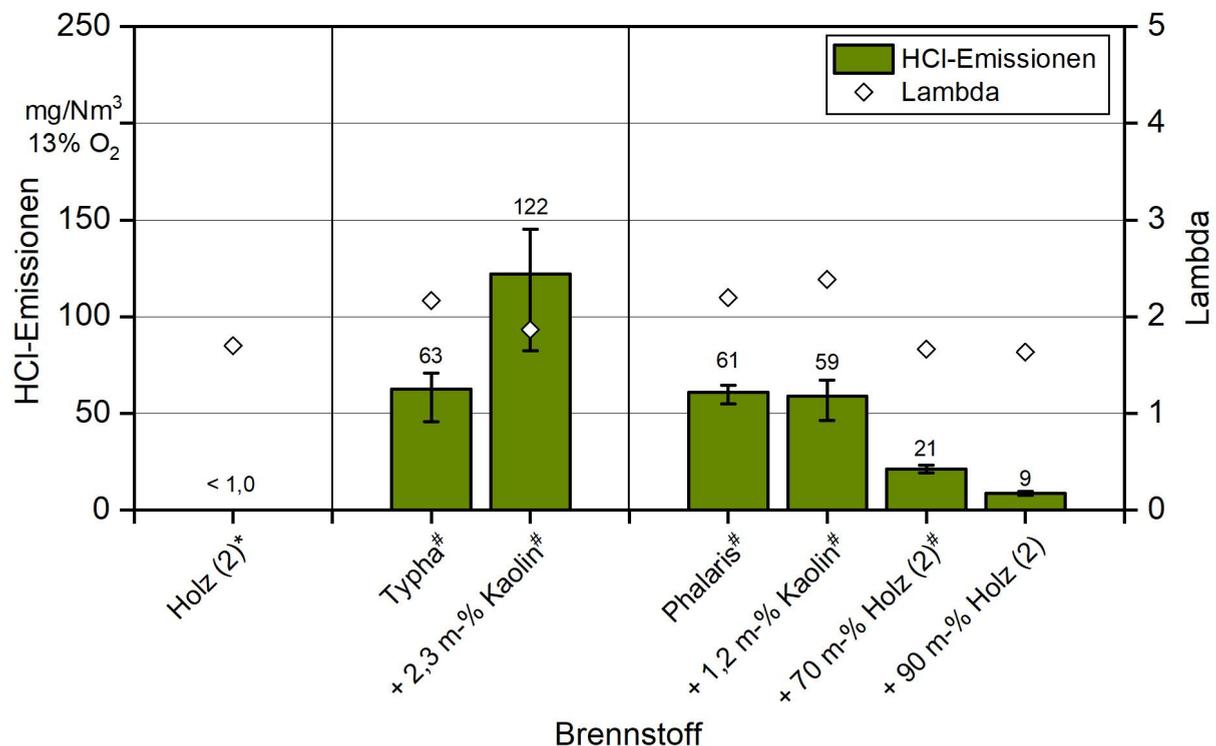


Abbildung 32: Mittlere HCl-Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; $n = 5$, Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Die SO_x -Emissionen der Paludipellets lagen bei Kessel 2 zwischen 137 und 236 mg/Nm^3 (Abbildung 33). Analog zu den HCl-Emissionen befanden sie sich auf dem Niveau von Kessel 1. Ein erwarteter Effekt des Additivs konnte auch für die Versuche in Kessel 2 nicht nachgewiesen werden. Allerdings führte eine Mischung von *Phalaris-arundinacea*-Pellets mit Holz zu einer signifikanten Reduzierung der SO_x -Emissionen um 70 bis 89 % ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl SO_x als auch HCl maßgeblich vom Schwefel- und vom Chlorgehalt im Brennstoff abhängig sind [63] und dass vor allem eine Reduzierung dieser Gehalte zu einem positiven Effekt auf das Emissionsverhalten der Anlagen führt. Im Fall von HCl bietet sich somit an, dass die Ernte der Brennstoffe erst im Winter erfolgt (vgl. Abschnitt 4.2.1).

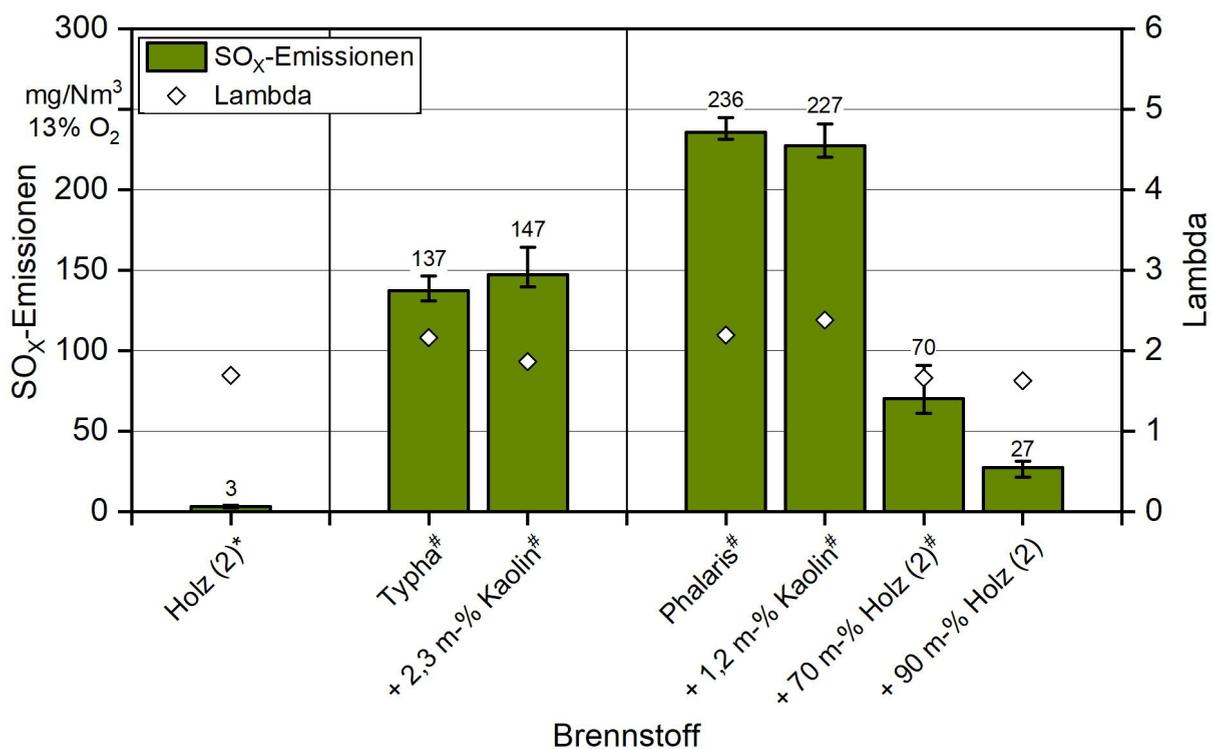


Abbildung 33: Mittlere SO_x -Emissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; $n = 5$, Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Die Emissionen an Gesamtstaub hielten beim Einsatz von Holzpellets, aber auch bei der Verbrennung von *Phalaris arundinacea* die Vorgaben der Stufe 2 nach 1. BImSchV ein (Abbildung 34). Eine Überschreitung des Grenzwerts wurde bei Kessel 2 mit *Typha ssp.* gemessen, wenn auch mit 60 und 91 mg/Nm^3 auf einem niedrigeren Niveau als bei Kessel 1. Der Einfluss aerosolbildender Elemente auf die Gesamtstaubemissionen war auch bei den Feuerungsversuchen mit dem 15-kW-Pelletkessel mit einem $R^2 = 30$ insgesamt nur gering ausgeprägt. Analog führte auch die Additivierung mit Kaolin zwar zu einer signifikanten, allerdings nicht ausreichenden Reduzierung der Gesamtstaubemissionen von *Typha ssp.* um 35 % ($p \leq 0,05$, ANOVA, Tukey-Test). Der Effekt des Additivs war bei der

Verbrennung von *Typha ssp.* in Kessel 2 stärker ausgeprägt als in Kessel 1, vermutlich aufgrund der insgesamt niedrigeren absoluten Staubemissionen. Möglicherweise könnten höhere Additivzugaben zum Brennstoff die Staubemissionen weiter reduzieren (vgl. auch Anhang 0). Die Ergebnisse beider Kessel deuten aber darauf hin, dass es sich im Fall von *Typha ssp.* auch um nicht mineralische Staubanteile, beispielsweise aufgrund von Rußbildung, handelt.

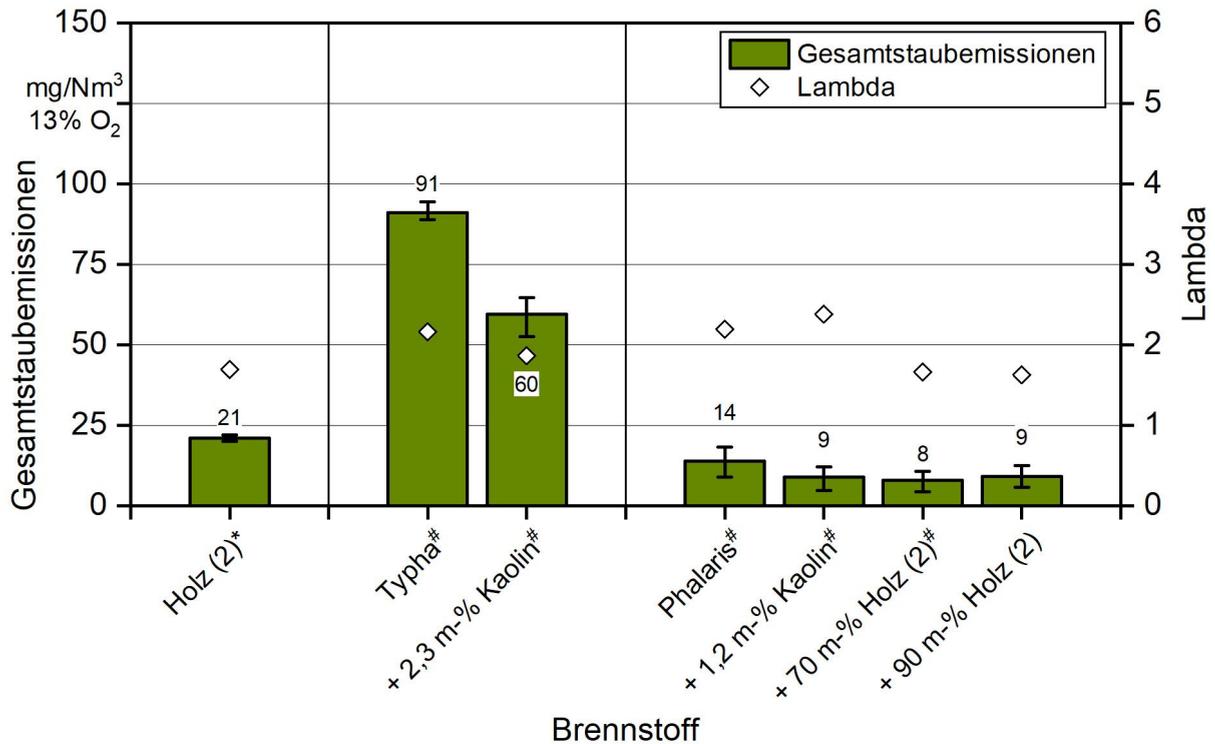


Abbildung 34: Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung pelletierter Paludibrennstoffe in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2; $n = 5$, Fehlerbalken geben Min.- und Max.-Werte wieder; * = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

Bei keinem der Feuerungsversuche mit Kessel 2, bei denen Paludipellets (mit oder ohne Additiv) verbrannt wurden, konnte ein stabiler Kesselbetrieb erreicht werden. Folglich lag die mittlere Wärmeleistung teils deutlich unter 15 kW (Abbildung 35). Dabei kam es unabhängig vom Brennstoff regelmäßig zu einem Einbruch der Leistung bei fortlaufendem Betrieb (vgl. auch Abbildung 28). In der Folge musste regelmäßig die automatische Kesselreinigung manuell zwischen den Messungen gestartet werden. Erst durch Mischung der *Phalaris-arundinacea*-Pellets mit Holz im Mischungsverhältnis 30 : 70 konnte die notwendige Anzahl automatisch ausgelöster Kesselreinigungen auf $n = 1$ während der Versuchsdauer reduziert werden. Für das Mischungsverhältnis 10 : 90 war ein stationärer Betrieb über den gesamten Versuchstag möglich.

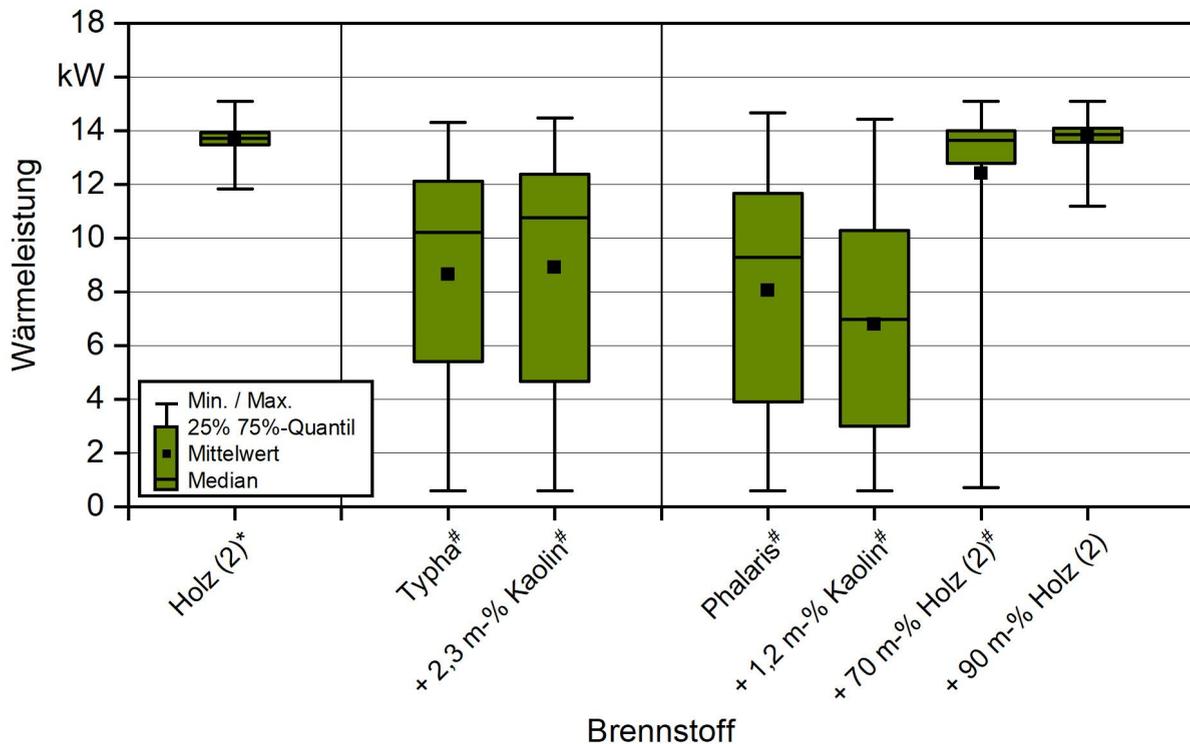


Abbildung 35: Mittlere Wärmeleistung des 15-kW-Pelletkessels (Kessel 2) beim Einsatz pelletierter Brennstoffe aus Paludikulturen und Holz nach dem ersten Erreichen von 80 % der Nennlast (* = Kessel ist auf diesen Brennstoff zugelassen; # = kein stationärer Nennlastbetrieb möglich)

5.4 Bewertung der Schlackebildungsneigung

Die Schlackebildungsneigung von Paludibrennstoffen wurde über mehrere Ansätze abgeschätzt und bewertet. Neben der Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens nach DIN EN ISO 21404 [36] und der Berechnung von Brennstoffindizes [91] wurde die PASSA-Methode angewendet [84]. Alle Ergebnisse wurden mit realen Kesselaschen verglichen, die während der Verbrennungsversuche in Kessel 1 und Kessel 2 anfielen.

5.4.1 Ascheschmelzverhalten

Das Ascheschmelzverhalten der Paludibrennstoffe und der Referenzbrennstoffe ist in Abbildung 36 dargestellt. Für die Bewertung der Verschlackungsneigung wird meistens die Ascheschmelztemperatur (DT = engl. „deformation temperature“ in °C) verwendet. DT ist nicht normativ nach DIN EN ISO 17225-6 begrenzt und muss lediglich angegeben werden [37]. Nach Vorgaben des ENplus-Zertifikats für Holzpellets soll die Ascheerweichungstemperatur für eine Pelletqualität A1 ≥ 1200 °C, für die Klassen A2 und B zumindest 1100 °C betragen [40]. Als Grund hierfür sind Temperaturen von ca. 1000 °C zu nennen, die häufig im Brennraum von Biomassefeuerungen auftreten können [63] und bei denen die Asche von Brennstoffen mit einer niedrigen DT aufschmelzen könnte. Folglich wären die Pellets aus Paludikulturen nach dieser Messmethode als eher unkritisch bezüglich ihres Ascheschmelzverhaltens zu bewerten, da DT in allen Fällen 1200 °C entsprach oder darüber lag

(Abbildung 36). Ein Effekt des Additivs auf die DT konnte in den hier dargestellten Messungen nicht nachgewiesen werden. Lediglich die Referenzpellets aus Weizenstroh wären demnach bezüglich DT als kritisch zu bewerten. Bei diesem Brennstoff kam es im „BioFlex!“-Projekt zu erheblicher Schlackebildung in dem verwendeten Biomassekessel (Kessel 1), was dort zum Abbruch der Messung führte [73].

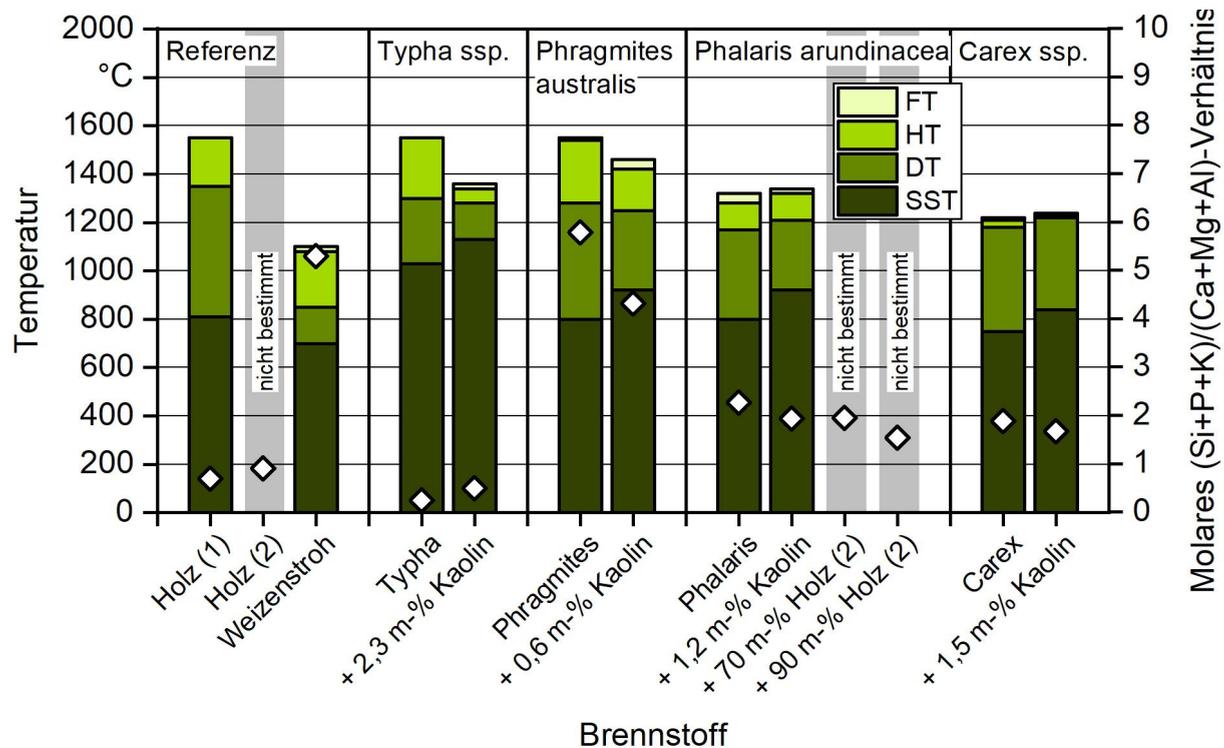


Abbildung 36: Ascheschmelzverhalten (Balken) und molares $(Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)$ -Verhältnis (Rauten) der Pelletbrennstoffe aus Paludikulturen und der verwendeten Referenzbrennstoffe; SST = Schrumpfungstemperatur (shrinkage starting temperature), DT = Erweichungstemperatur (deformation temperature), HT = Halbkugeltemperatur (hemispherical temperature), FT = Fließtemperatur (flow temperature) ($n = 1$)

Generell wird in jüngster Zeit die Eignung der Ascheschmelztemperatur als Indikator für die Schlackebildungsneigung von biogenen Festbrennstoffen kritisch infrage gestellt [46] [84] [85], da die mittels Ascheschmelzmikroskops gemessenen Werte an vorveraschten Proben ermittelt und so die tatsächlichen Vorgänge in den Brennkammern der Kessel oft nur unzureichend abgebildet werden [70] [74]. Neuartige Ansätze über Brennstoffindizes oder Prüfmethode, die direkt am Brennstoff ohne separate Vorveraschung messen (beispielsweise die PASSA-Methode), werden häufig als praxistauglicher bewertet [67] [74] [84] [91]. Auch aus den hier dargestellten Messdaten konnte kein Zusammenhang zwischen den Ascheerweichungs- und Ascheschmelztemperaturen nach DIN EN ISO 21404 und dem molaren $(Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)$ -Verhältnis hergestellt werden (Abbildung 36). Ein mangelnder Zusammenhang dieser Parameter wurde bereits von KUCHLER et al. (2020) [67] in einer Studie an mit Bodenmaterial kontaminierten Holzpellets beschrieben.

Dabei war der Brennstoffindex deutlich besserer als Indikator für die real bei Feuerungsversuchen messbare Schlacke geeignet als die DT. Die genauesten Werte zur direkten Beschreibung der Verschlackungsneigung in realen Feuerungen bildete bei KUCHLER et al. (2020) jedoch die PASSA-Methode ab.

5.4.2 PASSA-Methode

Alle Paludipellets wurden mithilfe der (überarbeiteten) PASSA-Methode (*Pellet Ash and Slag Sieving Assessment*, siehe Abschnitt 4.3.2) analysiert. Die gravimetrische Auswertung als Slag-Index für Partikel > 2 mm und > 1 mm (jeweils inkl. möglicher Anbackungen am Tiegel) ist in Abbildung 37 dargestellt.

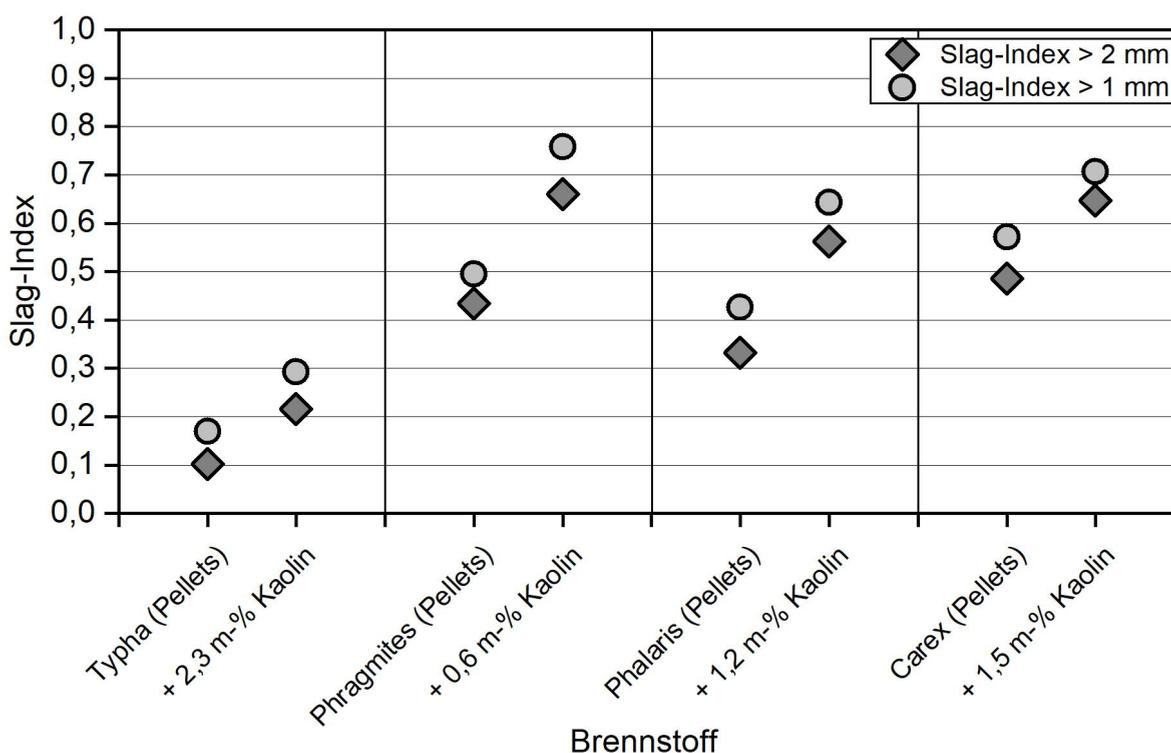


Abbildung 37: Slag-Index nach PASSA-Methode für Partikel > 2 mm und > 1 mm (Referenzbrennstoffe nicht dargestellt, da die Messung an diesen noch nach dem alten Temperaturprofil mit 6 h bei 1000 °C erfolgte [74])

Ausgehend von den Ergebnissen der PASSA-Methode käme es im Fall der Paludibrennstoffe vor allem bei *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* zu einer erhöhten Schlackebildung, wohingegen die Werte für *Typha ssp.* insgesamt sehr niedrig waren. Ein direkter Vergleich mit den Referenzbrennstoffen aus dem ERA-NET-Projekt „BioFlex!“ ist nur bedingt möglich, da für diese ein anderes Temperaturprofil (mit 6 h statt 0,5 h bei 1000 °C) angewendet wurde [74]. In der Folge wird der Slag-Index-Wert bei diesen beiden Referenzbrennstoffen im Vergleich zu den Paludibrennstoffen vermutlich über-

schätzt. Holzpellets aus dem Projekt „FuturePelletSpec“, gemessen nach der überarbeiteten PASSA-Methode, zeigten allerdings Werte auf demselben Niveau wie die Pellets aus *Typha ssp.* auf und lagen bei einem Slag-Index (> 2 mm) häufig unter 0,2 [75]. Die Ergebnisse deuten somit an, dass es im Fall von *Typha ssp.* zu keiner nennenswerten Schlackebildung im Vergleich zur Nutzung von Holzpellets kommt, wohingegen die anderen drei Paludikulturen zu einer erhöhten Schlackebildung neigen könnten.

Interessanterweise führte die Additivierung der Pellets laut PASSA-Methode in allen Fällen zu einer Erhöhung des Slag-Index. Ausgehend vom molaren $(\text{Si} + \text{P} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al})$ -Verhältnis sollte es dagegen durch die Additivierung zu weniger Schlackebildung kommen (Abbildung 47). Für die abschließende Bewertung soll daher im Folgenden eine direkte Gegenüberstellung der beiden Indizes mit den tatsächlich im Feuerungsversuch anfallenden Kesselaschen aus Paludikulturen erfolgen.

5.4.3 Kesselaschen (Kessel 1)

Die gesamten Massen der bei den Verbrennungsversuchen im Kessel 1 angefallenen Aschen sind in Abbildung 38 dargestellt. Der prozentuale Massenanteil der einzelnen Aschefraktionen an der Gesamtmasse ist in Abbildung 39 wiedergegeben. Als „Schlacke“ werden Partikel > 8 mm bezeichnet, die mittels zweidimensional schwingenden Plansiebverfahrens abgetrennt wurden. Alle anderen Aschefraktionen wurden mit einem dreidimensional bewegten Vibrationssiebverfahren bestimmt. Abweichend davon wurde im Fall der Referenzbrennstoffe die Fraktion „Schlacke“ noch mit einem Lochdurchmesser $> 3,15$ mm bestimmt.

Je nach Material und Dauer des Feuerungsversuchs schwankte die Aschemenge zwischen 202 und 5143 g. Wie erwartet lag die Gesamtmasse an Asche bei der Verbrennung von Holzpellets mit einem Aschegehalt von 0,3 m-% (wf) am niedrigsten. Im Fall der Paludibrennstoffe hing die Aschemenge dagegen nicht ausschließlich vom Aschegehalt der Brennstoffe, sondern auch von der insgesamten Länge des jeweiligen Feuerungsversuchs ab. In jeder Probe wurden Partikel > 2 mm sowie Schlackepartikel > 8 mm bzw. $> 3,15$ mm festgestellt.

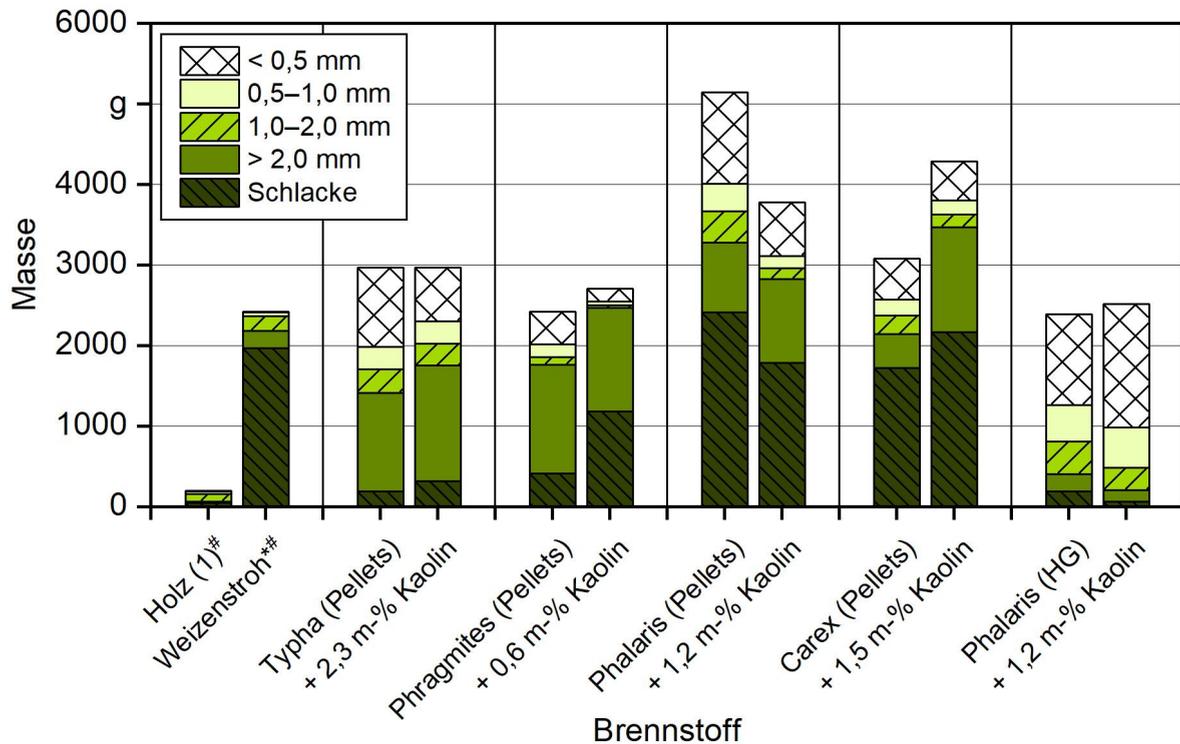


Abbildung 38: Masse an Kesselasche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und der Referenzbrennstoffe in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1), aufgeteilt in unterschiedliche Aschefraktionen (HG = Häckselgut, * = abgebrochener Feuerungsversuch aufgrund starker Schlackebildung; # = Schlacke bestimmt als Partikel > 3,15 mm)

Von den beiden Referenzbrennstoffen führte hauptsächlich Weizenstroh zu einer starken Schlackebildung. Bereits eine optische Analyse beider Aschen verdeutlichte die extremen Unterschiede zwischen Holz und Weizenstroh (Abbildung 40). So bestand die Asche von Holzpellets größtenteils aus Partikeln, die die maximale Größe der einzelnen Pellets nicht überschritten, wohingegen die Asche aus Weizenstrohpellets fast ausschließlich aus sehr großen Aschebrocken bestand. Größere Partikel > 3,15 mm machten bei Weizenstrohpellets ca. 80 m-% der Gesamtmasse aus. Für Holzpellets lag dieser Wert unter 20 m-% (Abbildung 39). Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche entsprechen damit den Erwartungen, die sich für die Referenzbrennstoffe aus der Betrachtung des Ascheschmelzverhaltens, des molaren $(Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)$ -Verhältnisses und der PASSA-Methode ergaben. Alle drei Prüfmethode deuten auf erhebliche Verschlackungsprobleme bei der Verbrennung von Weizenstrohpellets hin, nicht jedoch bei Holzpellets. Verantwortlich hierfür ist vor allem die chemische Zusammensetzung der Brennstoffe [63], wobei vor allem Weizenstroh sehr hohe Gehalte an Si, K und P aufwies. Eine Additivierung von Weizenstroh mit 3,5 m-% Kaolin im ERA-NET-Projekt „Bioflex!“ führte zu einer deutlichen Verbesserung der Verschlackungsneigung. Auch eine Beimischung von Holzpellets verbesserte das Verbrennungsverhalten. Beide Methoden (Additivierung, Mischung) führten demnach zu einer wesentlichen Verbesserung und ermöglichten überhaupt erst den Betrieb von Kessel 1 mit Weizenstrohpellets [74].

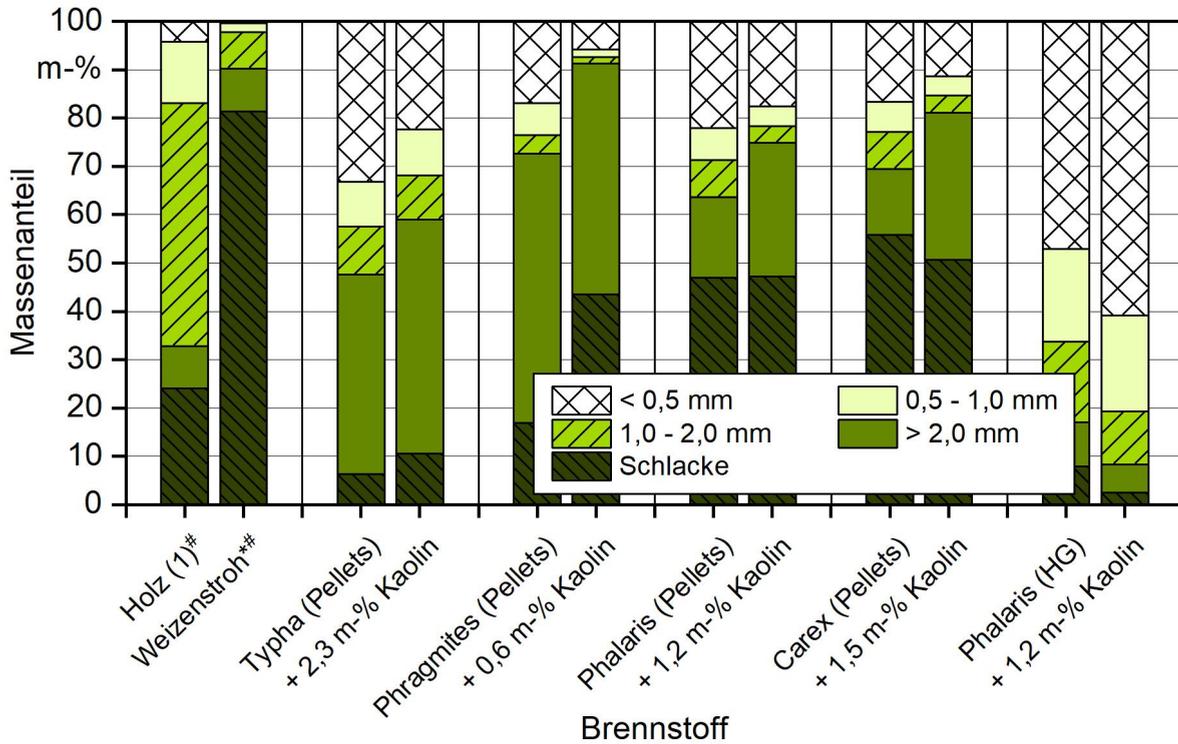


Abbildung 39: Prozentualer Massenanteil einzelner Aschefraktionen an der Gesamtmasse an Asche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und der Referenzbrennstoffe in einer 30-kW-Treppenrostfeuerung (Kessel 1) (HG = Häckselgut, * = abgebrochener Versuch aufgrund starker Schlackebildung; # = Schlacke bestimmt als Partikel > 3,15 mm)

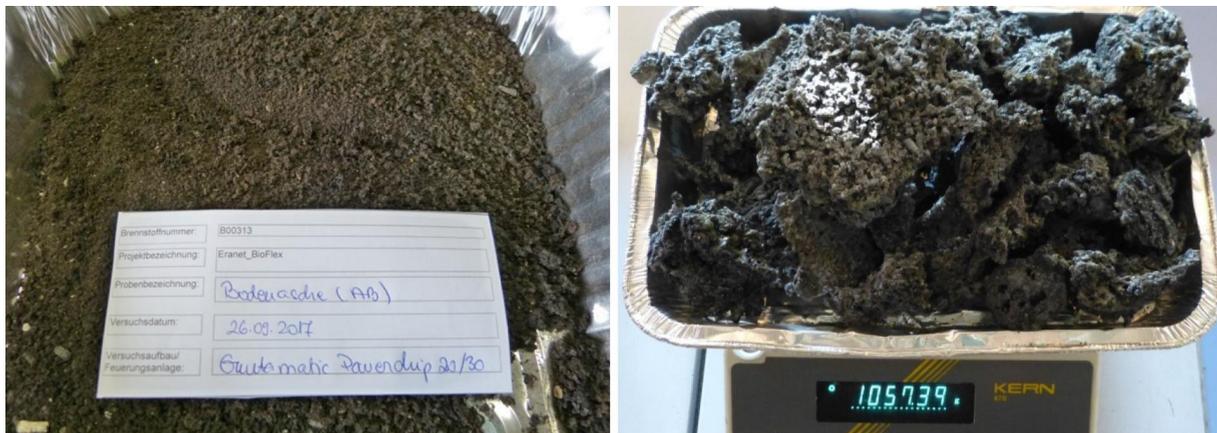


Abbildung 40: Rostaschen der Referenzbrennstoffe Holzpellets (links) und Weizenstrohpellets (rechts) nach einem Verbrennungsversuch in Kessel 1

Die Berechnung des molaren $(Si + P + K)/(Ca + Mg + Al)$ -Verhältnisses und die Ergebnisse der PASSA-Methode lassen auch für die Paludibrennstoffe starke Probleme mit Schlackebildung erwarten. So deutet v. a. der Brennstoffindex von *Phragmites australis*

auf eine starke Verschlackung der Pellets hin (siehe Abschnitt 5.4.1). Ebenso war der Index für *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* erhöht. Während der tatsächlichen Feuerungsversuche mit Paludipellets zeigte sich häufig ein sehr hohes Glutbett im Kessel, wobei viele der Brennstoffe zum sichtbaren Aufschmelzen der Asche auf dem Treppenrost neigten (Abbildung 41, links). Während im noch heißen Zustand des Kessels ein Abtransport der teils verflüssigten Asche in den Aschekasten noch kein Problem darstellte, verhärtete sich diese Masse beim Abkühlen zu großen Klumpen, die dann vor jedem Neustart manuell entfernt werden mussten. Ohne diesen Eingriff wäre ein Neustart nicht möglich gewesen (Abbildung 41, rechts). Folglich sind für einen langfristigen Kesselbetrieb geeignete, v. a. technische Lösungen notwendig, beispielsweise ein angepasstes Rostdesign, eine Verringerung der Rosttemperatur bei der Verbrennung (durch Kühlung), eine automatische Kesselreinigung im noch heißen Zustand oder eine Anpassung im Brennstoffdesign (Additivierung, Mischung) [63] [74].



Abbildung 41: Teilweise verschlackte Pellets aus *Phalaris arundinacea* auf dem Treppenrost von Kessel 1 während der Verbrennung (links) und nach der Abkühlung (rechts)

Die Gesamtaschen und die als „Schlacke“ abgeseibten Aschefraktionen > 8 mm sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt. Die optische Bewertung bestätigt die Vermutungen, die sich aus den bisherigen Analysen ergaben. Bei der Verwendung von *Typha ssp.* als Brennstoff ist kaum mit Problemen hinsichtlich Verschlackung zu rechnen. Das molare $(\text{Si} + \text{P} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al})$ -Verhältnis von *Typha ssp.* lag mit 0,15 bis 0,42 sehr niedrig. Ebenso deutete die PASSA-Methode für *Typha ssp.* auf nur geringe Probleme mit diesem Brennstoff hin. Der prozentuale Anteil an Aschepartikeln > 8 mm war bei der tatsächlichen Verbrennung von *Typha ssp.* in Kessel 1 im Vergleich zu den übrigen Paludibrennstoffen ebenso am geringsten.

Als deutlich schwieriger für die Verbrennung sind die Brennstoffe aus *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* zu bewerten. In allen Fällen kam es zu einer starken Verschlackung. Der Anteil an Partikeln > 8 mm machte dabei i. d. R. mehr als 40 m-% der Gesamtasche aus (Abbildung 39). Auch eine optische Analyse der Aschen zeigte die Probleme mit großen Schlackebrocken (Abbildung 43).

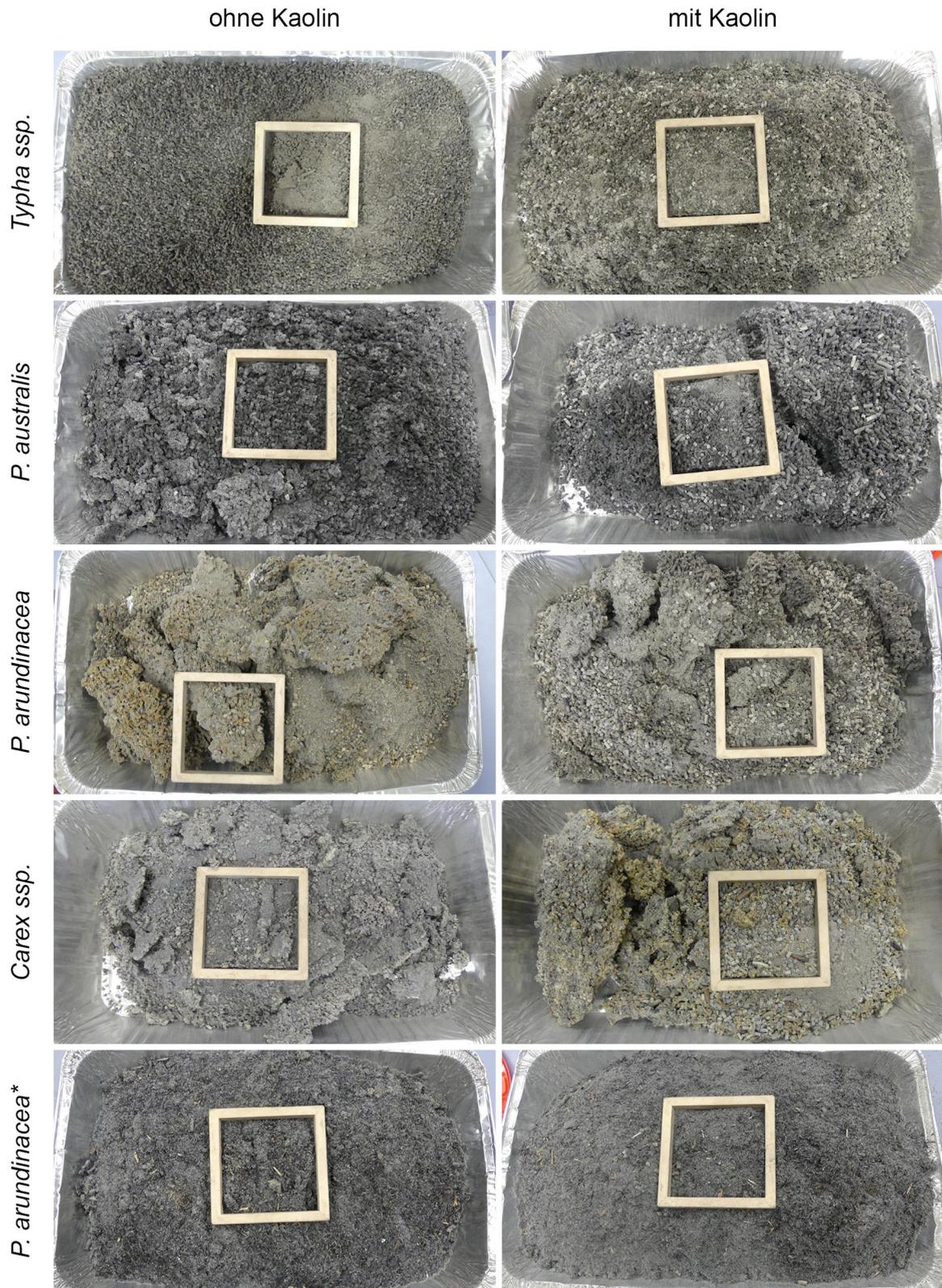


Abbildung 42: Gesamtaschen aus der Verbrennung von Paludipellets mit und ohne Kaolin (* = gemahlenes Häckselgut); Holzrahmen: 100 × 100 mm

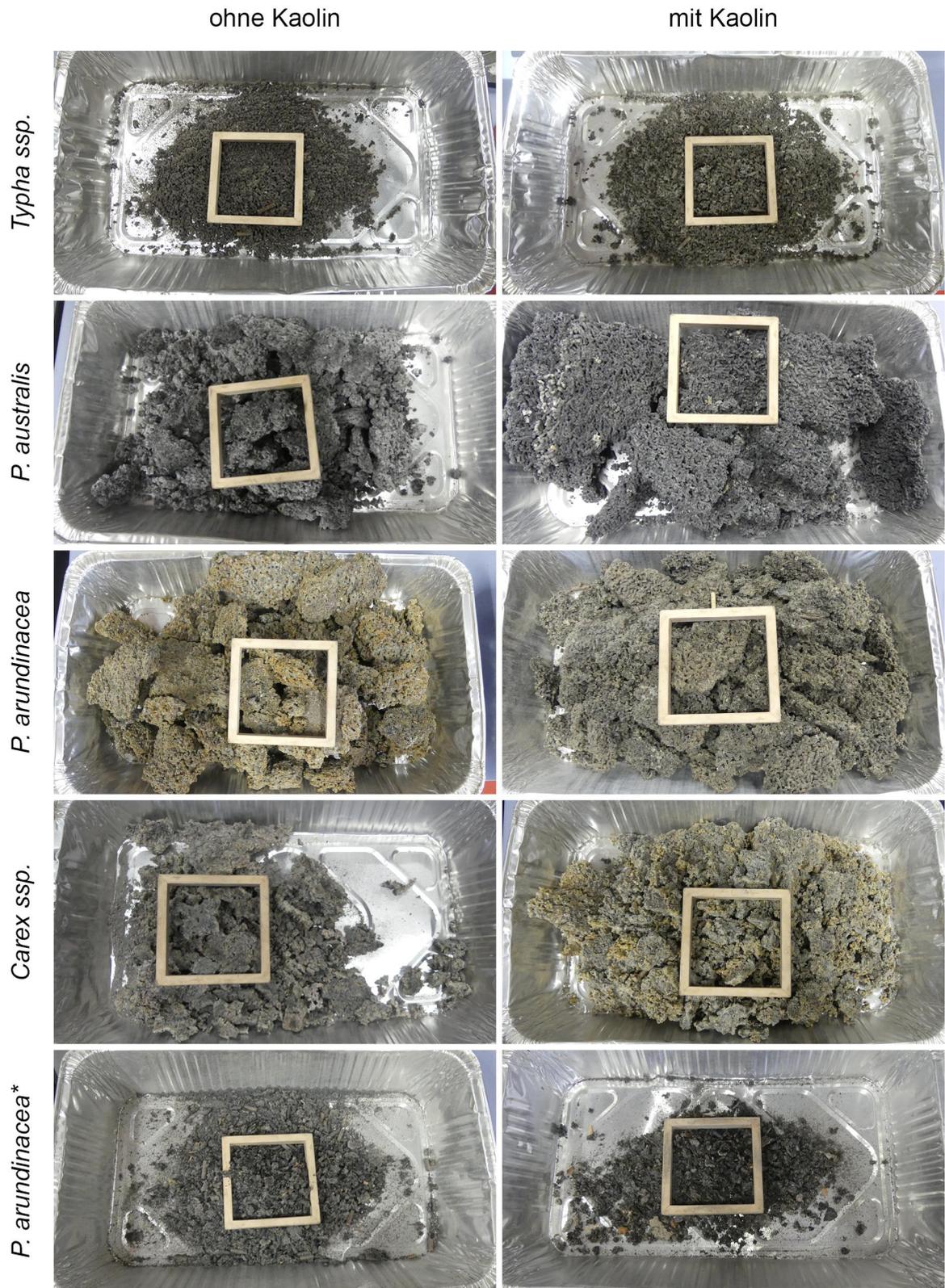


Abbildung 43: Abgeseiebte Aschen (nur Fraktion > 8 mm) aus der Verbrennung von Paludipellets mit und ohne Kaolin (* = gemahlenes Häckselgut); Holzrahmen: 100 × 100 mm

Eine Additivierung mit Kaolin führte bei den hier angewendeten Additivierungsstufen mit keinem der Brennstoffe zu einer Verbesserung der Verschlackung. Vielmehr erhöhte sich der Anteil an Partikeln > 2 mm (siehe Abbildung 39), wobei solche Partikel aber eine relativ instabile „fluffige“ Konsistenz mit wenig mechanischer Festigkeit aufwiesen. Ähnliche Effekte wurden von MACK et al. [73] bei der Verbrennung mit Kaolin additiverter Pellets aus Sonnenblumenspelzen gemessen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass Kaolin als Additiv zur Vermeidung schlackebedingter Störungen bei Paludibrennstoffen möglicherweise nicht die optimale Wahl ist und andere Additive wie MgO, CaO, CaCO₃ oder Kalzit besser geeignet sein könnten [42] [92] [103].

Ein langfristiger Einsatz von *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* als Brennstoff in der hier verwendeten Kleinfeuerungsanlage ist demnach mit hohen Risiken bezüglich der Kesselverfügbarkeit, einem hohen Reinigungs- und Wartungsaufwand und möglichen mechanischen Schäden an der Anlage verbunden. Eine effiziente Nutzung erscheint in dieser Anlage unmöglich.

Interessanterweise kam es bei der Verbrennung gemahlener Häckselguts aus *Phalaris arundinacea* zu deutlich weniger Schlackebildung (Abbildung 43). Die Partikelgrößenverteilung der Asche war dabei sogar erheblich besser als bei *Typha ssp.* mit einem Anteil an Schlackepartikeln > 8 mm von weniger als 8 m-% (Abbildung 39). Somit könnte die Verwendung der Brennstoffe in Form gemahlener Häckselguts eine Alternative für den Einsatz von Paludibrennstoffen in der hier verwendeten Feuerung sein. Zu beachten sind dabei allerdings die hohen Werte für die Gesamtstaubemissionen (vgl. Abschnitt 5.3.1), die vermutlich aufgrund unverbrannten Brennstoffs entstanden, der über den Schornsteinzug mitgerissen wurde. Neben einer besonders wirkungsvollen Abgasentstaubung wäre eine technische Anpassung der Brennstoffzuführung von Kessel 1 auf gemahlenes Material erforderlich, wenn ein Einsatz von Paludibrennstoffen in dieser Aufbereitungsform erfolgen sollte.

5.4.4 Kesselaschen (Kessel 2)

Die Ergebnisse der Ascheuntersuchung von Kessel 2 sind als Gesamtmasse in Abbildung 44 und als prozentualer Massenanteil in Abbildung 45 wiedergegeben. Bis auf die additivierten Pellets aus *Typha ssp.* wurde die Schlacke als Partikel > 3,15 mm mittels Horizontalschwingsiebverfahren bestimmt. Im Fall der additivierten *Typha-ssp.*-Pellets wurde keine Schlacke separat bestimmt.

Die Gesamtmasse an Asche war in Kessel 2 mit maximal 890 g aufgrund der geringeren Leistung deutlich niedriger als in Kessel 1. Der Anteil an Aschepartikel > 2 mm machte dabei 34 bis 63 m-% aus.

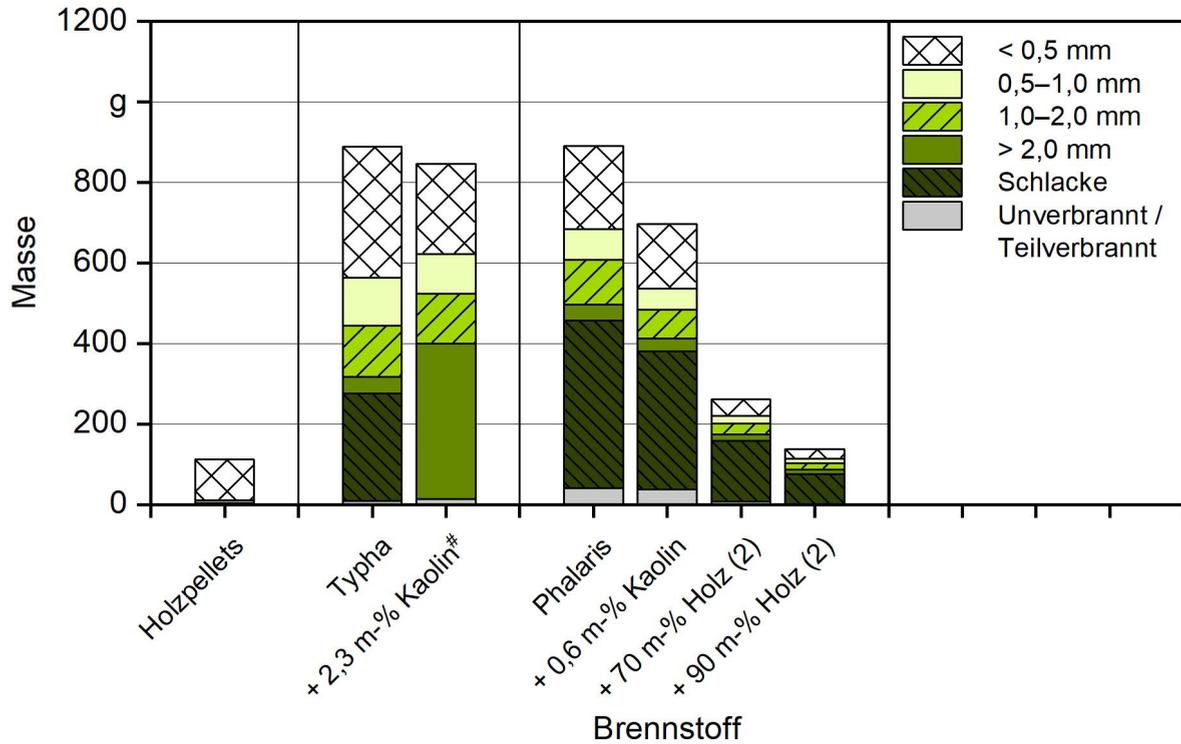


Abbildung 44: Masse an Kesselasche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und des Referenzbrennstoffs in einem 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2), aufgeteilt in unterschiedliche Aschefractionen (# = keine Schlackebestimmung bei Typha mit Kaolin)

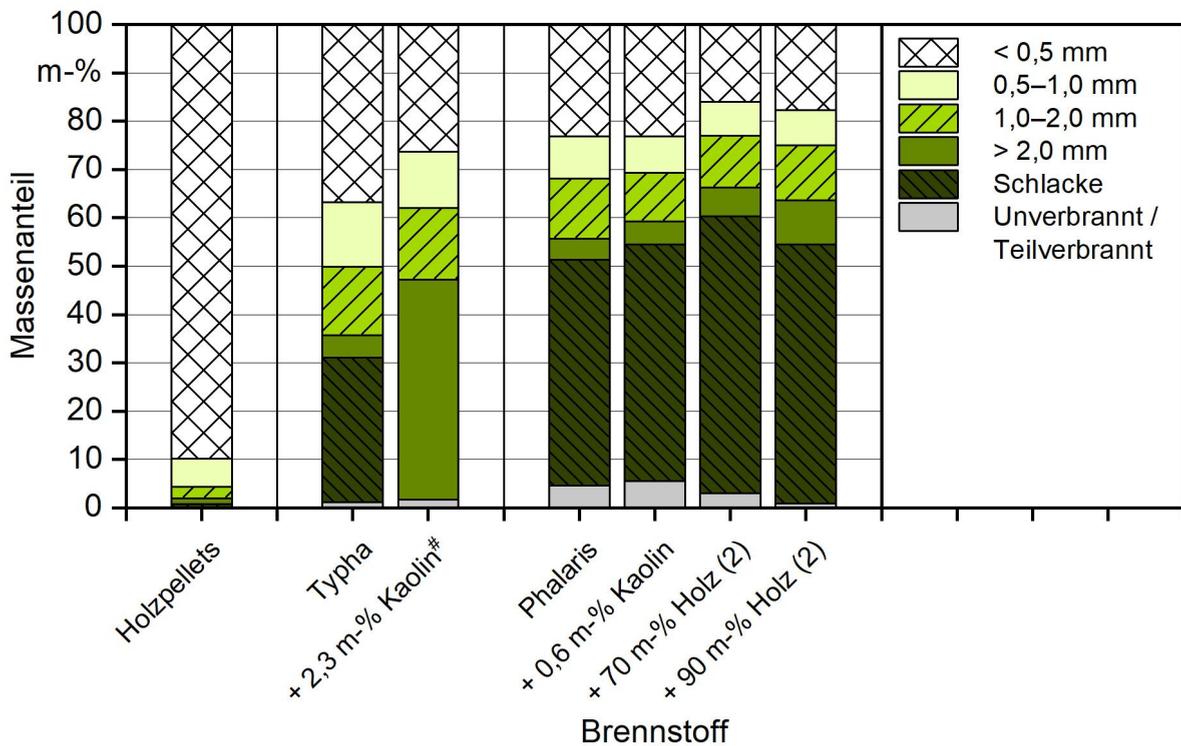


Abbildung 45: Prozentualer Massenanteil einzelner Aschefractionen an der Gesamtmasse an Asche bei der Verbrennung von Paludibrennstoffen und des Referenzbrennstoffs in einem 15-kW-Pelletkessel (# = keine Schlackebestimmung bei Typha mit Kaolin)

Analog zu Kessel 1 führte das Additiv im Fall von *Typha ssp.* zu einem erhöhten Anteil an Partikeln > 2 mm. Die Analyse der größten Schlackepartikel zeigt allerdings keine Unterschiede zwischen den Varianten (siehe weiter unten).

Im Fall von *Phalaris arundinacea* kam es im Vergleich zu *Typha ssp.* zu einer deutlich größeren Schlackebildung. Weder das eingesetzte Additiv noch die Mischung der Pellets mit Holz führte zu einer Verbesserung der Schlackebildung bezogen auf die prozentuale Aufteilung der einzelnen Fraktionen. Allerdings nahm die Gesamtmasse an Asche in der Mischung mit Holzpellets ab, wodurch der Kessel im Betrieb entlastet werden könnte.

Im Gegensatz zu den Messungen mit Kessel 1 wurden bei den Versuchen mit Kessel 2 zusätzlich die Länge, die Breite und die Höhe der zwei jeweils größten Schlackepartikel manuell mithilfe einer Schieblehre vermessen. Aus den Ergebnissen lässt sich das Volumen der beiden größten Aschepartikel grob abschätzen (Tabelle 21).

Tabelle 21: *Volumen der zwei größten Schlackepartikel je Feuerungsversuch mit Paludibrennstoffen in Biomassekessel 2 in cm³*

Brennstoff	Partikel 1	Partikel 2
<i>Typha</i>	<1,0	< 1,0
<i>Typha</i> + 2,3 m-% Kaolin	2,0	1,5
<i>Phalaris</i>	66,0	26,1
<i>Phalaris</i> + 1,2 m-% Kaolin	45,0	30,2
<i>Phalaris</i> + 70 m-% Holz (2)	48,6	40,5
<i>Phalaris</i> + 90 m-% Holz (2)	36,0	20,2

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass bei der Verbrennung von *Typha ssp.* mit maximal 2,0 cm³ Volumen deutlich kleinere Aschepartikel anfielen als beispielsweise beim Einsatz von *Phalaris arundinacea*, wo die Partikelvolumina bis 66 cm³ groß ausfallen können. Hinsichtlich der Partikelgröße der Schlackebrocken lässt sich kein eindeutiger Trend bezüglich der Additivierung mit Kaolin oder der Mischung mit Holzpellets feststellen.



Abbildung 46: Schlackepartikel nach der Verbrennung von *Typha ssp.* auf dem Rost von Biomassekessel 2 (links) und Schlackebrocken aus *Phalaris arundinacea* aus demselben Kessel (rechts)

Eine optische Analyse der Schlackepartikel zeigt zudem, dass die Pellets aus *Typha ssp.* während der Verbrennung größtenteils ihre lose zylindrische Form behielten, wohingegen der Einsatz von *Phalaris arundinacea* zum Aufschmelzen und zur Agglomeration der Partikel führte (Abbildung 46). Folglich stellten die Aschepartikel aus *Typha ssp.* für das Austragsystem des Pelletkessels kein größeres Problem dar, wohingegen die Schlacke aus *Phalaris arundinacea* beim Abkühlen des Kessels und bei der Erhärtung der Partikel zu mechanischen Problemen führen könnte. Ähnliche Effekte wurde in früheren Versuchen am TFZ mit Pellets aus Gras und Weizenstroh beobachtet, wobei Graspellets (analog zu *Typha ssp.* reich an Ca und Karbonaten) eher ihre zylindrische Form behielten, während Weizenstroh zum starken Aufschmelzen der Aschepartikel neigte [74]. Die Gründe hierfür sind noch nicht abschließend geklärt, unterschiedliche Versinterungen der Brennstoffe aufgrund von Karbonatschmelzen könnten aber ursächlich sein [97].

5.4.5 Vergleich der Slag-Indizes

Ein Vergleich der aus den gravimetrischen Analysen der Kesselaschen und der PASSA-Methode berechneten Slag-Indizes (> 2 mm) ist in Abbildung 47 wiedergegeben. Auf einen Vergleich mit den Referenzbrennstoffen wurde hierbei bewusst verzichtet, da teilweise unterschiedliche Temperaturprofile für die PASSA-Methode verwendet wurden und frühere Ergebnisse des TFZ darauf hindeuten, dass für Brennstoffe mit niedrigen Aschegehalten die PASSA-Methode weiter angepasst werden müsste [75].

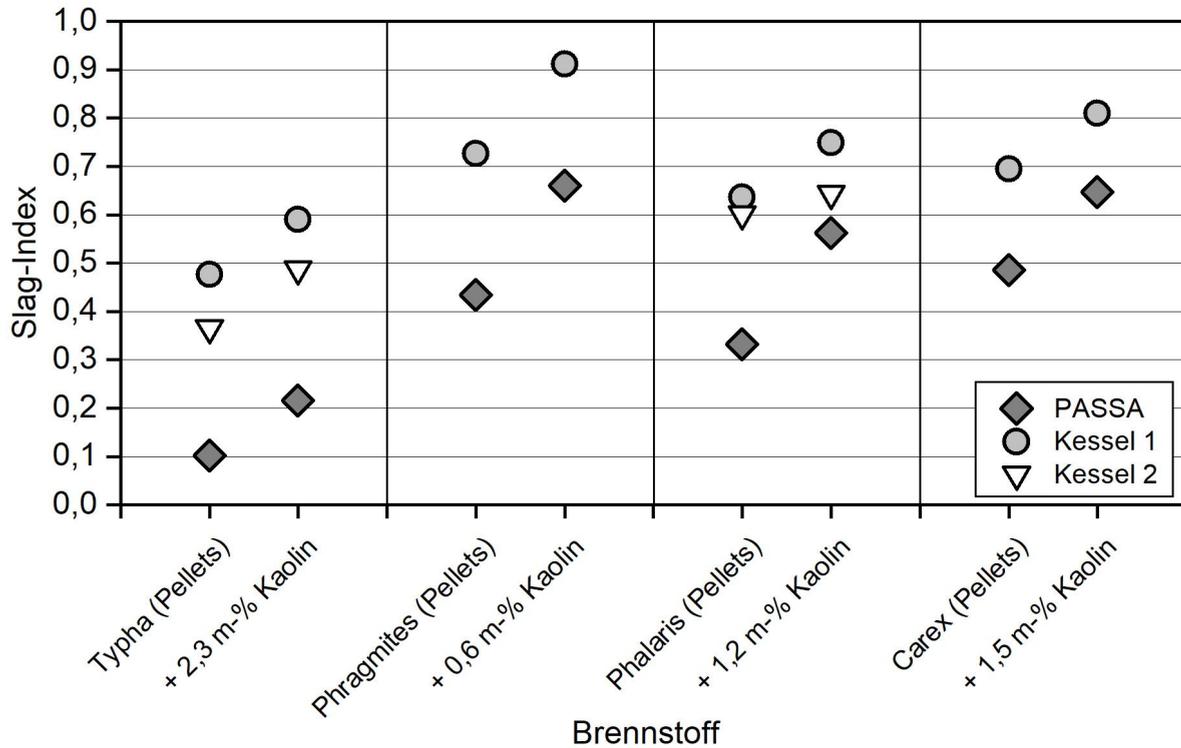


Abbildung 47: Vergleich der Slag-Indizes (d. h. Aschepartikel > 2 mm) der Kesselaschen mit der PASSA-Methode

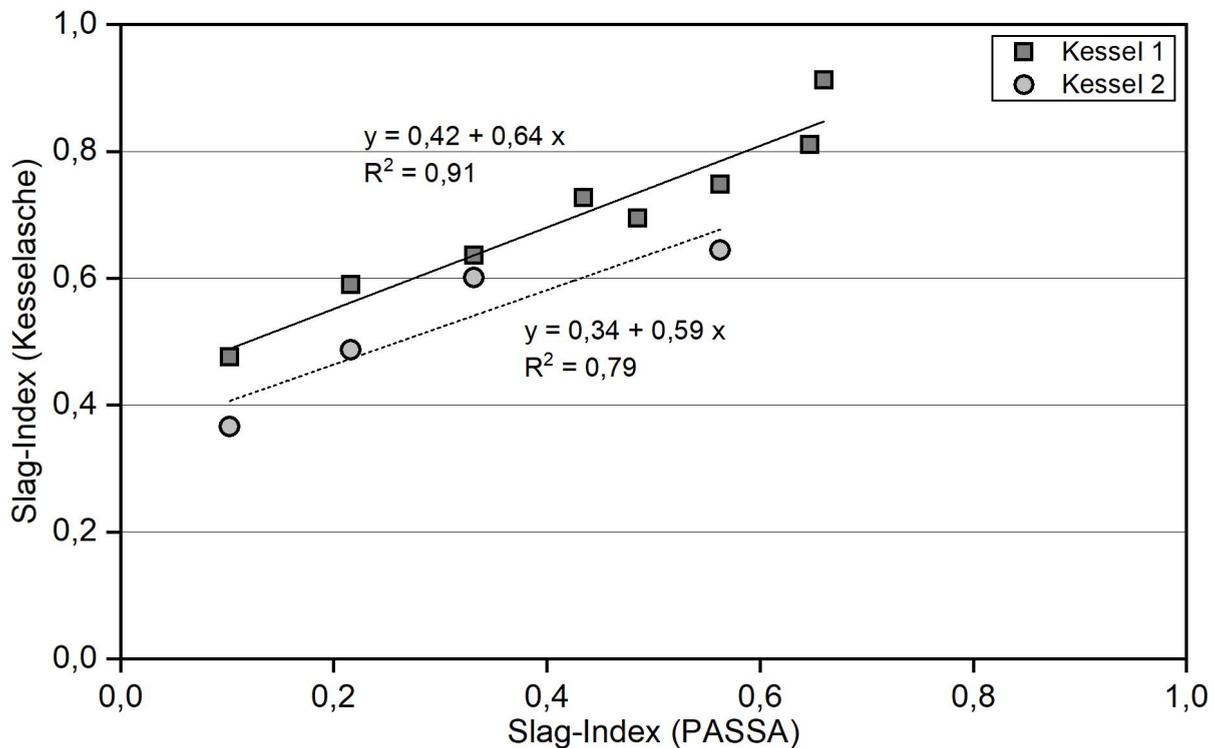


Abbildung 48: Lineare Regressionen zwischen den Slag-Indizes von Paludipellets, gemessen über die PASSA-Methode und die Aschen der beiden Biomassekessel

Analog zu den Ergebnissen des ERA-NET-Projekts „BioFlex!“ zeigt sich auch bei den hier erhobenen Daten eine gute Übereinstimmung der Slag-Indizes, die mit der PASSA-Methode gemessen wurden, im Vergleich zu den realen Kesselaschen. Je nach Kessel ergeben sich dabei gute lineare Korrelationen zwischen den Methoden mit Bestimmtheitsmassen von 0,79 und 0,91 (Abbildung 48).

Folglich kann die PASSA-Methode zur Abschätzung der tatsächlichen Schlackebildung in den beiden Biomassekesseln beim Einsatz von Paludipellets empfohlen werden.

6 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zur thermischen Nutzung von Paludibrennstoffen in Kleinf Feuerungsanlagen zeigten deutliche Unterschiede in der Brennstoffqualität, aber auch im Verbrennungsverhalten von *Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.*, beispielsweise bezüglich der frei werdenden Emissionen oder der Bildung von Schlacke. Folgende Schlussfolgerungen können aus den Ergebnissen formuliert werden:

- Paludibiomasse weist Brennstoffeigenschaften auf, die den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-6 entsprechen. Sie sollten demnach als Brennstoff in hierfür zugelassenen Kesseln prinzipiell geeignet sein.
- Sollen Paludikulturen als Brennstoff genutzt werden, bietet sich eine Ernte im Winter an, um den Gehalt verbrennungskritischer chemischer Inhaltsstoffe im Brennstoff zu reduzieren. Vor allem Stickstoff- und Chlor-Gehalt werden dadurch deutlich verringert, sodass weniger Probleme mit NO_x-Emissionen oder Hochtemperaturkorrosion resultieren sollten. Nichtsdestotrotz sollten die relevanten Bauteile von Kesseln, die Paludibiomasse verbrennen, aus geeigneten, korrosionsbeständigen Materialien bestehen.
- Ein direkter Einsatz von Häckselgut als Brennstoff in Kleinf Feuerungsanlagen, bei denen es sich fast ausschließlich um Festbettfeuerungen handelt, ist technisch schwierig umsetzbar. Paludibiomasse lässt sich allerdings relativ leicht pelletieren, wodurch sich die physikalische Brennstoffqualität, aber auch die Transportwürdigkeit der Brennstoffe erhöht.
- Die betrachteten Paludibrennstoffe zeigen unterschiedliche Herausforderungen bei der Verbrennung. Generell waren die Emissionen an NO_x gegenüber der Verbrennung von Holzbrennstoffen in beiden Kesseln erhöht. *Typha ssp.* führte zu den höchsten Emissionen an Gesamtstaub und CO. *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.* führten dagegen zu einer hohen Schlackebildung. Neben einer Anpassung der chemischen Brennstoffzusammensetzung könnten vor allem technische Maßnahmen (Brennraumgeometrie, Rostdesign, elektrostatische Staubabscheider etc.) Abhilfe leisten. Hervorzuheben ist die Tatsache, dass mit keinem der eingesetzten pelletierten Paludibrennstoffe ein konstanter Kesselbetrieb bei Nennlast möglich war, wobei allerdings auch keiner der beiden Kessel für diese Art Brennstoff zugelassen war und insbesondere der 15-kW-Pelletkessel eine sehr hohe Brennstoffqualität (d. h. ENplus A1) für einen störungsfreien und emissionsarmen Betrieb vorschreibt. Ein kurzzeitiger Einsatz der Paludibrennstoffe ist in den beiden verwendeten Kesseln auch technisch nicht empfehlenswert, ein Dauereinsatz sogar unmöglich.
- Eine Additivierung der Brennstoffe mit Kaolin führte hier nicht zu einer wesentlichen Verbesserung des Verbrennungsverhaltens. Möglicherweise muss bei Paludibrennstoffen eine höhere Menge an Additiv zugegeben werden, als in den hier angewendeten Guidelines des ERA-NET-Projekts „Bioflex!“ vorgesehen ist. Auch ist eine Unterschätzung des benötigten Kaolinbedarfs, der sich aus den Analysen der Häckselgutproben 2019 ergab, möglich.

- Eine Mischung von Paludibiomasse mit Holzpellets führt zu einer Verbesserung des Emissionsverhaltens, v. a. hinsichtlich NO_x , SO_x und HCl aufgrund geringerer Gehalte an N, S und Cl im Brennstoff. Eine wesentliche Verbesserung der Schlackebildungsneigung konnte aber durch die Mischung nicht beobachtet werden. Allerdings kommt es bei Paludi-Holzpellet-Mischungen zu insgesamt geringeren Aschegehalten. Für einen effizienten Einsatz in dem hier untersuchten 15-kW-Pelletkessel war jedoch ein Mischungsverhältnis von 10 : 90 (*Phalaris arundinacea* : Holz) notwendig, um einen stabilen Nennlastbetrieb zu ermöglichen. Möglicherweise hätte in Kessel 1 ein geringerer Holzpelletanteil ausgereicht.
- Der Einsatz gemahlene Häckselguts aus *Phalaris arundinacea* führte zu der geringsten Schlackebildung bei der Verbrennung von Paludibiomasse im Kessel 1. Gleichzeitig waren die Emissionen an Gesamtstaub erheblich erhöht. Dies lag voraussichtlich an hohen Anteilen unverbrannten Brennstoffs und an einem Abgaseintrag von Additivmaterial, das über den Schornsteinzug mitgerissen wird. Anpassungen an der Brennstoffzuführung könnten diesbezüglich Abhilfe schaffen.
- Biomassekessel $< 100 \text{ kW}_{\text{th}}$ (1. BImSchV) müssen für die Nutzung von Paludibrennstoffen per Typenprüfung zugelassen werden. Aktuell befindet sich lediglich ein Kessel im Leistungsbereich von weniger als 100 kW auf dem Markt, der in der Bundesrepublik Deutschland diese Zulassung besitzt. Aufgrund der beobachteten Herausforderungen für die Verbrennung ist generell ein vorrangiger Einsatz in größeren Feuerungen ab $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ empfehlenswert, da hier technische Lösungen für die beschriebenen Probleme leichter umgesetzt werden können. Anlagen ab 100 kW, die Paludibrennstoffe einsetzen sollen, müssen nach der 44. BImSchV per Einzelgenehmigung zugelassen werden.

Die hier dargestellte Studie zeigt, dass Paludibiomasse prinzipiell als Brennstoff verwendet werden kann, jedoch deutlich größere Herausforderungen mit sich bringt als die Verbrennung von Holzbrennstoffen. Die thermische Nutzung in größeren, speziell an Paludibrennstoffe angepassten Feuerungen ist aber als eine realistische Verwertungsoption zu bewerten, während ein Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen nicht empfohlen werden kann. Nichtsdestotrotz sind zunächst andere, z. B. stoffliche Nutzungsmöglichkeiten der geernteten Materialien zu prüfen.

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „MOORuse“ zielt auf die Entwicklung innovativer und nachhaltiger Nutzungsstrategien für Paludikulturen ab. Eine mögliche Verwertungsoption ist die energetische Nutzung der geernteten Materialien in dezentralen, kleinen bis mittelgroßen Kesseln für die Bereitstellung erneuerbarer Wärme. Agrarbrennstoffe stellen aufgrund ihrer Brennstoffqualität für die Verbrennung jedoch häufig eine Herausforderung dar und können zu erhöhten Emissionen und zur Bildung von Schlacke führen. In dem vorliegenden Teilbericht wurde das Verbrennungsverhalten von Biomassepellets aus vier unterschiedlichen Paludikulturen untersucht. Zur Verbesserung der Verbrennung wurde das Tonmineral Kaolin als Additiv verwendet.

Vier Rohmaterialien (*Typha ssp.*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex ssp.*) wurden jeweils im Februar 2018, 2019 und 2020 als Häckselgut durch den Projektpartner HSWT geerntet. Alle Proben wurden bezüglich ihrer physikalischen und chemischen Brennstoffqualität nach internationalen Normen für biogene Festbrennstoffe am TFZ analysiert. Die Brennstoffe der 2019er Ernte wurden in der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390 zerkleinert. Ein Teil der Chargen wurde mit Kaolin additiviert, ausgehend von den Guidelines des ERA-NET-Projekts „BioFlex!“. Die Berechnung erfolgte stöchiometrisch über die Gehalte an Kalium und Natrium im Brennstoff (Additivgehalte: *Typha ssp.*: 2,3 m-%, *Phragmites australis*: 0,6 m-%, *Phalaris arundinacea*: 1,2 m-%, *Carex ssp.*: 1,5 m-%). Anschließend wurden die Brennstoffe auf einen Durchmesser von 6 mm pelletiert. Als Referenzbrennstoffe wurden Pellets aus Holz und aus Weizenstroh verwendet. Zusätzlich kamen Mischungen aus *Phalaris-arundinacea*-Pellets und Holzpellets (Mischungsverhältnis 30 : 70 und 10 : 90) zum Einsatz.

Alle Pelletbrennstoffe wurden hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Brennstoffqualität analysiert, z. B. bezüglich ihres Wassergehalts, Aschegehalts, Heizwerts, ihrer mechanischen Festigkeit, Schüttdichte, ihres Gehalts chemischer Inhaltsstoffe und ihres Ascheschmelzverhaltens. Die Brennstoffe wurden in zwei Biomassekesseln, einem 30-kW-Biomassekessel (Treppenrostfeuerung) und einem 15-kW-Pelletkessel (Drehrostfeuerung), in ganztägigen Verbrennungsversuchen am Prüfstand des TFZ eingesetzt. Dabei wurden die gas- und partikelförmigen Emissionen bestimmt. Zudem wurde nach der Verbrennung jeweils auch die gesamte Menge an Asche und Schlacke aus dem Kessel entfernt und die Verschlackungsneigung mittels gravimetrischer Messmethoden nach dem EU-Projekt „AshMelt“ analysiert. Zusätzlich zu den Verbrennungsversuchen an Pellets wurde auch gemahlenes Häckselgut aus *Phalaris arundinacea* in Kessel 1 eingesetzt, sowohl mit als auch ohne Kaolin-Additivierung. Im Fall des Pelletkessels wurden zudem Versuche mit Mischungen aus Paludi- und Holzpellets durchgeführt.

Die nicht pelletierten Rohmaterialien der vier Paludikulturen hatten bei Anlieferung an das TFZ einen Wassergehalt von 6,7 bis 11,0 m-% und eine Schüttdichte von 23 bis 95 kg/m³. Der Aschegehalt lag zwischen 3,9 und 9,9 m-% (wf = wasserfreie Bezugsbasis). Vor allem die *Phalaris-arundinacea*-Proben aus der Ernte 2019 zeigten deutlich erhöhte Aschegehalte im Vergleich zum Vorjahr und deuteten auf eine Kontaminierung der Brennstoffe mit Bodenmaterial hin. Gleichzeitig nahm der Siliziumgehalt von 10.000 mg/kg (wf) auf

19.000 mg/kg (wf) zwischen den Ernten von 2018 und 2019 in diesen Brennstoffen zu. Andere verbrennungskritische chemische Inhaltsstoffe wie Stickstoff (NO_x-Emissionen) und Kalium (Aerosolbildung) schwankten zwischen 0,6 und 1,2 m-% (wf) bzw. zwischen 740 und 3370 kg/m³ (wf). Damit lagen diese Werte nah an typischen Gehalten in Holzhackschnitzeln aus Waldrestholz, aber deutlich über denen für konventionelle Holzpellets.

Während der Verbrennung der Paludipellets in Kessel 1 lagen die gas- und partikelförmigen Emissionen häufig nahe an denen von Holzpellets, waren aber in Einzelfällen teils deutlich erhöht. Die Emissionen an CO schwankten für nicht additivierte Paludipellets zwischen 14 mg/Nm³ für *Phragmites australis* und 292 mg/Nm³ für *Typha ssp.* Sie lagen damit unterhalb des CO-Emissionsgrenzwerts der 1. BImSchV für Stroh- und Holzpellets (Stufe 2: 400 mg/Nm³ bei 13% O₂, Kessel < 100 kW_{th}). NO_x-Emissionen waren gegenüber der Verbrennung von Holzpellets (104 mg/Nm³) deutlich erhöht und lagen zwischen 352 mg/Nm³ für *Typha ssp.* und 595 mg/Nm³ für *Phalaris arundinacea*. Die NO_x-Emissionen korrelierten mit dem Stickstoffgehalt in der Biomasse (R² = 0,77). Die Gesamtstaubemissionen lagen im Fall der nicht additivierten Pellets aus *Phragmites australis* und *Phalaris arundinacea* mit 14 mg/Nm³ unterhalb, die von *Carex ssp.* und *Typha ssp.* mit 31 mg/Nm³ und 115 mg/Nm³ oberhalb des Grenzwerts der 1. BImSchV (Stufe 2: 20 mg/Nm³). Die hohen Staubemissionen von *Typha ssp.* sind vermutlich auf eine unvollständige Verbrennung zurückzuführen. Eine Additivierung mit Kaolin führte in Einzelfällen zu einer Reduzierung der CO- und Gesamtstaubemissionen, wenngleich dieser Effekt eher gering ausfiel. Gleichzeitig kam es stellenweise zu einer Erhöhung der HCl-Emissionen durch die Additivierung, wie dies bereits für Agrarpellets im ERA-NET-Projekt „BioFlex!“ beschrieben worden war.

Im Vergleich zur Verbrennung von Holzpellets kam es bei den Feuerungsversuchen mit Paludipellets zu eher ungleichmäßigen Verbrennungsbedingungen. Als Konsequenz schwankte die Wärmeleistung des Kessels zwischen 20 und 34 kW. Gleichzeitig variierte die O₂-Konzentration im Brenngas zwischen 6,4 und 14,7 %. Diese Variationen waren deutlich höher als beim Betrieb mit Holzpellets und erklären die teilweise höheren Emissionen. Ein stationärer Betrieb bei Nennlast war mit Kessel 1 nicht möglich.

Die Verbrennungsversuche im 15-kW-Pelletkessel (Kessel 2) ergaben nahezu identische Ergebnisse wie im Kessel 1. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang der Einsatz von *Phalaris-arundinacea*-Holzpellet-Mischungen in einem Mischungsverhältnis von 30 : 70 und 10 : 90 (Paludi : Holz). Durch die Beimischung von Holzpellets zu den Paludibrennstoffen konnten die NO_x-, SO_x- und HCl-Emissionen erheblich reduziert werden, was auf die sinkenden Gehalte an S, N und Cl im Brennstoff zurückzuführen ist. Nur bei einem sehr hohen Mischungsverhältnis von 10 : 90 konnte zudem ein stationärer Betrieb bei Nennlast erreicht werden. In allen anderen Fällen kam es während der Versuche zu einem starken Absinken der Wärmeleistung mit der Notwendigkeit eines regelmäßigen automatischen Reinigungstakts des Kessels während des Betriebs. Somit kann auch für Kessel 2 der Einsatz von Paludikulturbiomasse nicht empfohlen werden.

Insgesamt zeigt sich, dass eine Additivierung der Paludibiomasse mit Kaolin als Maßnahme zur Emissionsreduzierung wenig zielführend ist. Zwei der vier getesteten Materialien (*Phalaris arundinacea* und *Phragmites australis*) zeigten schon im nicht additivierten Zustand sehr geringe CO- und Gesamtstaubemissionen. Die hohen Emissionen bei der Verbrennung von *Typha ssp.* konnten nur unwesentlich durch das Additiv verringert werden. Die generell hohen NO_x-Emissionen aller Brennstoffe sind als kritisch für die Einhaltung von NO_x-Grenzwerten der europäischen Ökodesign-Richtlinie, der MCPD-Richtlinie und der 44. BImSchV zu bewerten. Da Kaolin keinen positiven Effekt auf NO_x-Emissionen hat, ist auch in diesem Fall eine Additivierung mit dem Tonmineral nicht hilfreich.

Bei der Verbrennung der Paludibiomasse fiel eine erhöhte Menge an Asche an, in vielen Fällen in Form grober Schlackebrocken. Die Analysen zur Verschlackungsneigung zeigten, dass die Brennstoffe geeignete technische Lösungen vonseiten des zu verwendenden Biomassekessels erfordern, beispielsweise eine Anpassung der Rostgeometrie, einen verbesserten Ascheaustrag und eine wirkungsvolle Rostkühlung. Die geringste Schlackebildung, z. B. gemessen am Siebrückstand bei mehr als 8 mm Lochweite, zeigte sich bei Pellets aus *Typha ssp.* und bei gemahlenem Häckselgut aus *Phalaris arundinacea*. Bei allen anderen Brennstoffen ist in Kleinfeuerungsanlagen mit erheblichen schlackebedingten Problemen zu rechnen, zumal es sich in diesem Leistungsbereich durchweg um Festbettfeuerungen handelt. Eine Additivierung der Brennstoffe mit Kaolin führte auch bezüglich der Schlackebildung zu keiner nennenswerten Verbesserung bei der Verbrennung.

Die Ergebnisse belegen, dass die Verbrennung von Paludibiomasse mit deutlich höheren Herausforderungen als die Verbrennung von Holz verbunden ist. Je nach Material kommt es zu hohen Emissionen an CO und Gesamtstaub (*Typha ssp.*) sowie zu erheblichen Problemen mit Schlackebildung (*Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, *Carex ssp.*), durch die ein stabiler Kesselbetrieb oftmals ganz unmöglich wird. Die Brennstoffe sind daher vermutlich eher für die Verbrennung in größeren Anlagen ab 100 kW geeignet und können für den Einsatz in Kesseln < 100 kW aktuell nicht empfohlen werden.

Quellenverzeichnis

- [1] AHMED, M. T.; HASAN, Y.; ISLAM, S.; RAHMAN, M. (2019): Analysis of Fuel Properties for Peat: A Case Study. *Journal of Applied Chemistry*, Bd. 12, Nr. 5, S. 26–43
- [2] BACHMAIER, H.; OEHLER, H.; HARTMANN, H.; RÖNNBÄCK, M.; PERSSON, H.; JESPERSEN, M. G.; JENSEN, J. H.; SCHMIDL, C.; REICHERT, G.; PELZ, S.; WÖHLER, M. (2017): be-Real – method for pellet stoves: field test and round robin. In: EK, L.; EHRNRÖOTH, H.; SCARLAT, N.; GRASSI, A.; HELM, P. (HRSG.): EUBCE 2017. Papers of the European Biomass Conference and Exhibition 2017. Setting the course for a biobased economy. 25th European Biomass Conference. Stockholm, Sweden, 12-15 June. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 642–647
- [3] BÄFVER, L. S.; RÖNNBÄCK, M.; LECKNER, B.; CLAESSION, F.; TULLIN, C. (2009): Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin. *Fuel Processing Technology*, Bd. 90, Nr. 3, S. 353–359
- [4] BORK, L. (2019): Thermische Moorgrünlandverwertung in Malchin. In: LANDESAMT FÜR UMWELT BRANDENBURG (HRSG.): Brandenburgs Moore klimafreundlich bewirtschaften – Chancen für die Landwirtschaft! Potsdam, 27. Februar 2019, 15 Seiten
- [5] BOZAGHIAN, M.; REBBLING, A.; LARSSON, S. H.; THYREL, M.; XIONG, S.; SKOGLUND, N. (2018): Combustion characteristics of straw stored with CaCO₃ in bubbling fluidized bed using quartz and olivine as bed materials. *Applied Energy*, Bd. 212, February (2), S. 1400–1408
- [6] BRASSARD, P.; PALACIOS, J. H.; GODBOUT, S.; BUSSIÈRES, D.; LAGACÉ, R.; LAROUCHE, J.-P.; PELLETIER, F. (2014): Comparison of the gaseous and particulate matter emissions from the combustion of agricultural and forest biomasses. *Bioresource Technology*, Bd. 155, March (3), S. 300–306
- [7] BRUICE, P. Y.; LAZAR, T. (2013): *Organische Chemie. Studieren kompakt. 5., aktual. Aufl.* München: Pearson Studium, 1165 Seiten, ISBN 978-3-86894-102-9
- [8] BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I.; BOMAN, C.; REBBLING, 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. Graz: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, 31 Seiten.
- [9] BRUNNER, T.; WOHLMUTHER, M.; KANZIAN, W.; OBERNBERGER, I.; PICHLER, W. (2015): Additivation Guideline – How to utilize 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. Vienna. Austria. 1–4 June. Florence: ETA-Florence Renewable Energies. S. 1–11
- [10] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ (2017): Auslegungsfragen/Vollzugsempfehlungen/Hinweise zur Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV. Hamburg: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), 60 Seiten, URL: <https://www.lai-immissionsschutz.de/> (Stand 23.06.17)

- [11] 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, Bd. 70, Nr. 22, S. 804–828
- [12] 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 1. Februar 2010. Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 61, Nr. 4, S. 38–56
- [13] 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 8. Juni 2017. Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 68, Nr. 33, S. 1440–1467
- [14] 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. Mai 2013. Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 64, Nr. 25, S. 1274–1311
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), in der Fassung vom 18. August 2021. Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 71, Nr. 59, S. 3905–3907
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2021): Nationale Moorschutzstrategie. Bonn: Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 54 Seiten
- [17] CARVALHO, L.; WOPIENKA, E.; POINTNER, C.; LUNDGREN, J.; VERMA, V. K.; HASLINGER, W.; SCHMIDL, C. (2013): Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, Bd. 104, April (4), S. 286–296
- [18] CHANDRASEKARAN, S. R.; HOPKE, P. K.; HURLBUT, A.; NEWTOWN, M. (2013): Characterization of Emissions from Grass Pellet Combustion. *Energy Fuels*, Bd. 27, Nr. 9, S. 5298–5306
- [19] DAHMS, T.; OEHMKE, C.; KOWATSCH, A.; ABEL, S.; WICHMANN, S.; WICHTMANN, W.; SCHRÖDER, C. (2017): Paludi-Pellets-Broschüre. Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren. Greifswald: Universität Greifswald, 68 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 16559: Biogene Festbrennstoffe – Terminologie, Definitionen und Beschreibungen. Deutsche Fassung EN ISO 16559, Dezember 2014. Berlin: Beuth, 46 Seiten
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16994: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor. Deutsche Fassung EN ISO 16994, Juli 2015. Berlin: Beuth, 20 Seiten
- [22] 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. Deutsche Fassung EN ISO 16967, Juli 2015. Berlin: Beuth, 22 Seiten

- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16968: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen. Deutsche Fassung EN ISO 16967, September 2015. Berlin: Beuth, 20 Seiten
- [24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18134-1: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser – Referenzverfahren. Deutsche Fassung EN ISO 18134-1, Dezember 2015. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16948: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff. Deutsche Fassung EN ISO 16948:2015, September 2015. Berlin: Beuth, 18 Seiten
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17831-1: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Brikketts – Teil 1: Pellets. Deutsche Fassung EN ISO 17831-1, Mai 2016. Berlin: Beuth, 16 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17829: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets. Deutsche Fassung EN ISO 17829; März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten.
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18122: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Deutsche Fassung EN ISO 18122, März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18846: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an Feingut in Mengen von Pellets. Deutsche Fassung EN ISO 18846, Dezember 2016. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17828: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte. Deutsche Fassung EN ISO 17828, Mai 2016. Berlin: Beuth, 17 Seiten
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 14780: Biogene Festbrennstoffe – Probenherstellung. Deutsche Fassung EN ISO 14780, August 2017. Berlin: Beuth, 35 Seiten
- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18135: Biogene Festbrennstoffe – Probenahme. Deutsche Fassung EN ISO 18135, August 2017. Berlin: Beuth, 73 Seiten
- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18125: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Deutsche Fassung EN ISO 18125, August 2017. Berlin: Beuth, 67 Seiten
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN ISO 3310: Analysensiebe. Technische Anforderungen und Prüfung. Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe. Deutsche Fassung ISO 3310-1, November 2017. Berlin: Beuth, 22 Seiten
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): 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. Deutsche Fassung prEN 303-5, Mai 2018. Berlin: Beuth, 195 Seiten

- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2019): DIN EN ISO 21404:2020 Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens. Deutsche Fassung EN ISO 21404, Juni 2020. Berlin: Beuth, 21 Seiten
- [37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2021): DIN EN ISO 17225-6: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 6: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets. Deutsche Fassung EN ISO 17225-6, November 2021. Berlin: Beuth, 16 Seiten
- [38] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2021): DIN EN ISO 17225-7: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 7: Klassifizierung von nicht-holzartigen Briketts. Deutsche Fassung EN ISO 17225-7, November 2021. Berlin: Beuth, 16 Seiten
- [39] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2021): DIN EN ISO 17225-1: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung EN ISO 17225-1, Oktober 2021. Berlin: Beuth, 78 Seiten
- [40] 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
- [41] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt. Berichte aus dem TFZ Nr. 46. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Straubing, Freising-Weihenstephan, 141 Seiten, ISSN: 1614-1008
- [42] DRAGUTINOVIC, N.; HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2019): Effect of additives on thermochemical conversion of solid biofuel blends from wheat straw, corn stover, and corn cob. Biomass Conversion and Biorefinery, Bd. 9, Nr. 1, S. 35–54
- [43] EICKENSCHIEDT, T.; HEINICHEN, J.; DRÖSLER, M. (2015): The greenhouse gas balance of a drained fen peatland is mainly controlled by land-use rather than soil organic carbon content. Biogeosciences, Bd. 12, Nr. 17, S. 5161–5184
- [44] 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 21.7.2015. Amtsblatt der Europäischen Union, Bd. 58, Nr. L 193, S. 100–114
- [45] 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. Amtsblatt der Europäischen Union, Bd. 58, Nr. L 313, S. 1–19
- [46] FELDMEIER, S.; WOPIENKA, E.; SCHWARZ, M.; SCHÖN, C.; PFEIFER, C. (2019): Applicability of Fuel Indexes for Small-Scale Biomass Combustion Technologies. Part 1: Slag Formation. Energy & Fuels, Bd. 33, Nr. 10, S. 1–9

- [47] FELDMEIER, S.; WOPIENKA, E.; SCHWARZ, M.; SCHÖN, C.; PFEIFER, C. (2019): Applicability of Fuel Indexes for Small-Scale Biomass Combustion Technologies. Part 2: TSP and NO_x Emissions. *Energy & Fuels*, Bd. 33, Nr. 10, S. 1–7
- [48] GEUß, U.; HANGEN, E.; MARTIN, W. (2011): Hintergrundwerte von anorganischen und organischen Schadstoffen in Böden Bayerns – Vollzugshilfe für den vorsorgenden Bodenschutz mit Bodenausgangsgesteinskarte von Bayern 1 : 500.000. *Vorsorgender Bodenschutz Umweltspezial*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 59 Seiten
- [49] GIANNINI, V.; OEHMKE, C.; SILVESTRI, N.; WICHTMANN, W.; DRAGONI, F.; BONARI, E. (2016): Combustibility of biomass from perennial crops cultivated on a rewetted Mediterranean peatland. *Ecological Engineering*, Bd. 97, December (12), S. 157–169
- [50] GLARBORG, P.; JENSEN, A.D.; JOHNSON, J.E. (2003): Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, Bd. 29, Nr. 2, S. 89–113
- [51] HARTUNG, C.; ANDRADE, D.; DANDIKAS, V.; EICKENSCHIEDT, T.; DRÖSLER, M.; ZOLLFRANK, C.; HEUWINKEL, H. (2020): Suitability of paludiculture biomass as biogas substrate – biogas yield and long-term effects on anaerobic digestion. *Renewable Energy*, Bd. 159, October (10), S. 64–71
- [52] HARTUNG, C.; MEINKEN, E. (2021): Fen plant biomass as growing media constituent – cultivation of *Pelargonium zonale* and *Begonia × hiemalis* in peat reduced mixtures with composted fen plant biomass: International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, S. 17–22, ISSN 2406-6168
- [53] HARTUNG, C.; MEINKEN, E. (2021): Suitability of fen plants as growing media constituent in terms of chloride content. Poster 3.1.A. In: UNIVERSITÄT GREIFSWALD (HRSG.): 3rd International Conference on the Utilisation of Wetland Plants. *Renewable Resources from Wet and Rewetted Peatlands – RRR2021*. Virtual conference, 9–11 March. Greifswald: Universität Greifswald, 1 Seite
- [54] HARTUNG, C.; MEINKEN, E. (HRSG.) (2021): Fen plant biomass as growing media constituent – reduction of nitrogen immobilization by composting: International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, S. 93–98, ISSN 2406-6168
- [55] HINTERREITER, S.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P. (2012): Method for determining bridging properties of biomass fuels-experimental and model approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 2, Nr. 2, S. 109–121
- [56] HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2017): Effect of additives on particulate matter formation of solid biofuel blends from wood and straw. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 7, Nr. 1, S. 101–116
- [57] HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2019): Assessment of additives avoiding the release of problematic species into the gas phase during biomass combustion-development of a fast screening method based on TGA. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 9, Nr. 1, S. 21–33
- [58] HUELSMANN, T.; MACK, R.; KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (2019): Influence of kaolinite on the PM emissions from small-scale combustion. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 9, Jg. 1, S. 55–70

- [59] HUMPENÖDER, F.; KARSTENS, K.; LOTZE-CAMPEN, H.; LEIFELD, J.; MENICHETTI, L.; BARTHELMES, A.; POPP, A. (2020): Peatland protection and restoration are key for climate change mitigation. *Environmental Research Letters*, Bd. 15, Nr. 10, S. 1–12
- [60] JÖLLER, M.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2007): Modeling of aerosol formation during biomass combustion for various furnace and boiler types. *Fuel Processing Technology*, Bd. 88, Nr. 11-12, S. 1136–1147
- [61] KABATA-PENDIAS, A. (2011): Trace elements in soils and plants. 4. Aufl. Boca Raton: CRC-press, 520 Seiten, ISBN 978-1-4200-9368-1
- [62] KABENGELE, G.; BARZ, M.; BÖTTCHER, M.; FANKHÄNEL, K.; WICHTMANN, W.; DAHMS, T.; KÖRNER, N.; OEHMKE, C.; WENZEL, M.; BORK, L. (2020): Projekt Bonamoor – Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Niedermoorbiomasse. In: NELLES, M. (HRSG.): Tagungsband zum 14. Rostocker Bioenergieforum. Geplant am 16./17. + 18. Juni 2020 an der Universität Rostock (nicht durchgeführt aufgrund der Beschränkungen im Zuge der Corona-Pandemie). Rostock: Universität Rostock, S. 299–310
- [63] 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
- [64] KASK, Ü.; KASK, L.; LINK, S. (2013): Combustion characteristics of reed and its suitability as a boiler fuel. *Mires and Peat*, Bd. 13, S. 1–10
- [65] KHALSA, JAN H.; DÖHLING, FRANK; BERGER, FLORIAN (2016): Foliage and Grass as Fuel Pellets–Small Scale Combustion of Washed and Mechanically Leached Biomass. *Energies*, Bd. 9, S. 1–16
- [66] 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*, Bd. 18, Nr. 5, S. 1385–1399
- [67] KUCHLER, C.; KUPTZ, D.; RIST, E.; MACK, R.; SCHÖN, C.; ZIMMERMANN, D.; DIETZ, E.; RIEBLER, M.; BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2019): Contamination of Wood Pellets with Selected Mineral Soils – Fuel Quality and Combustion Behaviour. 2BV.4.4. In: CARVALHO, M. D. G.; SCARLAT, N.; GRASSI, A.; HELM, P. (HRSG.): Setting the course for a biobased economy – Papers of the 27th European Biomass Conference. Extracted from the Proceedings of the International Conference. Lisbon, Portugal, 27–30 May. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 673–680
- [68] KUCHLER, C.; ZIMMERMANN, D.; KUPTZ, D.; DIETZ, E.; RIST, E.; RIEBLER, M.; SCHÖN, C.; MACK, R.; BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2019): Contamination of wood chips with mineral soils – fuel quality and combustion behaviour. In: CZUPY, I. (HRSG.): Exceeding the vision: forest mechanisation of the future. Proceedings. 52nd International Symposium on Forestry Mechanization. Sopron, Hungary/Forchtenstein, Austria, 6–9 October. Sopron: University of Sopron Press, S. 320–329
- [69] KUPTZ, D.; DIETZ, E.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Fuel quality of wood chips – chemical elements and fuel indexes. In: FAAIJ, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (HRSG.): Proceedings of the 24th European Biomass Conference & Exhibition (EUBCE 2016). RAI Amsterdam Exhibition and Congress Centre, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June. Florence: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 573–577

- [70] KUPTZ, D.; DIETZ, E.; KUCHLER, C.; ZIMMERMANN, D.; RIEBLER, M.; SCHÖN, C.; BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2020): Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Verringerung der mineralischen Verschmutzung und zur Verbesserung der Verbrennung von Holzbrennstoffen (Quasi-Holz, Förderkennzeichen KS/17/03). Abschlussbericht Dezember 2020. Straubing, Freising-Weißenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 506 Seiten
- [71] KUPTZ, D.; SCHREIBER, K.; SCHULMEYER, F.; LESCHE, S.; ZENG, T.; AHRENS, F.; ZELINSKI, V.; SCHÖN, C.; POLLEX, A.; BORCHERT, H.; LENZ, V.; LOEWEN, A.; NELLES, M.; HARTMANN, H. (2019): Evaluation of combined screening and drying steps for the improvement of the fuel quality of forest residue wood chips – results from six case studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 9, Nr. 1, S. 83–98
- [72] 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*, Bd. 27, Nr. 11, S. 7044–7053
- [73] 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. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 125, June (6), S. 50–62
- [74] MACK, R.; KUPTZ, D.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2020): Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung. *Berichte aus dem TFZ Nr. 65*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 136 Seiten, ISSN 1614-1008
- [75] MACK, R.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2021): Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln. Teil 1: Grundlagenuntersuchungen. *Berichte aus dem TFZ Nr. 74*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 430 Seiten, ISSN 1614-1008
- [76] MITCHELL, E. J. S.; LEA-LANGTON, A. R.; JONES, J. M.; WILLIAMS, A.; LAYDEN, P.; JOHNSON, R. (2016): The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Processing Technology*, Bd. 142, S. 115–123
- [77] MORÁN, J. C.; MÍGUEZ, J. L.; PORTEIRO, J.; PATIÑO, D.; GRANADA, E. (2015): Low-Quality Fuels for Small-Scale Combustion Boilers. An Experimental Study. *Energy Fuels*, Bd. 29, Nr. 5, S. 3064–3081
- [78] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T. (2015): Advanced biomass fuel characterisation methods and their application for creating designer fuels. In: CENTRO DE ENERGIA E TECNOLOGIA PORTUGAL (CENERTEC) (HRSG.): INFUB – 10th 2015 European Conference on Industrial Furnaces and Boilers. Gaia (Porto), Hotel Holiday Inn, 7.–11. April 2015. Rio Tinto, Portugal: Centro de Energia e Tecnologia Portugal (CENERTEC), 12 Seiten
- [79] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; MANDL, C.; KERSCHBAUM, M.; SVETLIK, T. (2017): Strategies and technologies towards zero emission biomass combustion by primary measures. *Energy Procedia*, Bd. 120, August (8), S. 681–688

- [80] PANERU, M.; BABAT, S.; MAIER, J.; SCHEFFKNECHT, G. (2016): Role of potassium in deposit formation during wood pellets combustion. *Fuel Processing Technology*, Bd. 141, Part 2, January (1), S. 266–275
- [81] QUINTERO-MARQUEZ, A.; BERNARD, C.; ZOULALIAN, A.; ROGAUME, Y. (2014): Improving the Operation of an Automatic Wood Chip Boiler by Optimizing CO Emissions. *Energy & Fuels*, Bd. 28, Nr. 3, S. 2152–2159
- [82] REICHERT, G.; SCHMIDL, C.; HASLINGER, W.; STRESSLER, H.; STURMLECHNER, R.; SCHWABL, M.; HOCHENAUER, C. (2018): Novel Method Evaluating Real-Life Performance of Firewood Roomheaters in Europe. *Energy & Fuels*, Bd. 32, Nr. 2, S. 1874–1883
- [83] ROßMANN, P.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P. (2011): Jahresnormnutzungsgrad und Emissionsfaktoren bei Holzfeuerungen. *Landtechnik*, Bd. 66, Nr. 3, S. 213–215
- [84] SCHÖN, C.; FELDMIEIER, S.; HARTMANN, H.; SCHWABL, M.; DAHL, J.; RATHBAUER, J.; VEGANIEVA, D. J.; BOMAN, C.; ÖHMAN, M.; BURVAL, J. (2019): New Experimental Evaluation Strategies Regarding Slag Prediction of Solid Biofuels in Pellet Boilers. *Energy & Fuels*, Bd. 33, Nr. 10, S. 1–11
- [85] SCHÖN, C.; FELDMIEIER, S.; HARTMANN, H.; SCHWABL, M.; DAHL, J.; RATHBAUER, J.; VEGANIEVA, D. J.; BOMAN, C.; ÖHMAN, M.; BURVAL, J. (2019): New Experimental Evaluation Strategies Regarding Slag Prediction of Solid Biofuels in Pellet Boilers. *Energy & Fuels*, Bd. 33, Nr. 10, S. 1–11
- [86] SCHÖN, C.; KUPTZ, D.; MACK, R.; ZELINSKI, V.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H. (2019): Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 9, Nr. 1, S. 71–82
- [87] SCHÖN, C.; MACK, R.; HARTMANN, H. (2019): Quality Assessment of Wood Pellets for Residential Heating Systems and Combustion in Real and Laboratory Conditions. In: *Proceedings of the 27th European Biomass Conference (EUBCE)*. Lisbon, Portugal, 27–30 May. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 667–672
- [88] SIPPULA, O.; LAMBERG, H.; LESKINEN, J.; TISSARI, J.; JOKINIEMI, J. (2017): Emissions and ash behavior in a 500kW pellet boiler operated with various blends of woody biomass and peat. *Fuel*, Bd. 202, August (8), S. 144–153
- [89] SMIEJA-KRÓL, B.; FIAŁKIEWICZ-KOZIEŁ, B. (2014): Quantitative determination of minerals and anthropogenic particles in some Polish peat occurrences using a novel SEM point-counting method. *Environmental Monitoring and Assessment*, Bd. 186, Nr. 4, S. 2573–2587
- [90] SOMMERSACHER, P.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2011): Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, Bd. 26, Nr. 1, S. 380–390
- [91] 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*, Bd. 27, Nr. 9, S. 5192–5206

- [92] STEENARI, B.-M.; LUNDBERG, A.; PETTERSSON, H.; WILEWSKA-BIEN, M.; ANDERSSON, D. (2009): Investigation of Ash Sintering during Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives. *Energy Fuels*, Bd. 23, Nr. 11, S. 5655–5662
- [93] SUTEJO, Y.; SAGGAFF, A.; RAHAYU, W.; HANAFIAH (2017): Physical and chemical characteristics of fibrous peat. In: BORGAN, W. R.; VICTOR, S.; BUNTORO, F. (HRSG.): *Smart Construction Towards Global Challenges. Proceedings of the 3rd International Conference on Construction and Building Engineering, ICONBUILD 2017*, Palembang, Indonesia, 14.08.–17.08.2017. *AIP Conference Proceedings*, Bd. 1903. College Park, Maryland: American Institute of Physics, Inc., S. 1-10, ISBN 9780735415911
- [94] TANNEBERGER, F.; APPULO, L.; EWERT, S.; LAKNER, S.; Ó BROLCHÁIN, N.; PETERS, J.; WICHTMANN, W. (2021): The Power of Nature-Based Solutions. How Peatlands Can Help Us to Achieve Key EU Sustainability Objectives. *Advanced Sustainable Systems*, Bd. 5, Nr. 1, S. 1–10
- [95] TANNEBERGER, F.; SCHRÖDER, C.; HOHLBEIN, M.; LENSCHOW, U.; PERMIEN, T.; WICHMANN, S.; WICHTMANN, W. (2020): Climate Change Mitigation through Land Use on Rewetted Peatlands – Cross-Sectoral Spatial Planning for Paludiculture in Northeast Germany. *Wetlands*, Bd. 40, Nr. 6, S. 2309–2320
- [96] TIEMEYER, B.; ALBIAC BORRAZ, E.; AUGUSTIN, J.; BECHTOLD, M.; BEETZ, S.; BEYER, C.; DRÖSLER, M.; EBLI, M.; EICKENSCHIEDT, T.; FIEDLER, S.; FÖRSTER, C.; FREIBAUER, A.; GIEBELS, M.; GLATZEL, S.; HEINICHEN, J.; HOFFMANN, M.; HÖPER, H.; JURASINSKI, G.; LEIBER-SAUHEITL, K.; PEICHL-BRAK, M.; ROßKOPF, N.; SOMMER, M.; ZEITZ, J. (2016): High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*, Bd. 22, Nr. 12, S. 4134–4149
- [97] VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. (2010): An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, Bd. 89, Nr. 5, S. 913–933
- [98] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2021): VDI 2066 Blatt 1: Messen von Partikeln. Staubmessung in strömenden Gasen. Blatt 1: Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Mai 2021. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 84 Seiten
- [99] WEIGL, M.; PICHLER, W.; SCHAIDER, J.; SCHAIDER, L.; FREILACH, C. (2020): Mobile pellet production – innovation driven revolution of the biomass process chain. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBV)(HRSG.): *6. Mitteleuropäischen Biomassekonferenz*, 22.–24. Januar, Messezentrum Graz. Wien: Österreichischer Biomasseverband, S. 1–20
- [100] WICHMANN, S. (2018): Economic incentives for climate smart agriculture on peatlands in the EU. *Proceedings of the Greifswald Mire Centre*, Nr. 01/2018. Greifswald: Greifswald Moor Centrum – Greifswald Mire Center, 40 Seiten
- [101] WICHTMANN, W.; OEHMKE, C.; BÄRISCH, S.; DESCHAN, F.; MALASHEVICH, U.; TANNEBERGER, F. (2014): Combustibility of biomass from wet fens in Belarus and its potential as a substitute for peat in fuel briquettes. *Mires and Peat*, Bd. 13, Nr. 06, S. 1–10
- [102] WÖHLER, M.; JAEGER, D.; REICHERT, G.; SCHMIDL, C.; PELZ, S. K. (2017): Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions. *Renewable Energy*, Bd. 105, May (5), S. 66–75

- [103] XIONG, S.; BOZAGHIAN, M.; LESTANDER, T. A.; SAMUELSSON, R.; HELLQVIST, S.; ÖHMAN, M. (2017): Calcium oxide as an additive for both conservation and improvement of the combustion properties of energy grass. A preliminary study. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 99, April (4), S. 1–10
- [104] ZENG, T.; KUPTZ, D.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; SCHULMEYER, F.; ZELINSKI, V.; POLLEX, A.; BORCHERT, H.; LOEWEN, A., HARTMANN, H. LENZ, V.; NELLES, M. (2019): Impact of adhering soil and other extraneous impurities on the combustion and emission behavior of forest residue wood chips in an automatically stoked small-scale boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 9, Nr. 1, S. 99–116
- [105] ZENG, T.; MLONKA-MĘDRALA, A.; LENZ, V.; NELLES, M. (2021): Evaluation of bottom ash slagging risk during combustion of herbaceous and woody biomass fuels in a small-scale boiler by principal component analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 11, Nr. 4, S. 1211–1229
- [106] 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*, Bd. 212, January (1), S. 108–116
- [107] 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*, Bd. 184, November (11), S. 689–700
- [108] ZIEGLER, R.; WICHTMANN, W.; ABEL, S.; KEMP, R.; SIMARD, M.; JOOSTEN, H. (2021): Wet peatland utilisation for climate protection – An international survey of paludiculture innovation. *Cleaner Engineering and Technology*, Bd. 5, December (12) S. 100305, 1–13

Anhang

Anhang 1: Inhaltsstoffliche Analyse von *Phalaris arundinacea* und Torf von der Versuchsfläche Freisinger Moos

Tabelle 22: Gemessene Inhaltsstoffe in *Phalaris arundinacea* (Häckselgut) und der dazugehörigen Torfprobe sowie Berechnung der Werte für Häckselgut aus *Phalaris arundinacea* (Ernte 2019) mit einem Torfanteil von 11 % (wf = wasserfreie Bezugsbasis)

Brennstoffart	<i>Phalaris</i> 2019	Torf	Mittelwert aus <i>Phalaris</i> 2018 & <i>Phalaris</i> 2020	<i>Phalaris</i> 2019 mit 11 % Torfanteil
	gemessen	gemessen	gemessen	berechnet
Aschegehalt (m-%, wf)	9,9	54,3	4,2	9,9
Heizwert (MJ/kg, wf)	16,88	8,69	17,83	16,85
C (m-%, wf)	46,2	24,5	47,1	44,7
H (m-%, wf)	5,7	2,7	5,9	5,5
N (m-%, wf)	1,24	2,12	1,02	1,15
Cl (m-%, wf)	0,068	0,023	0,068	0,063
S (m-%, wf)	0,117	0,350	0,111	0,138
O (m-%, wf)	37,0	16,4	41,8	39,1
Al (mg/kg, wf)	1.290	7.860	599,5	1.422
Ca (mg/kg, wf)	5.270	15.600	2.725	4.188
Fe (mg/kg, wf)	1.820	17.400	435,5	2.354
K (mg/kg, wf)	1.910	5.870	1.420	1.927
Mg (mg/kg, wf)	611	764	853,5	846
Na (mg/kg, wf)	369	3.340	174,5	533
P (mg/kg, wf)	925	1.760	855,5	960
Si (mg/kg, wf)	19.600	127.000	12.000	25.031

Anhang 2: Stöchiometrischer Kaolinbedarf, ausgehend von anderen Analyseproben

Tabelle 23: Berechnung des stöchiometrischen Kaolinbedarfs (inkl. Sicherheitszuschlag von 10 %), ausgehend von den Elementgehalten in den Häckselgut-Analyseproben der Jahre 2018 und 2020 (HG) sowie aus den nicht additivierten Pellets aus dem Jahr 2019 (P), nach den Guidelines des ERA-NET-Projekts „BioFlex!“ [8] (alle Angaben auf wasserfreier Bezugsbasis)

Brennstoff	Probe	K in mg/kg	K in mol/kg	Na in mg/kg	Na in mol/kg	Stöchiometrischer Kaolinbedarf in m- % (inkl. 10 % Si- cherheitszuschlag)
<i>Typha</i>	HG 2018	1.730	0,04	2.350	0,10	2,97
<i>Phragmites</i>	HG 2018	1.620	0,04	119	0,01	0,89
<i>Phalaris</i>	HG 2018	1.080	0,03	199	0,01	0,67
<i>Carex</i>	HG 2018	3.370	0,09	589	0,03	2,07
<i>Typha</i>	P 2019	1.905	0,05	1.915	0,08	2,68
<i>Phragmites</i>	P 2019	885	0,02	329	0,01	0,68
<i>Phalaris</i>	P 2019	2.030	0,05	331	0,01	1,23
<i>Carex</i>	P 2019	2.905	0,07	447	0,02	1,74
<i>Typha</i>	HG 2020	3.620	0,09	354	0,02	2,19
<i>Phragmites</i>	HG 2020	2.130	0,05	219	0,01	1,18
<i>Phalaris</i>	HG 2020	1.760	0,05	142	0,01	0,95
<i>Carex</i>	HG 2020	4.010	0,10	695	0,03	2,46

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 Holzhackschnitzelheizungen 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 Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff 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 – Markt Betrachtungen, 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 Anbau-szenarien
- 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 Abgasstufen I und II
- 32 Pflanzenöлтаugliche 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 Prüfstanduntersuchungen
- 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 bayerische 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 pflanzenöлтаuglicher 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 Amaranthlinien für bayerische Standorte
- 65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung
- 66 Einflussfaktoren auf die NO_x-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

- 67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL
- 68 Hanf zur stofflichen Nutzung – Stand und Entwicklungen
- 69 Grundlagenorientierte Untersuchungen zum Zünd- und Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf ein Motorsystem der Abgasstufe V (EVOLUM)
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II
- 72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie
- 73 Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen
- 74 Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln
- 75 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie
- 76 Mineralisch verschmutzte Holzbrennstoffe – Teil 1: Auswirkung auf die Verbrennung
- 77 Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern – Thermische Verwertung

