

74

Berichte aus dem TFZ

Erweiterte Holzpellet- charakterisierung

**Einfluss bekannter und
neuer Brennstoffparameter
auf die Emissionen aus
Pelletöfen und -kesseln**

Projektpartner:

BIOS
BIOENERGIESYSTEME GmbH


DEPI



**Erweiterte Holzpelletcharakterisierung –
Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die
Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln**



Erweiterte Holzpelletcharakterisierung

**Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter
auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln**

Robert Mack
Claudia Schön
Dr. Hans Hartmann
Thomas Brunner
Ingwald Obernberger

Projektpartner:



Berichte aus dem TFZ 74

Straubing, Februar 2022

Titel: Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln

Autoren: Robert Mack, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann, Thomas Brunner (BIOS), Ingwald Obernberger (BIOS)

Projektleitung: Dr. Hans Hartmann

Mitarbeiter

TFZ:

Albert Maierhofer
Stephan Winter-Thoma
Tobias Rohrmaier
Daniel Fera
Elisabeth Rist
Bernhard Promesberger
Benedikt Haas
Anja Rocktäschel
Lukas Maier

BIOS:

Gerald Würcher
Werner Kanzian

DEPI:

Hans Martin Behr
Kevin Spieker

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22020917 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.03.2019 bis zum 28.02.2021. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2022

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

Alle Rechte vorbehalten.

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

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

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Robert Mack, Anna Grundner, Ulrich Eidschink

Verlag: Eigenverlag

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2022

Gestaltung: Robert Mack

Fotonachweis: TFZ, BIOS, Titelbild Tobias Hase

Der Bericht kann kostenlos und in Farbe unter www.tfz.bayern.de/publikationen heruntergeladen werden.

Abstract (deutsch)

Ziel des Berichts ist es, Brennstoffparameter von Holzpellets zu identifizieren, die das Emissionsverhalten von Pelletöfen und Pelletkesseln maßgeblich beeinflussen. Dazu sollten auch geeignete Schnellbestimmungsmaßnahmen untersucht werden. Es wurden 28 Sortimente marktverfügbarer Pellets beschafft, umfassend analysiert und in zwei Pelletöfen sowie teilweise in zwei Pelletkesseln verbrannt. Zusätzlich wurden 31 Sortimente von Versuchspellets hergestellt, um gezielt die Einflüsse von Pelletlänge, Wassergehalt, Feinanteil, Rohstoffaufbereitung, Additiven und Holzart zu untersuchen. Diese wurden in einem Pelletofen und teilweise einem Pelletkessel verwendet. Ausgewählte Sortimente wurden außerdem in gemeinsamen Feuerungsversuchen mit dem Projektpartner BIOS hinsichtlich der Umsetzungsprozesse in der Brennkammer sowie in einem Laborreaktor von BIOS hinsichtlich der Umsetzungsprozesse sowie des Bett-Abbrandverhaltens während des Abbrands untersucht. Die daraus generierten Erkenntnisse flossen direkt in die Entwicklung eines Bett-Abbrandmodells für Pelletschüttungen ein. Mit dem entwickelten Abbrandmodell wurden die Versuche im Versuchsreaktor nachsimuliert und anhand der Ergebnisse validiert. Mit dem finalen Modell wurden Sensitivitätsanalysen ausgewählter Brennstoffparameter durchgeführt.

Es konnten der Kaliumgehalt im Brennstoff, der mittels NIR-Analyse ermittelte Laubholzanteil, der Karbonatanteil in der Brennstoffasche, das Si/K-Verhältnis und die Energiedichte als die wesentlichen Einflussgrößen für die Schadstoffemissionen aus den untersuchten Feuerungen – vor allem bei Pelletöfen – identifiziert werden. Gezielte Untersuchungen zeigten auch, dass sich die Pelletlänge, der Wassergehalt und der Feinanteil auf die Emissionen bei Pelletöfen, jedoch aufgrund der aufwendigeren Leistungsregelung nicht bei dem untersuchten Pelletkessel auswirken. Zur Pelletierung verwendete Bindemittel können bei hoher Dosierung einen negativen Einfluss auf die Emissionen haben, aber es zeigte sich auch, dass Kaolin bei niedriger Dosierung geeignet ist, die Gesamtstaubemissionen zu senken. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass Laubholz als Ausgangsmaterial von Holzpellets meist zu höheren Emissionen führt als Nadelholz. In fördermechanischen Versuchen sowie in den Messungen zu den Umsetzungsprozessen im Feuerraum wurden die vorrangig zu optimierenden Schwachpunkte der Pelletofentechnologie identifiziert. Hierzu zählen die Förderschnecke (Gleichmäßigkeit der Brennstoffzufuhr und generierter Feinanteil), das Design der Brennerschale (Luftstufung, Falschlufte über Zündelement usw.) sowie die Regelung (Brennstoffzufuhr, Reinigungsintervall).

Abstract (englisch)

The aim of the report is to identify new fuel parameters of wood pellets that significantly influence the emission behaviour of pellet stoves and pellet boilers. Suitable rapid determination measures were also investigated for this purpose. In the research, 28 assortments of pellet available on the market were procured, comprehensively analysed and burned in two pellet stoves and partially in two pellet boilers. In addition, 31 assortments of test pellets were produced in order to specifically investigate the influences of pellet length, moisture content, fines content, raw material preparation, additives and wood type. These assortments were tested in a pellet stove and partly in a pellet boiler. Selected assortments were also investigated in joint combustion tests together with the project partner BIOS with regard to the conversion processes in the combustion chamber as well as with in lab-reactor tests, with regard to the conversion processes and especially to fuel bed behaviour during combustion. The findings gained were directly incorporated into the development of novel fuel bed conversion model. Selected tests in the lab-reactor were simulated with the developed bed model and the model was validated on the basis of the results. Sensitivity analyses of selected fuel parameters were carried out with the final model.

The potassium content in the fuel, the hardwood content as determined by NIR analysis, the carbonate content in the fuel ash, the Si/K ratio and the energy density were identified as the most significant influencing variables for pollutant emissions from small furnaces, especially pellet stoves. Specific investigations also showed that pellet length, moisture content and content of fines have an effect on emissions from pellet stoves, but not from the pellet boiler investigated because of the elaborated process control. Binders added during pelleting process can have a negative influence on emissions when high dosages are applied, but it was also shown that Kaolin in low dosage is suitable for reducing total particulate matter emissions from wood pellets. In addition, it could be shown that hardwood pellets usually lead to higher emissions compared to softwood pellets. Through mechanical conveying tests and measurements of the conversion processes in the combustion chamber the weak points in pellet stove technology were identified. They are: the screw conveyor (uniformity of the fuel supply and the proportion of fines generated), the design of the burner cup (air staging, false air via the ignition element, etc.) and the control system (fuel supply, cleaning interval).

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	5
Abstract (englisch)	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	27
Abkürzungsverzeichnis	33
1 Einleitung	35
2 Zielsetzung und Aufbau des Projekts	37
3 Stand des Wissens und der Technik	41
3.1 Charakterisierung von Holzpellets	41
3.2 Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens	44
3.3 Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffparameter auf die Emissionen von Kleinfeuerungsanlagen	45
3.4 Einfluss von Bindemitteln, Additiven und mineralischen Verunreinigungen auf die Verbrennung	48
4 Material und Methoden	55
4.1 Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)	55
4.2 Herstellung der Versuchspellets	56
4.2.1 Eingesetzte Rohstoffe	56
4.2.2 Eingesetzte Pelletiertechnik	58
4.2.3 Übersicht der hergestellten Versuchsbrennstoffe	62
4.3 Analytik	64
4.3.1 Physikalische und inhaltsstoffliche Brennstoffparameter	64
4.3.2 Analyse von Partikeln aus der Verbrennung und Brennstoffaschen	72
4.3.3 Untersuchte Schnellbestimmungsmethoden	77
4.4 Feuerungsversuche	84
4.4.1 Beschreibung der verwendeten Feuerungen	84
4.4.2 Prüfstands Aufbau und Messtechnik	86
4.4.3 Aufbau zur Messung der Umsetzungsprozesse im Feuerraum	90
4.4.4 Methodisches Vorgehen während der Feuerungsversuche	92
4.4.5 Versuchsaufbau Laborreaktor und verwendete Messtechnik	94
4.5 Fördermechanische Versuche am kalten Pelletofen	97
4.6 Statistische Methoden	98

5	Ergebnisse der Brennstoffanalytik.....	101
5.1	Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)	101
5.1.1	Physikalische Brennstoffqualität.....	101
5.1.2	Inhaltstoffliche Brennstoffqualität.....	113
5.1.3	Bewertung der untersuchten Schnellbestimmungsmethoden.....	120
5.2	Versuchspellets mit definierten Eigenschaften und Ausgangsmaterialien	126
5.2.1	Brennstoffvariationen mit Fichte	126
5.2.1.1	Physikalische Brennstoffqualität.....	126
5.2.1.2	Inhaltstoffliche Brennstoffqualität.....	138
5.2.2	Variation der Holzart.....	141
5.2.2.1	Physikalische Brennstoffqualität.....	141
5.2.2.2	Inhaltstoffliche Brennstoffqualität.....	151
5.3	Ergebnisse der TGA-Analysen.....	153
6	Ergebnisse der fördermechanischen Versuche am kalten Pelletofen	159
7	Ergebnisse der Feuerungsversuche	165
7.1	Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)	165
7.1.1	Gasförmige Emissionen	172
7.1.2	Gesamtstaubemissionen.....	185
7.1.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Gesamtstaubpartikel.....	193
7.1.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände	198
7.1.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	202
7.2	Versuchspellets mit definierten Eigenschaften und Ausgangsmaterialien	203
7.2.1	Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen.....	203
7.2.1.1	Gasförmige Emissionen	207
7.2.1.2	Gesamtstaubemissionen.....	214
7.2.1.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel.....	217
7.2.1.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände	221
7.2.1.5	Schlussfolgerungen.....	223
7.2.2	Einfluss des Wassergehalts auf die Emissionen	224
7.2.2.1	Gasförmige Emissionen	227
7.2.2.2	Gesamtstaubemissionen.....	229
7.2.2.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel.....	230
7.2.2.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände	232
7.2.2.5	Schlussfolgerungen.....	233
7.2.3	Einfluss des Feinanteils auf die Emissionen.....	233
7.2.3.1	Gasförmige Emissionen	235
7.2.3.2	Gesamtstaubemissionen.....	237
7.2.3.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel.....	238
7.2.3.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände	239
7.2.3.5	Schlussfolgerungen.....	240
7.2.4	Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung von Fichtenpellets auf die Emissionen.....	240
7.2.4.1	Gasförmige Emissionen	246
7.2.4.2	Gesamtstaubemissionen.....	249

7.2.4.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel	249
7.2.4.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände	253
7.2.4.5	Schlussfolgerungen	254
7.2.5	Einfluss von Additiven bei Fichtenpellets auf die Emissionen	254
7.2.5.1	Gasförmige Emissionen	257
7.2.5.2	Gesamtstaubemissionen.....	262
7.2.5.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel	265
7.2.5.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände.....	268
7.2.5.5	Schlussfolgerungen	271
7.2.6	Einfluss der Holzart auf die Emissionen.....	272
7.2.6.1	Gasförmige Emissionen.....	275
7.2.6.2	Gesamtstaubemissionen.....	280
7.2.6.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel	283
7.2.6.4	Untersuchung der Verbrennungsrückstände.....	287
7.2.6.5	Schlussfolgerungen	291
7.3	Korrelationen der Emissionen mit Brennstoffparametern unter Berücksichtigung der untersuchten Pelletsortimente	292
7.3.1	Einfluss der Brennstoffparameter auf die gasförmigen Emissionen	293
7.3.2	Einfluss der Brennstoffparameter auf die Gesamtstaubemissionen und deren Zusammensetzung	295
7.3.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	301
7.4	Langzeitmessungen mit ausgewählten Brennstoffen.....	302
7.4.1	Entwicklung der Emissionen über die Betriebsdauer	303
7.4.2	Betrachtung der Verbrennungsrückstände.....	308
7.4.3	Schlussfolgerungen	311
7.5	Messung der Umsetzungsprozesse im Feuerraum.....	312
8	Ergebnisse der Laborreaktorversuche	329
8.1	Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening).....	329
8.2	Versuchspellets mit definierten Eigenschaften und Ausgangsmaterialien	336
8.2.1	Versuchspellets (Fichte) mit unterschiedlichen Längen	336
8.2.2	Versuchspellets aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien	340
8.3	Abbruchversuche	351
9	Schlussfolgerungen.....	363
9.1	Anforderungen an den Brennstoff.....	363
9.2	Anforderungen an die Feuerungstechnik	366
10	Zusammenfassung.....	371
	Quellenverzeichnis	379
	Anhang 1: Analysenergebnisse Pelletscreening	389
	Anhang 2: Analysenergebnisse Versuchsbrennstoffe	395

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Brennstoffbedingte Partikelemission – Ergebnisse einer Serienuntersuchung marktgängiger Holzpellets an einem Pelletofen, aufsteigend sortiert nach Kaliumgehalt (Bild oben) und nach Aschegehalt im Brennstoff (Bild unten) (nach [80]).....	46
Abbildung 2:	Aufbau der Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) am TFZ mit Materialzufuhr und Vibro-Rinne	58
Abbildung 3:	Schematische Darstellung eines Presskanals einer beidseitig nutzbaren Flachmatrize (Quelle: TFZ).....	59
Abbildung 4:	Exaktmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK) mit Wasserdosierung zur Befeuchtung des gemahlene Rohmaterials mit einer Weißel-Spritze, Waage und im Deckel des Mixers verbauten Düsen	60
Abbildung 5:	Schema der Probenteilung und Probennahme für die marktverfügbaren Holzpellets und die Versuchspellets am TFZ (TP – Teilprobe)	65
Abbildung 6:	Pressling-Härteprüfer der Amandus Kahl GmbH Co. KG	67
Abbildung 7:	Charakteristische Parameter zur Bewertung von TGA-Kurven (blau) bzw. DTG-Kurven (derivate thermogravimetry; rot) (links) und Auswertung der Anteile an Hemicellulose, Cellulose und Lignin (rechts).....	70
Abbildung 8:	Intensitäts- und Temperaturverlauf einer TIC/TOC-Bestimmung an einer Partikelprobe	74
Abbildung 9:	Intensitäts- und Temperaturverlauf einer EC/OC-Bestimmung an einer Partikelprobe	74
Abbildung 10:	Temperaturprogramm bei der Veraschung nach der PASSA-Methode	75
Abbildung 11:	Versuchsaufbau der Partikeldichtemessung im Messzylinder als Schnellbestimmungsmethode nach der Zugabe von Pellets	78
Abbildung 12:	Versuchsaufbau pelletVISION zur Schnellbestimmung der Pelletlänge	79
Abbildung 13:	Beispiel Messbild pelletVISION (links), Fehlmessung zwei Pellets zusammengefasst (oben rechts, Wert 27,0), Fehlmessung nicht gemessenes Pellet (unten rechts, kein Wert)	80
Abbildung 14:	Messaufbau der von BIOS im Projekt entwickelten Pelletvermessungsmethode	81
Abbildung 15:	Auswertungsbeispiel für die von BIOS im Projekt entwickelte Pelletvermessungsmethode	82
Abbildung 16:	Versuchsaufbau System Ligno-Tester, Gerät aufgeklappt Ausgangszustand (oben), Prüfkammer beladen mit Pellets (unten links), Gerät verschlossen während der Prüfung (unten rechts)	83

Abbildung 17:	Schematische Darstellung der für die Versuche an den Pelletöfen verwendeten Messstrecke und der Anordnung der Messgeräte am Feuerungsprüfstand des TFZ	87
Abbildung 18:	Schematische Darstellung der für die Versuche an den Pelletkesseln verwendeten Messstrecke und Anordnung der Messgeräte am Feuerungsprüfstand des TFZ.....	89
Abbildung 19:	Messstellen in der Brennkammer und im Brennstoffbett (oben) sowie Aufbau der Heißgasmessung zur Bestimmung der Brenngaszusammensetzungen am Beispiel der Messposition am Betaustritt (unten)	91
Abbildung 20:	Reaktionsabbruch durch Quenchen des Brennstoffbetts.....	92
Abbildung 21:	Aufbau des Laborreaktors bei BIOS	94
Abbildung 22:	Position der Thermoelemente im Brennstoffbett.....	95
Abbildung 23:	Definition der Abbruchkriterien (nähere Erläuterungen zu den Verläufen der Temperatur- und Spezies-Trends siehe Unterkapitel 8.1)	96
Abbildung 24:	Versuchsaufbau zur Durchführung der Förderversuche am kalten Pelletofen.....	97
Abbildung 25:	Blick in den Pelletbehälter nach Durchlauf von ca. $\frac{2}{3}$ der Probenmenge	98
Abbildung 26:	Ablauf der Untersuchung zur mechanischen Beanspruchung der Pellets durch die Fördereinrichtung	98
Abbildung 27:	Längenverteilung der Pelletsortimente im Pelletscreening bei einer Messung mit Messschieber von je 100 Pellets je Sortiment	101
Abbildung 28:	Lineare Regression des Anteils an Pellets < 10 mm mit der mittleren Pelletlänge der Pelletsortimente im Pelletscreening.....	102
Abbildung 29:	Wassergehalte der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening	103
Abbildung 30:	Aschegehalt der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening.....	104
Abbildung 31:	Mechanische Festigkeit der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening	105
Abbildung 32:	Feinanteil der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening.....	105
Abbildung 33:	Lineare Regression zwischen Feinanteil und mechanischer Festigkeit im Pelletscreening	106
Abbildung 34:	Schüttdichte der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening.....	107
Abbildung 35:	Heizwert der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening	107
Abbildung 36:	Partikeldichte der Pelletsortimente im Pelletscreening	108
Abbildung 37:	Abhängigkeit der Schüttdichte von der Partikeldichte im Pelletscreening	109

Abbildung 38:	Berechnete Schüttungsporosität der Pelletsortimente im Pelletscreening.....	110
Abbildung 39:	Energiedichte der Pelletsortimente im Pelletscreening, im Anlieferungszustand.....	111
Abbildung 40:	Pellethärte der Pelletsortimente im Pelletscreening	112
Abbildung 41:	Partikelgrößenverteilung des Pelletausgangsmaterials der Pelletsortimente im Pelletscreening.....	113
Abbildung 42:	Stärkegehalt aus der enzymatisch-quantitativen Stärkebestimmung (Unterkapitel 4.3) und Angaben der Hersteller zum eingesetzten Bindemittel, falls vorhanden	114
Abbildung 43:	Aerosolbildende Elemente der Pelletsortimente im Pelletscreening	115
Abbildung 44:	Laub- und Nadelholzanteil der Pelletsortimente im Pelletscreening nach NIR-Analyse	118
Abbildung 45:	Karbonatanteil in der Brennstoffasche (bei 550 °C), bezogen auf trockenen Brennstoff	119
Abbildung 46:	Lineare Regressionsanalyse zum Karbonatanteil in der Brennstoffasche in Abhängigkeit vom Calciumgehalt des Brennstoffs	119
Abbildung 47:	Einfluss der Rotation von Pellets um die Zylinderachse auf das System pelletVISION, Draufsicht aus der Perspektive der Kamera. Gemessene Länge (schwarze Pfeile), Überschätzung der mittleren Länge (rote Pfeile). Das Pellet wurde jeweils um 90° „gedreht“ entlang der Längsachse.	120
Abbildung 48:	Mittleren Pelletlänge gemessen mit pelletVISION im Vergleich zur mittleren Pelletlänge nach Norm	121
Abbildung 49:	Vergleich der mechanischen Festigkeit, gemessen nach Norm und mit dem Ligno-Abriebtester	123
Abbildung 50:	Vergleich der Partikeldichten nach Norm, im Messzylinder und nach der stereometrischen Methode.....	124
Abbildung 51:	Abhängigkeit der Partikeldichte ausgewählter Proben nach Norm in Abhängigkeit von der Verweildauer der Pellets in der Tauchlösung	125
Abbildung 52:	Abhängigkeit der Partikeldichte ausgewählter Proben bei Bestimmung mit dem Messzylinder in Abhängigkeit von der Verweildauer der Pellets in der Tauchlösung	125
Abbildung 53:	Längenverteilung der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen.....	127
Abbildung 54:	Wassergehalt der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen	128
Abbildung 55:	Aschegehalt der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen, bezogen auf die Trockenmasse	129
Abbildung 56:	Aschegehalt des Rohmaterials bei Anlieferung je Bigbag (BB), bezogen auf die Trockenmasse	129

Abbildung 57: Aschegehalt der verwendeten Bindemittel und Additive, bezogen auf die Trockenmasse	130
Abbildung 58: Karbonatanteil in der Brennstoffasche (550 °C) der Fichten-Brennstoffvariationen, bezogen auf trockenen Brennstoff.....	131
Abbildung 59: Abhängigkeit des Karbonatanteils der Brennstoffasche (550 °C) vom Calciumgehalt im Brennstoff	132
Abbildung 60: Mechanische Festigkeit der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen.....	133
Abbildung 61: Feinanteil der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen	134
Abbildung 62: Schüttdichte (n = 3) und Partikeldichte (n = 10) der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen	134
Abbildung 63: Abhängigkeit der Schüttdichte von der Partikeldichte und der Pelletlänge der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen.....	135
Abbildung 64: Pellethärte der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung bei n = 5 an.....	136
Abbildung 65: Partikelgrößenverteilung des Pelleta Ausgangsmaterials der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen	138
Abbildung 66: Summe des Gehalts an Aerosolbildnern (K, Na, Zn, Pb) der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen, bezogen auf die Trockenmasse	139
Abbildung 67: Summe des Gehalts an Aerosolbildnern (K, Na, Zn, Pb) der untersuchten Additive, bezogen auf die Trockenmasse.....	140
Abbildung 68: Längenverteilung der Pellets aus verschiedenen Holzarten	142
Abbildung 69: Wassergehalt der selbst hergestellten Pellets aus verschiedenen Holzarten	143
Abbildung 70: Aschegehalt der Pellets aus verschiedenen Holzarten	144
Abbildung 71: Karbonatanteil in der Brennstoffasche (550 °C) der verschiedenen Holzarten	145
Abbildung 72: Abhängigkeit des Karbonatanteils in der Brennstoffasche (550 °C) vom Calciumgehalt im Brennstoff	145
Abbildung 73: Mechanische Festigkeit der Pellets aus verschiedenen Holzarten	146
Abbildung 74: Feinanteil der Pellets der verschiedenen Holzarten.....	147
Abbildung 75: Schüttdichte (n = 3) sowie Partikeldichte (n = 10) der Pellets der verschiedenen Holzarten. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen	148
Abbildung 76: Pellethärte der Pellets der verschiedenen Holzarten (n = 5).....	149
Abbildung 77: Partikelgrößenverteilung des Pelleta Ausgangsmaterials der Pellets der untersuchten Holzarten	150

Abbildung 78:	Summe der aerosolbildenden Elemente der Pellets aus den untersuchten Holzarten, bezogen auf die Trockenmasse.....	152
Abbildung 79:	DTG-Kurven untersuchter Pelletsortimente.....	154
Abbildung 80:	Abhängigkeit der Veränderung der Pelletlänge und der Pelletanzahl durch die Förderversuche im kalten Pelletofen 2 von der durchschnittlichen Pelletlänge der Proben vor dem Förderversuch.....	160
Abbildung 81:	Vergleich der Schüttdichte vor und nach dem Förderversuch im kalten Pelletofen 2.....	161
Abbildung 82:	Vergleich des Feinanteils vor und nach dem Förderversuch und deren Summe.....	162
Abbildung 83:	Abhängigkeit des Feinanteils nach der Förderung im kalten Pelletofen 2 von der mittleren Pelletlänge	163
Abbildung 84:	Abhängigkeit des gesamten Feinanteils (vor und nach Förderung) von der mechanischen Festigkeit.....	163
Abbildung 85:	Abhängigkeit der Brennraumtemperatur vom Brennstoffmassenstrom am Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets.....	167
Abbildung 86:	Abhängigkeit des Lambda-Werts vom Brennstoffmassenstrom am Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets...	168
Abbildung 87:	Abhängigkeit des Druckverlusts vom Brennstoffmassenstrom an Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets...	169
Abbildung 88:	Aus der gemessenen Abgaskonzentration und den Volumenströmen am zentralen Verbrennungsluftstutzen und im Abgas berechneter Falschluffanteil während der Versuchsdauer für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets...	170
Abbildung 89:	Abhängigkeit des berechneten Falschluffanteils vom Druckverlust über das Glutbett für die beiden Pelletöfen mit den marktverfügbaren Holzpellets.....	171
Abbildung 90:	Vergleich der CO-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) sowie die dazugehörigen Lambda-Werte. Die gestrichelte Linie zeigt den aktuell gültigen CO-Grenzwert der 1. BImSchV von 250 mg/Nm ³ [9].	173
Abbildung 91:	Einzelmesswerte der CO-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletofen 1. Jede Säule stellt die mittleren CO-Emissionen während einer Staubmessung (hier 15 min) dar.	174
Abbildung 92:	Einzelmesswerte der CO-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletofen 2. Jede Säule stellt die mittleren CO-Emissionen während einer Staubmessung (hier 14 min) dar. Bei Pelletofen 2 findet während der fünften Messung die Brenntopfreinigung statt.	175

Abbildung 93: Vergleich der Mittelwerte der CO-Emissionen für die marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 2 mit Reinigung (n = 5) und ohne Reinigung (n = 4).....	175
Abbildung 94: Quadratische Regression der CO-Emissionen mit den Lambda-Werten der Einzelmessungen bei den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung).....	176
Abbildung 95: Abhängigkeit der CO-Emissionen vom Druckverlust über das Glutbett der Einzelmessungen bei den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)	177
Abbildung 96: CO-Emissionen der untersuchten marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2	178
Abbildung 97: Vergleich der org.-C-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	179
Abbildung 98: Einzelmesswerte der org.-C-Emissionen für Pelletofen 1. Jede Säule stellt die mittleren org.-C-Emissionen während einer Staubmessung (hier 15 min) dar.....	180
Abbildung 99: Einzelmesswerte der org.-C-Emissionen für Pelletofen 2. Jede Säule stellt die mittleren org.-C-Emissionen während einer Staubmessung (hier 14 min) dar. Bei Pelletofen 2 ist jeweils die fünfte Messung je Pelletsortiment die Messung, in der die Brennertopfreinigung stattfindet.....	181
Abbildung 100: Abhängigkeit der org.-C-Emissionen von den CO-Emissionen für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung) für die marktverfügbaren Pelletsortimente	182
Abbildung 101: NO _x -Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	183
Abbildung 102: NO _x -Emissionen der untersuchten marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2	184
Abbildung 103: Abhängigkeit der NO _x -Emissionen für Pelletofen 1 und 2 sowie Pelletkessel 1 und 2 vom Stickstoffgehalt der untersuchten Pellets.....	185
Abbildung 104: Gesamtstaubemissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung). Die gestrichelte Linie zeigt den aktuell gültigen Staubgrenzwert der 1. BImSchV von 30 mg/Nm ³	186
Abbildung 105: Einzelmesswerte der Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 1. Jede Säule stellt die Gesamtstaubemissionen während einer Staubmessung (hier 15 min) dar.....	187
Abbildung 106: Einzelmesswerte der Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 2. Jede Säule stellt die Gesamtstaubemissionen während einer Staubmessung (hier 14 min) dar. Bei Pelletofen 2 ist jeweils die fünfte Messung je Pelletsortiment die Messung, in der die Brennertopfreinigung stattfindet.....	188

Abbildung 107: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von den CO-Emissionen der Einzelmessungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)	189
Abbildung 108: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen vom Druckverlust über das Glutbett für die Einzelmessungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung).....	190
Abbildung 109: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen (Einzelmessungen) vom Brennstoffmassenstrom für die Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung).....	191
Abbildung 110: Gesamtstaubemissionen der untersuchten marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2. Die gestrichelte Linie zeigt den aktuell gültigen Staubgrenzwert für automatisch beschickte Biomasseheizkessel der Stufe 2 nach der 1. BImSchV von 20 mg/Nm ³	192
Abbildung 111: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von den aerosolbildenden Elementen für die Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung), Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2	193
Abbildung 112: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Partikelanzahl bei den Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigungsabbrand).....	198
Abbildung 113: Abhängigkeit des Anteils von Aschepartikeln > 2 mm an der gesamten Asche für die untersuchten marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 (ohne Sortiment 27), Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und PASSA-Methode	201
Abbildung 114: Abhängigkeit des Anteils von Aschepartikeln > 1 mm an der gesamten Asche für die untersuchten marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 (ohne Sortiment 27), Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und PASSA-Methode	202
Abbildung 115: CO-Emissionen, Lambda und Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	207
Abbildung 116: Abhängigkeit der mittleren CO-Emissionen von der Pelletlänge und dem Massenanteil an Pellets < 10 mm an Pelletofen 2	208
Abbildung 117: CO-Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletkessel 1 (n = 5).....	209
Abbildung 118: Org.-C-Emissionen, Lambda und Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung).....	210
Abbildung 119: Abhängigkeit der org.-C-Emissionen von der Pelletlänge und dem Massenanteil an Pellets < 10 mm zur Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge an Pelletofen 2.....	210
Abbildung 120: Org.-C-Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge für Pelletkessel 1 (n = 5).....	211

Abbildung 121: NO _x -Emissionen, Lambda und Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	212
Abbildung 122: Abhängigkeit der CO-Einzelmessungen von den NO _x -Einzelmessungen für die Sortimente kurz, mittel und lang; getrennt mit und ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr an Pelletofen 2	212
Abbildung 123: NO _x -Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletkessel 1 (n = 5)	213
Abbildung 124: Gesamtstaubemissionen, Lambda und Brennstoffinput in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	215
Abbildung 125: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Summe der aerosolbildenden Elemente (K, Na, Pb und Zn) bei verschiedenen Pelletlängen an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	216
Abbildung 126: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen vom Anteil an Pellets < 10 mm und der mittleren Pelletlänge für die Untersuchung zum Einfluss der Pelletlänge an Pelletofen 2 ohne die Messungen mit angepasster Brennstoffzufuhr (n = 4, ohne Reinigung)	216
Abbildung 127: Gesamtstaubemissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge am Pelletkessel 1 (n = 5)	217
Abbildung 128: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer der Messungen in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (1 h)	218
Abbildung 129: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide	219
Abbildung 130: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern der dritten Staubbemessung in Abhängigkeit von der Pelletlänge für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC sowie Salze und Oxide	220
Abbildung 131: Gegenüberstellung der Emissionen an Salzen und Oxiden mit den aerosolbildenden Elementen für die Sortimente kurz, mittel und lang an Pelletofen 2 (mit Anpassung der Brennstoffzufuhr) und Pelletkessel 1	221
Abbildung 132: Anteil der Aschepartikel > 2 mm an der gesamten Aschemenge in Abhängigkeit von der mittleren Pelletlänge bei den Messungen mit den Sortimenten kurz, mittel und lang an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	222
Abbildung 133: Anteil der Aschepartikel > 1 mm an der gesamten Aschemenge in Abhängigkeit von der mittleren Pelletlänge bei den Messungen mit den Sortimenten kurz, mittel und lang an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	223
Abbildung 134: Wassergehalt vor und nach dem Feuerungsversuch zum Einfluss des Wassergehalts im Behälter und am Pelletabwurf nach der Schnecke für Pelletofen 2	226

Abbildung 135: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 (n = 5).....	227
Abbildung 136: Org.-C-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 (n = 5).....	228
Abbildung 137: NO _x -Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 (n = 5).....	229
Abbildung 138: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 (n = 5).....	230
Abbildung 139: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten im Pelletofen 2, gemittelt (1 h).....	231
Abbildung 140: Zusammensetzung der Staubbiladung bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 und Pelletofen 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide	232
Abbildung 141: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	233
Abbildung 142: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	235
Abbildung 143: Org.-C-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	236
Abbildung 144: NO _x -Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	237
Abbildung 145: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	238
Abbildung 146: Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide	239
Abbildung 147: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände in Abhängigkeit vom Feinanteil für Pelletofen 2	240
Abbildung 148: Rohmaterial, Sägespan (feucht), sieben Monate im Freien als Miete gelagert	241
Abbildung 149: Rohmaterial, Sägespan (feucht), sieben Monate im Freien im Bigbag gelagert	242
Abbildung 150: Abhängigkeit der Lambda-Werte und der Glutbetttemperatur von der mittleren Pelletlänge in der Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	244

Abbildung 151: Abhängigkeit der Lambda-Werte und der Glutbetttemperatur mit Anteil an Pellets < 10 mm zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	245
Abbildung 152: CO-Emissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	246
Abbildung 153: Org.-C-Emissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	247
Abbildung 154: NO _x -Emissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	248
Abbildung 155: Abhängigkeit der NO _x -Emissionen vom Stickstoffgehalt der Brennstoffe zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	248
Abbildung 156: Gesamtstaubemissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	249
Abbildung 157: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 gemittelt (1 h)	250
Abbildung 158: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide	251
Abbildung 159: Abhängigkeit der Salze und Oxide der Gesamtstaubemissionen vom Kaliumgehalt im Brennstoff und der Energiedichte der Pelletsortimente der Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2	252
Abbildung 160: Abhängigkeit der Emissionen elementaren Kohlenstoffs von der Energiedichte der Pelletsortimente der Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung für Pelletofen 2	252
Abbildung 161: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände von den Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung für Pelletofen 2	253
Abbildung 162: Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms und der Lambda-Werte von der mittleren Pelletlänge bzw. der Energiedichte für die Messungen zum Einfluss der Additive an Pelletofen 2	256
Abbildung 163: CO-Emissionen in Abhängigkeit von der Additivzugabe an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	258
Abbildung 164: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletkessel 1 (n = 5)	259

Abbildung 165: Org.-C-Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	260
Abbildung 166: NO _x -Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	261
Abbildung 167: Abhängigkeit der NO _x -Emissionen von der mittleren Pelletlänge bzw. der Energiedichte bei unterschiedlicher Additivzugabe an Pelletofen 2	261
Abbildung 168: NO _x -Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletkessel 1 (n = 5).....	262
Abbildung 169: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)	263
Abbildung 170: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Summe der aerosolbildenden Elemente sowie vom Si/K-Verhältnis für die Messungen zum Einfluss der Additive an Pelletofen 2	264
Abbildung 171: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletkessel 1 (n = 5).....	265
Abbildung 172: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2, gemittelt (1 h)	266
Abbildung 173: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern in Abhängigkeit von der Additivzugabe für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC sowie Salze und Oxide.....	267
Abbildung 174: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss der Additive für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC sowie Salze und Oxide	268
Abbildung 175: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände in Abhängigkeit von der Additivzugabe für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	269
Abbildung 176: Abhängigkeit der Partikel < 1 mm der Verbrennungsrückstände aus den Untersuchungen zum Einfluss der Additive mit dem Schlackeindex unter Ausschluss von „Fichte 0,34 Kao“ an Pelletofen 2	270
Abbildung 177: Gegenüberstellung der Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände der Untersuchungen zum Einfluss der Additive mit dem Si/K-Verhältnis an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	270
Abbildung 178: Abhängigkeit der Glutbetttemperatur und dem Druckverlust über das Glutbett vom Aschegehalt bei der Variation der Holzarten an Pelletofen 2	275
Abbildung 179: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Holzarten im Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1	276
Abbildung 180: Org.-C-Emissionen für die untersuchten Holzarten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1	277

Abbildung 181: Abhängigkeit der org.-C-Emissionen vom Aschegehalt für die untersuchten Holzarten in Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 (ohne Apfel)	278
Abbildung 182: NO _x -Emissionen für die untersuchten Holzarten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1	279
Abbildung 183: Abhängigkeit der NO _x -Emissionen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 für die Holzarten.....	280
Abbildung 184: Gesamtstaubemissionen für die untersuchten Holzarten an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1.....	282
Abbildung 185: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 vom Gehalt aerosolbildender Elemente der untersuchten Holzarten.....	282
Abbildung 186: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Partikelanzahl bei der Untersuchung des Einflusses der Holzart auf die Emissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	284
Abbildung 187: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss Holzart für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide	285
Abbildung 188: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung (Partikel > 2 mm) der Verbrennungsrückstände aus den Messungen zum Einfluss der Holzart für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und der PASSA-Methode	288
Abbildung 189: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung (Partikel > 1 mm) der Verbrennungsrückstände aus den Messungen zum Einfluss der Holzart für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und der PASSA-Methode	289
Abbildung 190: Gegenüberstellung der Verschlackungen der drei auffälligsten Holzarten (Kiefer, Douglasie und Eiche 2) für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 mit der PASSA-Methode.....	290
Abbildung 191: Abhängigkeit des Anteils an Partikeln > 2 mm vom Verschlackungsindex für die untersuchten Holzarten der Verbrennungsrückstände von Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 und der PASSA-Methode	291
Abbildung 192: Zeitlicher Verlauf über CO, Org.-C, NO _x , Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Sortiment 16 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2.....	304
Abbildung 193: Zeitlicher Verlauf über CO, org.-C, NO _x , Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2.....	305
Abbildung 194: Zeitlicher Verlauf über CO, org.-C, NO _x , Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Lärchenholzpellets in Pelletofen 2.....	306

Abbildung 195: Übersicht über CO, org.-C, NO _x , Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Fichtenpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität in Pelletofen 2	307
Abbildung 196: Übersicht über CO, org.-C, NO _x , Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletkessel 1	308
Abbildung 197: Versinterte Rostasche nach 24-h-Betrieb mit Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2	309
Abbildung 198: Versinterte Rostasche nach 26-h-Versuch mit Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletkessel 1	310
Abbildung 199: Asche der Langzeitmessung mit Fichtenpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität im Pelletofen 2	310
Abbildung 200: Asche der Langzeitmessung mit Pelletsortiment 16 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2	311
Abbildung 201: Trends relevanter Betriebsparameter während des Testlauftags mit Sortiment 8 der marktverfügbaren Holzpelletsortimente; T = Temperatur; BK = Brennkammer; BIOS/Ofen = gemessen durch BIOS bzw. durch die Ofenregelung; Positionen der Betttemperaturfühler: m-o = Mitte oben, m-u = Mitte unten; L = links; R = rechts.....	315
Abbildung 202: Trends relevanter Betriebsparameter während des Testlauftags mit Fichtenpellets; T = Temperatur; BK = Brennkammer; BIOS/Ofen = gemessen durch BIOS bzw. durch die Ofenregelung; Positionen der Betttemperaturfühler: m-o = Mitte oben, m-u = Mitte unten; L = links; R = rechts.....	317
Abbildung 203: Trends relevanter Betriebsparameter während des Testlauftags mit Lärchenpellets; T = Temperatur; BK = Brennkammer; BIOS/Ofen = gemessen durch BIOS bzw. durch die Ofenregelung; Positionen der Betttemperaturfühler: m-o = Mitte oben, m-u = Mitte unten; L = links; R = rechts.....	318
Abbildung 204: Sauerstoffgehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt und CO-Emissionen in Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms	320
Abbildung 205: Brennkammertemperaturen gemessen mit dem Absaugpyrometer (links) und mit dem Brennkammertemperaturfühler der Ofenregelung (rechts)	321
Abbildung 206: Vergleich der mit dem Absaugpyrometer am Betaustritt (T Pyro unten) und in der Brennkammer (T Pyro oben) gemessenen Temperaturen.....	322
Abbildung 207: Rost- und Brennstoffbetttemperaturen	322
Abbildung 208: Gasphasenzusammensetzung am Betaustritt	323
Abbildung 209: Brennstoffbettschichten und Höhenprofile – Lärche	325

Abbildung 210: Brennstoffbettschichten und Höhenprofile – Fichte.....	326
Abbildung 211: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Massenabnahme.....	331
Abbildung 212: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Brennstoffbetttemperaturen.....	331
Abbildung 213: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der O ₂ - und H ₂ O-Gehalte im Abgas	332
Abbildung 214: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der CO-, CO ₂ - und CH ₄ -Gehalte im Abgas	332
Abbildung 215: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der NO- und NO ₂ -Gehalte im Abgas	333
Abbildung 216: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der NH ₃ - und HCN-Gehalte im Abgas ...	334
Abbildung 217: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Aufteilung der N-Spezies im Abgas in m-%.....	335
Abbildung 218: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – mittlere Längen der eingesetzten Sortimente ...	336
Abbildung 219: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Dauer der Abbrandphasen	338
Abbildung 220: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Abbauraten (Reihung nach absteigender Schüttdichte).....	338
Abbildung 221: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Betttemperaturen (Reihung nach absteigender Schüttdichte)	339
Abbildung 222: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Verläufe der O ₂ - und H ₂ O-Gehalte im Abgas (Reihung nach absteigender Schüttdichte)	339
Abbildung 223: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Verläufe der CO-, CO ₂ - und CH ₄ -Gehalte im Abgas (Reihung nach absteigender Schüttdichte)	340
Abbildung 224: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Massenabbau	343
Abbildung 225: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Betttemperaturen	343
Abbildung 226: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – O ₂ -Konzentrationen	344
Abbildung 227: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – H ₂ O-Konzentrationen.....	345

Abbildung 228: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – CO ₂ -Konzentrationen	345
Abbildung 229: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – CO-Konzentrationen	346
Abbildung 230: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – CH ₄ -Konzentrationen	346
Abbildung 231: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – NO-Konzentrationen	347
Abbildung 232: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – NH ₃ -Konzentrationen	347
Abbildung 233: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – HCN-Konzentrationen	348
Abbildung 234: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Aufteilung der Stickstofffreisetzung auf relevante NO _x -Vorläufersubstanzen (in m-%)	349
Abbildung 235: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Bilder der Brennstoffe und der Rückstände (Aschen).....	350
Abbildung 236: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Vergleich der Massenabbauraten bei Testläufen mit Fichtenpellets (oben: Referenztest, Mitte: AK-1, unten: AK-2)	352
Abbildung 237: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Vergleich der Brennstoffbetttemperaturen bei Testläufen mit Fichtenpellets (oben: Referenztest, Mitte: AK-1, unten: AK-2)	353
Abbildung 238: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Vergleich der Gasphasenspezieskonzentrationen bei Testläufen mit Fichtenpellets (oben: Referenztest, Mitte: AK-1, unten: AK-2)	354
Abbildung 239: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Brennstoffbettbewertung am Beispiel Fichtenpellets (oben: AK-1, unten: AK-2)	355
Abbildung 240: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Fotos des Einsatzmaterials sowie der Rückstände bei AK-2 – Testläufe mit marktverfügbaren Sortimenten	359
Abbildung 241: Bilder des Einsatzmaterials und der Rückstände beim Testlauf mit Pelletsortiment 17 und AK-3.....	361

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Holzpelletcharakterisierung gemäß DIN EN ISO 17225-2	41
Tabelle 2:	Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut einschlägiger Normen und Zertifizierungen (Stand 2020) [14] [34] [37]. d = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand, m-% = Masseprozent, k. A. = keine Angaben	43
Tabelle 3:	Übersicht der Pelletsortimente im Pelletscreening	55
Tabelle 4:	Übersicht der eingesetzten Rohstoffe für die Pelletierung der Versuchsbrennstoffe	57
Tabelle 5:	Übersicht der eingesetzten Additive für die Pelletierung der Versuchsbrennstoffe	57
Tabelle 6:	Technische Spezifikationen der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390 [2]	58
Tabelle 7:	Technische Spezifikationen des verwendeten Exaktmischers.....	60
Tabelle 8:	Technische Spezifikationen der am TFZ verfügbaren Matrizen.....	61
Tabelle 9:	Übersicht über die hergestellten Versuchsbrennstoffe	62
Tabelle 10:	Siebe und Fraktionen der Siebanalyse (nach DIN EN ISO 17827-2) [21]	66
Tabelle 11:	Einteilung der Klassen bei Holzpellets für die industrielle Verwendung nach der Partikelgrößenverteilung des Pellet-Ausgangsmaterials [14]	66
Tabelle 12:	Zusätzliche inhaltstoffliche Parameter, die nicht in der DIN EN ISO 17225-2 limitiert sind	68
Tabelle 13:	Bestimmungsgrenzen für durch Eurofins Umwelt Ost GmbH vorgenommene Elementaranalysen	68
Tabelle 14:	Beschreibung der fünf Verschlackungsgrade nach [72]	76
Tabelle 15:	Übersicht der relevanten technischen Daten aller verwendeten Pelletfeuerungen	85
Tabelle 16:	Korrelation nach Pearson relevanter Parameter aus dem Pelletscreening.....	109
Tabelle 17:	Brennstoffindizes und berechnete Größen nach Unterkapitel 3.2, 3.3 und 3.4 (wasserfreie Bezugsbasis).....	116
Tabelle 18:	Korrelation nach Pearson der mechanischen Parameter der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen	137
Tabelle 19:	Brennstoffindizes für die Fichten-Brennstoffvariationen nach Unterkapitel 3.2 und 3.3, bezogen auf die Trockenmasse.....	140
Tabelle 20:	Korrelation nach Pearson der mechanischen Parameter der Pellets der verschiedenen Holzarten.....	149

Tabelle 21:	Brennstoffindizes der Pellets aus den untersuchten Holzarten, bezogen auf die Trockenmasse.....	153
Tabelle 22:	Zusammenstellung der aus den DTG-Verläufen ermittelten charakteristischen Temperaturen (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung).....	155
Tabelle 23:	Aus den DTG-Verläufen abgeleitete Gehalte an flüchtigen Komponenten, Holzkohle, Hemicellulose, Cellulose und Lignin (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung).....	156
Tabelle 24:	Aus den DTG-Verläufen abgeleitete kinetische Parameter für die Zersetzung von Hemicellulose, Cellulose und Lignin (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung).....	157
Tabelle 25:	Veränderungen der mittleren Pelletlänge und der Pelletanzahl durch Förderversuche im kalten Pelletofen 2.....	159
Tabelle 26:	Mittelwerte der feuerungstechnischen Parameter für Pelletofen 1 (n = 5 à 15 min) und Pelletofen 2 (n = 4 à 14 min, ohne Reinigung)....	165
Tabelle 27:	Mittelwerte der feuerungstechnischen Parameter für Pelletkessel 1 (n = 5 à 30 min) und Pelletkessel 2 (n = 5 á 30 min) (– nicht gemessen).....	171
Tabelle 28:	Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei den Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide in Prozent und in mg/Nm ³ bei 13 % Bezugssauerstoff	194
Tabelle 29:	Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei den Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide in Prozent und mg/Nm ³ bei 13 % Bezugssauerstoff	195
Tabelle 30:	Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer gemittelt (1 h) für die marktverfügbaren Sortimente an Pelletofen 1 und Pelletofen 2.....	196
Tabelle 31:	Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände aus den Feuerungsversuchen und aus der PASSA-Methode der marktverfügbaren Holzpellets für Aschepartikel > 2 mm und > 1 mm (– nicht bestimmt/gemessen).....	199
Tabelle 32:	Relevante Brennstoffparameter für die Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge (n. b. – nicht bestimmt)	204
Tabelle 33:	Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter für die Versuche zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen für Pelletofen 2.....	206
Tabelle 34:	Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter für die Versuche zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen für Pelletkessel 1	206
Tabelle 35:	Feuerungstechnische Parameter und Brennstoffeigenschaften der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses des Wassergehalts in Pelletofen 2	225

Tabelle 36:	Feuerungstechnischen Parameter und Brennstoffeigenschaften der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses des Wassergehalts in Pelletkessel 1	226
Tabelle 37:	Feuerungstechnische Parameter der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses des Feinanteils in Pelletofen 2.....	234
Tabelle 38:	Übersicht der wichtigsten Brennstoffeigenschaften sowie verwendete Pelletiertechnik der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung der hergestellten Pellets	242
Tabelle 39:	Feuerungstechnische Parameter und Brennstoffeigenschaften der Feuerungsversuche in der Untersuchung zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2	244
Tabelle 40:	Ergebnisse linearer Regressionen ausgewählter Brennstoff- bzw. feuerungstechnischer Parameter mit dem Anteil an Partikeln > 2 mm und > 1 mm an der gesamten Aschemenge an Pelletofen 2 ..	254
Tabelle 41:	Übersicht der wichtigsten Brennstoffparameter der zur Untersuchung des Einflusses von Additiven verwendeten Pelletsortimente	255
Tabelle 42:	Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses von Additiven für Pelletofen 2	256
Tabelle 43:	Feuerungstechnische Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses von Additiven für Pelletkessel 1	257
Tabelle 44:	Ausgewählte Brennstoffparameter der zur Untersuchung des Einflusses der Holzart verwendeten Pelletsortimente.....	272
Tabelle 45:	Feuerungstechnische Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Holzart für Pelletofen 2.....	273
Tabelle 46:	Feuerungstechnische Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Holzart für Pelletkessel 1.....	274
Tabelle 47:	Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer, gemittelt an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 (1 h)	283
Tabelle 48:	Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss Holzart für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide.....	286
Tabelle 49:	Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei den Mesungen zum Einfluss Holzart für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide.....	286
Tabelle 50:	Stichprobenumfang und Aufteilung der Stichproben für Pelletofen 1, Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	292
Tabelle 51:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den CO-Emissionen	294

Tabelle 52:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den org.-C-Emissionen	295
Tabelle 53:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den Gesamtstaubemissionen	296
Tabelle 54:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den IC-Emissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	297
Tabelle 55:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den EC-Emissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	298
Tabelle 56:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den OC-Emissionen Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	299
Tabelle 57:	Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den Salzen und Oxiden Staubemissionen Pelletofen 2 und Pelletkessel 1	300
Tabelle 58:	Aus der statistischen Auswertung erstellte Matrix zur Bedeutung des Einflusses relevanter Brennstoffparameter (bei Anstieg) und dessen Wirkungsrichtung auf den jeweils identifizierten Emissionsparameter	302
Tabelle 59:	Vergleich der Rostaschen zwischen dem Standardversuch und den Langzeitmessungen (n. b. – nicht bestimmt)	309
Tabelle 60:	Aschenanfall und Aschenbilanz	324
Tabelle 61:	Vergleich der je Brennstoff ermittelten Mengen der Schichten „Teilverkohlt“ und „Verkohlt“ in der Brennschale nach Testlauf sowie Schüttdichten der verkohnten Schicht.....	327
Tabelle 62:	Laborreakortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Holzpellets – Eckdaten.....	330
Tabelle 63:	Laborreakortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längen – Eckdaten.....	337
Tabelle 64:	Laborreakortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Eckdaten	342
Tabelle 65:	Laborreakortestläufe mit Reaktionsabbruch – Massen der entnommenen Schichten des Brennstoffbetts – Testläufe mit Fichtenpellets	355
Tabelle 66:	Laborreakortestläufe mit Reaktionsabbruch – Höhe der entnommenen Schichten des Brennstoffbetts vom Rost aus gemessen in [mm] – Testläufe mit Fichtenpellets	356
Tabelle 67:	Laborreakortestläufe mit Reaktionsabbruch – Charakterisierung der entnommenen Schichten und von Einzelpellets	357

Tabelle 68:	Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Masse, Höhenprofil und Volumen der verkohlten Schicht bei AK-2 – Testläufe mit marktverfügbaren Sortimenten	360
Tabelle 69:	Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Charakterisierung des Rückstands bei AK-3 sowie Vergleich mit AK-2 und dem Brennstoff (Pelletsortiment 17)	362
Tabelle 70:	Brennstoffanforderungen an Holzpellets der Qualitätsklasse A1 nach den aktuellen Entwürfen der DIN EN ISO 17225-2 [33] sowie des ENplus-Handbuchs [43] und Empfehlung der Brennstoffanforderungen (für Pelletöfen) aus dem Projekt sowie Bandbreite der 28 marktverfügbaren Pelletsortimente und deren möglicher Ausschluss bei Anwendung der empfohlenen Brennstoffanforderung.....	365
Tabelle 71:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Wassergehalt, Schüttdichte, Partikeldichte und Pellethärte. SD – Standardabweichung, ar – as received, d – wasserfreie Bezugsbasis	389
Tabelle 72:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Heizwert, Brennwert, Aschegehalt, Feinanteil mechanische Festigkeit, Energiedichte und Schüttungsporosität. d – wasserfreie Bezugsbasis, ar – as received ..	390
Tabelle 73:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Pelletlänge, Durchmesser und Anteil an Pellets < 10 mm.....	390
Tabelle 74:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials.....	391
Tabelle 75:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials und Zuordnung nach I-Klassen für Industrieholzpellets DIN EN ISO 17225-2	392
Tabelle 76:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Elementaranalyse Teil 1 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis), O-Gehalt berechnet	393
Tabelle 77:	Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Elementaranalyse Teil 2 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)	394
Tabelle 78:	Nummerierung der Versuchsbrennstoffe für die Übersichtstabellen zu den Analyseergebnissen im Anhang 2	395
Tabelle 79:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Wassergehalt, Schüttdichte, Partikeldichte und Pellethärte. SD = Standardabweichung.....	396
Tabelle 80:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Heizwert, Brennwert, Aschegehalt, Feinanteil, mechanische Festigkeit, Energiedichte und Schüttungsporosität	397
Tabelle 81:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Pelletlänge und Durchmesser sowie Anteil an Pellets < 10 mm	397
Tabelle 82:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Partikelgrößenverteilung Pelletaushangsmaterial.....	398

Tabelle 83:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Partikelgrößenverteilung Pelleta Ausgangsmaterial Auswertung nach I-Klassen für Industrieholzpellets DIN EN ISO 17225-2	399
Tabelle 84:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Elementaranalyse Teil 1 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)....	400
Tabelle 85:	Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Elementaranalyse Teil 2 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)....	401
Tabelle 86:	Analyseergebnisse zu den für die Versuchsbrennstoffe verwendeten Additiven: Elementaranalyse Teil 1 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis, O berechnet)	402
Tabelle 87:	Analyseergebnisse zu den für die Versuchsbrennstoffe verwendeten Additiven: Elementaranalyse Teil 2 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis).....	402
Tabelle 88:	Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung für Partikel > 1 mm und > 2 mm der Verbrennungsrückstände von den Messungen zum Einfluss der Holzart für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und PASSA-Methode.....	402

Abkürzungsverzeichnis

af:	aschefrei
AK:	Abbruchkriterium
ar.:	bezogen auf Feuchtsubstanz im Anlieferungszustand („as received“)
d:	bezogen auf Trockensubstanz („dry“)
EC:	elementarer Kohlenstoff
FS:	Frischsubstanz
HK:	Holzkohle
IC:	anorganischer Kohlenstoff („inorganic carbon“)
m-%:	Masseprozent
Nm:	Normkubikmeter
OC:	organischer Kohlenstoff
org.-C:	organische Kohlenwasserstoffe
RG:	Rauchgas
T:	Temperatur
TIC:	gesamter anorganisch gebundener Kohlenstoff („total inorganic carbon“)
TOC:	gesamter organisch gebundener Kohlenstoff („total organic carbon“)
TS:	Trockensubstanz
vol-%:	Volumenprozent

1 Einleitung

Während die meisten Biomasse-Brennstoffe (Hackgut, Rinde, landwirtschaftliche Biomasse) sehr inhomogene Brennstoffeigenschaften und große Variationsbreiten bezüglich einiger feuerungstechnisch relevanter Parameter (z. B. Wassergehalt, Aschegehalt, Energiedichte) zeigen, bewegen sich diese Schwankungen bei Holzpellets aufgrund der strengen Eingrenzungen durch Brennstoffnormen (DIN EN ISO 17225-2) [14] und Qualitätssiegel wie das ENplus in einem engen Band. Diese genaue Spezifikation des Brennstoffs ermöglicht auch eine deutlich weniger komplexe und kompaktere Bauweise von Pellet-Kleinfeuerungen im Vergleich zu z. B. Hackgutkesseln. Allerdings zeigen Erfahrungen mit dem Betrieb von Pellet-Kleinfeuerungen, dass offenbar bislang noch nicht beachtete und weitgehend unerforschte Brennstoffeigenschaften von Holzpellets negative Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb, speziell auf die Emissionen, haben können [80] [94].

Durch die anhaltend niedrigen Gas- und Heizölpreise, die starke Konkurrenz durch Wärmepumpen sowie die anhaltenden Diskussionen bezüglich der Staubemissionen waren in den vergangenen Jahren Markteinbrüche beim Absatz von Pelletkesseln zu vermerken. Um die Konkurrenzfähigkeit wieder zu verbessern, müssen die Hersteller bei der Entwicklung neuer Technologien für die Verbrennung von Holzpellets in Kesseln oder Öfen speziell auf eine weitere Kostenreduktion hinarbeiten. Dies ist aber nur möglich, wenn Informationen über bislang noch nicht ausreichend untersuchte relevante Einflussfaktoren auf das Verbrennungsverhalten von Holzpellets verfügbar gemacht werden. Außerdem können verbesserte Simulationstechniken, im Speziellen CFD (Computational Fluid Dynamics – numerische Strömungsberechnung), wesentlich zu einer erhöhten Entwicklungssicherheit beitragen. Diese Simulationstechniken sind, was die Gasphasenverbrennung angeht, Stand der Technik. Die Modellierung des Brennstoffbett-Abbrands und damit die konkrete Einbeziehung von Schwankungen der Brennstoffqualität können aber derzeit noch nicht mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt werden.

2 Zielsetzung und Aufbau des Projekts

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt FuturePelletSpec die im Folgenden angeführten übergeordneten Zielsetzungen. Es ist dabei zu beachten, dass das Projekt in zwei Stufen durchgeführt werden soll. Teil 1, der durch diesen Antrag abgedeckt wird, soll Grundlagenuntersuchungen realisieren. Nach erfolgreichem Abschluss von Teil 1 sollen in einem anschließenden Teil 2 („Prüfung und Bewertung der Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis sowie Ergebnisverbreitung“) die weiteren Schritte erfolgen, wobei u. a. das erreichbare Anlagenoptimierungspotenzial ermittelt, Schnelltestmethoden erarbeitet und darauf aufbauend Normungs- und Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt werden. Im Folgenden sind zunächst nur die Zielsetzungen des beantragten ersten Teils „Grundlagenuntersuchungen“ angeführt.

- Untersuchung bislang noch nicht ausreichend erforschter bzw. völlig unerforschter Eigenschaften des Brennstoffs Holzpellets, die relevante negative Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess haben.
- Screening prinzipiell anwendbarer Schnellbestimmungsmethoden für die betreffenden Brennstoffparameter.
- Entwicklung eines Brennstoffbett-Abbrandmodells für Holzpellet-Festbettfeuerungen, das erstmals auch eine transiente Simulation des Brennstoffbettabbrandes erlaubt, welche die als kritisch identifizierten Brennstoffeigenschaften berücksichtigt und somit eine deutlich bessere Grundlage für die CFD-gestützte Feuerungsentwicklung darstellen soll als gängige, in der Regel empirische, Abbrandmodelle. Um den gesamten Verbrennungsprozess simulieren zu können, ist die Kopplung des Abbrandmodells mit einem bestehenden Gasphasenverbrennungsmodell vorgesehen. Mit diesem neuen Abbrandmodell für Holzpelletschüttungen soll es erstmals ermöglicht werden, Ursachen-Wirkungs-Ketten zwischen relevanten Brennstoffeigenschaften und dem Verbrennungsprozess im Detail zu untersuchen.
- Auf der neuen Information zu Holzpelleteigenschaften und auf Sensitivitätsanalysen mit dem neuen Abbrandmodell aufbauend, sollen die Auswirkungen kritischer Brennstoff-spezifischer Parameter auf den Feuerungsbetrieb evaluiert werden.
- Erarbeitung eines erweiterten Holzpellet-Brennstoffdatenbestands, der unterschiedliche im Projekt untersuchte Sortimente zusätzlich zu den derzeit üblichen Bewertungsparametern auch anhand der im Projekt identifizierten neuen Parameter charakterisiert.
- Auf den genannten Arbeiten aufbauend sollen Vorschläge für zukünftige Testbrennstoffe für Typenprüfungen von Feuerungen für Holzpellets ausgearbeitet werden, die eine bessere Vergleichbarkeit der Testergebnisse ermöglichen und die Anfälligkeit für brennstoffbedingte Manipulationen verringern sollen.

Die Verwertung der Projektergebnisse soll nach erfolgreichem Abschluss der Arbeiten in einem anschließenden Teil 2 erfolgen, der sich mit der Prüfung und Bewertung der An-

wendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis, der Entwicklung geeigneter Schnelltestmethoden für relevante neue Parameter sowie Normungs- und Öffentlichkeitsarbeit auseinandersetzt. Schlussendlich zielt das Projekt somit auf mehrere Zielgruppen ab. Zum einen sollen die Ergebnisse des Projektes zu einer verbesserten Charakterisierung von Holzpellets hinsichtlich feuerungstechnisch problematischer Parameter beitragen und dementsprechend ebenso wie die neuen Schnellbestimmungsmethoden für diese Parameter in zukünftige Normungstätigkeiten mit einfließen. Die im Teil 2 des Projektes geplante Entwicklung eines Leitfadens für die Berücksichtigung kritischer Brennstoff-spezifischer Parameter bei der Entwicklung von Low-Cost Low-Emission Pelletfeuerungstechnologien sowie der aus Teil 1 resultierende und im Teil 2 weiter verdichtete neue erweiterte Holzpellet-Brennstoffdatenbestand sollen auf der TFZ-Webpage und den entsprechenden Verbreitungsplattformen des DEPI online verfügbar gemacht werden und so der gesamten Branche der Biomassekessel- bzw. Feuerungshersteller zugutekommen. Insgesamt sollen die Projektergebnisse im Zuge von Projektteil 2 und danach durch Vorträge bei Workshops/Konferenzen einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden.

Die zur Erreichung der Zielsetzungen von Teil 1 („Grundlagenuntersuchungen“) entwickelte Methodik sieht eine weitgehend parallele und stark vernetzte Bearbeitung von experimentellen Untersuchungen und Modellentwicklung vor. So sollen die Ergebnisse der vorwiegend vom TFZ durchgeführten experimentellen Arbeiten wichtige Grundlagendaten für die vom Unterauftragnehmer BIOS durchgeführten Modellentwicklungen liefern. Die Ergebnisse der von BIOS mit den neu zu entwickelnden Modellen durchgeführten Sensitivitätsanalysen bezüglich relevanter Parameter sollen wiederum das TFZ bei der Interpretation der Testlaufergebnisse unterstützen. Diese Simulationen ermöglichen es erstmals, Ursachen-Wirkungs-Ketten zwischen Brennstoffeigenschaften und Feuerungsbetrieb darzustellen. Die im Projektteil 1 erarbeiteten experimentellen Daten und Modelle sollen dann die Basis für Teil 2 des Projekts bilden. Die Einbindung des DEPI soll dabei nicht nur eine entsprechende Industrienähe der Arbeiten und eine breite Verwertbarkeit der Ergebnisse sicherstellen, sie ist auch für die Umsetzung des Arbeitsplans mit definierter Roh- und Brennstofflieferung innerhalb eines verbindlichen Zeitplans erforderlich.

Um die geschilderten Zielsetzungen zu erreichen, wurde ein Arbeitsplan, bestehend aus insgesamt vier Arbeitspaketen (AP) aufgestellt:

AP 1: Projektmanagement (TFZ),

AP 2: Pellet-Brennstoffcharakterisierung (TFZ/BIOS),

AP 3: Entwicklung eines transienten und lokal aufgelösten Brennstoffbett-Abbrandmodells für Pelletfeuerungen samt Kopplung mit einem bestehenden Gasphasenverbrennungsmodell sowie Modellvalidierung (BIOS),

AP 4: Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit dem neuen Brennstoffbett-Abbrandmodell zur Untersuchung von Trends und von Ursachen-Wirkungs-Ketten (BIOS).

In diesem Bericht werden lediglich die experimentellen Arbeiten von TFZ und BIOS im Arbeitspaket 2 dargestellt. Die Arbeiten zur Modellentwicklung (AP 3) sowie der Sensitivitätsanalyse (AP 4) finden sich im separaten Berichtsteil II.

3 Stand des Wissens und der Technik

3.1 Charakterisierung von Holzpellets

Die Qualitätsanforderungen an Holzpellets sind in der DIN EN ISO 17225-2 [14] geregelt. In dieser Norm ist eine Reihe von Kriterien angeführt, die es Pelletproduzenten, Feuerungsherstellern und Endkunden ermöglichen sollen, einen Brennstoff entsprechend seinen wesentlichen feuerungstechnisch relevanten Eigenschaften zu kennzeichnen bzw. einzuordnen.

Tabelle 1: Holzpelletcharakterisierung gemäß DIN EN ISO 17225-2

Eigenschaftsklasse Normativ	Bestimmungsverfahren	Einheit	Anmerkungen
Herkunft und Quelle	ISO 17225-1 [13]		z. B. Stammholz, chemisch, unbehandelte Holzrückstände, Vollbäume ohne Wurzeln, Waldrestholz, Wald- und Plantagenholz sowie anderes naturbelassenes Holz, Industrie-Restholz, chemisch unbehandeltes Gebrauchtholz
Durchmesser D und Länge L	ISO 17829 [22]	mm	relevant bzgl. Brennstofftransport in Förderaggregaten, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung
Wassergehalt M	ISO 18134-1 [18], ISO 18134-2 [30]	m-%, ar	relevant bzgl. Heizwert, Lagerfähigkeit, Verbrennungstemperaturen
Aschegehalt A	ISO 18122 [25]	m-%, d	relevant bzgl. Entaschungssystem, Grobstaubemissionen
Mechanische Festigkeit DU	ISO 17831-1 [24]	m-%, ar	relevant bzgl. Fördertechnik, Grobstaubemissionen, Brennstoffaustag aus dem Brennstoffbett, Abbrandverhalten
Feingutanteil F	ISO 18846 [20]	m-%, ar	
Additive		m-%	
Heizwert H _u	ISO 18125 [28]	MJ/kg oder kWh/kg, ar	relevant bzgl. des Energieinhalts des Brennstoffs und damit wichtig bzgl. Brennstoffförderung und Brennstoffeinschub
Schüttdichte BD	ISO 17828 [26]	kg/m ³ , ar	
Stickstoff (N)	ISO 16948 [19]	m-%, d	relevant bzgl. der NO _x -Emissionen
Schwefel (S), Chlor (Cl)	ISO 16994 [17]	m-%, d	relevant bzgl. des Niedertemperatur- und des Hochtemperatur-Cl-Korrosionsrisikos
Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Zink (Zn)	ISO 16968 [16]	mg/kg, d	feuerungstechnisch von untergeordneter Relevanz; erhöhte Gehalte dieser Elemente weisen auf den Einsatz nicht naturbelassener Fraktionen hin
Informativ			
Asche-Schmelzverhalten	DIN EN ISO 21404 [31]	°C	relevant hinsichtlich Schlackebildung im Brennstoffbett

In Tabelle 1 sind bisher limitierte Parameter zusammengestellt. Des Weiteren ist für jedes genannte Kriterium auch kurz erläutert, welchen Einfluss es auf den Verbrennungsprozess hat. Zur Bestimmung der genannten Brennstoffeigenschaften werden definierte Prüfverfahren und Prüfnormen verwendet.

Neben der Norm für Holzpellets sind in Tabelle 2 auch die Anforderungen von zwei Zertifizierungssystemen aufgeführt. Zum einen ist dies der *DINplus*-Standard, der von dem Unternehmen DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH entwickelt wurde. Um das *DINplus*-Label zu erhalten, muss der Pellethersteller der Prüfstelle eine Probe seiner Pellets zur Verfügung stellen, die dann auf die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter hin untersucht wird. Werden alle Voraussetzungen eingehalten, erhält der Hersteller von DIN CERTCO ein für fünf Jahre gültiges Zertifikat. Das Zertifikat kann um jeweils fünf Jahre verlängert werden, wenn die Herstellerfirma der Holzpellets alle Überwachungsmaßnahmen ordnungsgemäß durchführt. Diese werkseigene Produktionskontrolle wird von DIN CERTCO jährlich überprüft. Zugleich wird eine Stichprobe genommen und auf die relevanten Parameter hin untersucht [37].

Das zweite in Tabelle 2 dargestellte Zertifikat ist der *ENplus*-Standard. Diese Zertifizierung findet heute weltweit Verwendung. Der Grundgedanke hinter dem *ENplus*-Standard und damit auch der wichtigste Unterschied zur *DINplus*-Zertifizierung ist, dass bei *ENplus* neben dem Produkt selbst auch die nötigen Prozesse und das Managementsystem berücksichtigt werden. Konkret heißt das, dass auch die Brennstoffhändler mit der Logistik in den Zertifizierungsprozess eingebunden werden. Durch diese Verfahrensweise soll eine hohe Qualität der Pellets auf dem gesamten Weg bis zum Endverbraucher sichergestellt werden. Eine weitere Besonderheit bei diesem Zertifikat ist, dass bei der Qualitätsklasse A1 eine Mindestanforderung für die Ascheerweichungstemperatur von mindestens 1.200 °C definiert ist. Die Ascheerweichungstemperatur hat maßgeblichen Einfluss auf den störungsfreien Betrieb einer kleinen Pelletfeuerung. Das *ENplus*-Qualitätssiegel, das derzeit über 90 % der in Deutschland produzierten und fast die Hälfte der im Land gehandelten Pellets tragen, wird in Deutschland von der Deutschen Pelletinstitut GmbH (DEPI) vergeben. Von dort ausgehend werden die zertifizierten Unternehmen jährlich einer Werkskontrolle unterzogen. Daneben müssen die betreffenden Firmen auch eine interne Qualitätskontrolle durchführen und die Mitarbeiter sind verpflichtet, Schulungen zu absolvieren [34].

Tabelle 2: Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut einschlägiger Normen und Zertifizierungen (Stand 2020) [14] [34] [37]. *d* = wasserfrei, *ar* = im Anlieferungszustand, *m*-% = Masseprozent, *k. A.* = keine Angaben

Eigenschaftsklasse	DIN EN ISO 17225-2 A1	DINplus	ENplus A1
Herkunft und Quelle	Stammholz, chemisch unbehandelte Holzrückstände	k. A.	Stammholz, chemisch unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie
Durchmesser <i>d</i> [mm]	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1
Länge <i>l</i> [mm]	3,15 ≤ <i>l</i> ≤ 40 ¹	3,15 ≤ <i>l</i> ≤ 40	3,15 ≤ <i>l</i> ≤ 40
Wassergehalt [m-%]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Aschegehalt (<i>d</i>) [m-%]	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7
Mech. Festigkeit [m-%]	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 98
Feinanteil [m-%]	≤ 1,0	≤ 1,0 (Schüttgut) ≤ 0,5 (Sackware bis 20 kg)	≤ 1,0 (Schüttgut) ≤ 0,5 (Sackware)
Additive (<i>d</i>) [m-%]	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben ²
Heizwert <i>H_u</i> (<i>ar</i>) [MJ/kg]	≥ 16,5	≥ 16,5	16,5 ≤ <i>H_u</i> ≤ 19 ²
Schüttdichte (<i>ar</i>) [kg/m ³]	≥ 600	≥ 600, ≤ 750	≥ 600, ≤ 750
Stickstoff (<i>d</i>) [m-%]	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3
Schwefel (<i>d</i>) [m-%]	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04
Chlor (<i>d</i>) [m-%]	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02
Arsen (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cadmium (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Chrom (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Kupfer (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Blei (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Quecksilber (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zink (<i>d</i>) [mg/kg]	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Asche-Schmelzverhalten [°C]	Sollte angegeben werden	Erweichungstemperatur ≥ 1.200	Erweichungstemperatur ≥ 1.200

¹ Die Masse an Pellets > 40 mm darf 1 m.-% betragen. Überlange Pellets müssen ≤ 45 mm sein.

² Die Menge der Additive in der Produktion ist auf 1,8 m-% beschränkt, die Menge der Additive, die nach der Produktion eingesetzt werden (z. B. Beschichtungsöle), ist auf 0,2 m-% beschränkt.

Die in Tabelle 2 dargestellten Anforderungen beziehen sich auf den Zeitpunkt der Probenahme und der Analysen im Jahr 2019/2020. In Deutschland sind in automatisch beschickten Kleinf Feuerungsanlagen für den Brennstoff 5a (Holzpellets) nur „Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts und Holzpellets nach der inzwischen eingezo-

genen DIN 51731, Ausgabe Oktober 1996, oder in Form von Holzpellets nach den brennstofftechnischen Anforderungen des DINplus-Zertifizierungsprogramms „Holzpellets zur Verwendung in Kleinf Feuerstätten nach DIN 51731-HP 5“, Ausgabe August 2007, sowie „andere Holz briketts oder Holzpellets aus naturbelassenem Holz mit gleichwertiger Qualität“ zulässig [10].

3.2 Brennstoffindizes zur Abschätzung des Verbrennungsverhaltens

Für eine erste Abschätzung des Verbrennungsverhaltens biogener Festbrennstoffe können Brennstoffindizes, basierend auf der Elementarzusammensetzung der Brennstoffe, herangezogen werden [84] [54]. Dazu zählen:

Stickstoffgehalt. Die Stickoxidemissionen (NO_x) werden direkt vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs beeinflusst, sie fallen somit höher aus, wenn mehr Stickstoff im Brennstoff enthalten ist [52] [85]. Das Niveau der NO_x -Emissionen wird zu einem geringen Teil von der eingesetzten Feuerungstechnik beeinflusst [52].

Summe der Aerosolbildner. Als Indikator für die Höhe der Gesamtstaubemissionen mit einem Partikeldurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ (PM1) sowie für die Bildung von Ablagerungen (z. B. Wärmetauscher) wird, ausgehend von einer Elementaranalyse des Brennstoffs, die Summe der Aerosolbildner ($\sum(\text{K}, \text{Na}, \text{Pb}, \text{Zn})$) herangezogen [84] [54]. Bei biogenen Festbrennstoffen ist hier vor allem das Element Kalium relevant, das im Fall holzartiger Biomasse häufig $> 90 \text{ m-\%}$ der aerosolbildenden Elemente ausmacht [35].

Molares Si/K-Verhältnis. Die Kaliumfreisetzung in die Gasphase kann über die Berechnung des molaren Si/K-Verhältnisses abgeschätzt werden. Bei Werten unter 2,5 erfolgt eine erhöhte Kaliumfreisetzung in die Gasphase, während für Werte über 2,5 eine Einbindung von Kalium in die Asche dominiert [54].

Molares Cl/Si-Verhältnis: Es erlaubt ebenfalls eine Abschätzung der Kaliumfreisetzung in die Gasphase, wobei steigende Werte des Cl/Si-Verhältnisses auf eine erhöhte Kaliumfreisetzung hindeuten [8].

Molares $(\text{Si} + \text{P} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg})$ -Verhältnis. Dieses Verhältnis erlaubt eine Abschätzung des Ascheerweichungsverhaltens. Für Werte von über 2,5 sind typischerweise niedrige Ascheschmelztemperaturen zu erwarten [84].

Im Unterschied zu den reinen Brennstoffen ist bei der Verwendung von Kaolin die Aluminiumkonzentration in den additivierten Brennstoffen deutlich höher. Dies hat eine wirksame Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur zur Folge. Aus diesem Grund sollte für die Abschätzung der Ascheerweichungstemperatur bei additivierten Brennstoffen das molare $(\text{Si} + \text{P} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al})$ -Verhältnis verwendet werden [8] [85]. Das Gleiche trifft auf Brennstoffe mit einem baumartspezifischen erhöhten Aluminiumgehalt, wie beispielsweise Kiefer, zu [35] [36].

3.3 Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffparameter auf die Emissionen von Kleinfeuerungsanlagen

Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass die derzeit zur Standardisierung angewendeten Parameter für Holzpellets (siehe Tabelle 2) nicht ausreichend sind. Eine Studie des TFZ [80] zeigte große Auswirkungen unterschiedlicher Pelletsortimente auf die Emissionen an einem Pelletofen, insbesondere in Bezug auf die Staubemissionen (Abbildung 1). Obwohl in dieser Studie nur *ENplus-A1*-Pellets verwendet wurden, lagen die Staubemissionen eines 8 kW-Pelletofens zwischen 45 und 203 mg/Nm³. Da keine Korrelation zwischen den Staubemissionen und den derzeit geregelten Brennstoffparametern (z. B. Asche- und Wassergehalt), dem Gehalt an aerosolbildenden Elementen oder physikalischen Eigenschaften (z. B. Schüttdichte, mittlere Pelletlänge, Feinanteil) festgestellt werden konnte, besteht der naheliegende Verdacht, dass der aktuell angewendete Parametersatz für die feuerungstechnische Brennstoffcharakterisierung nicht ausreicht. Vergleichbare Sensitivitäten gegenüber sich ändernden Brennstoffqualitäten wurden auch bei Pelletkesseln beobachtet [94]. Hier wurde eine Korrelation der Staubemissionen und CO-Emissionen mit dem K/Na-Verhältnis dargestellt.

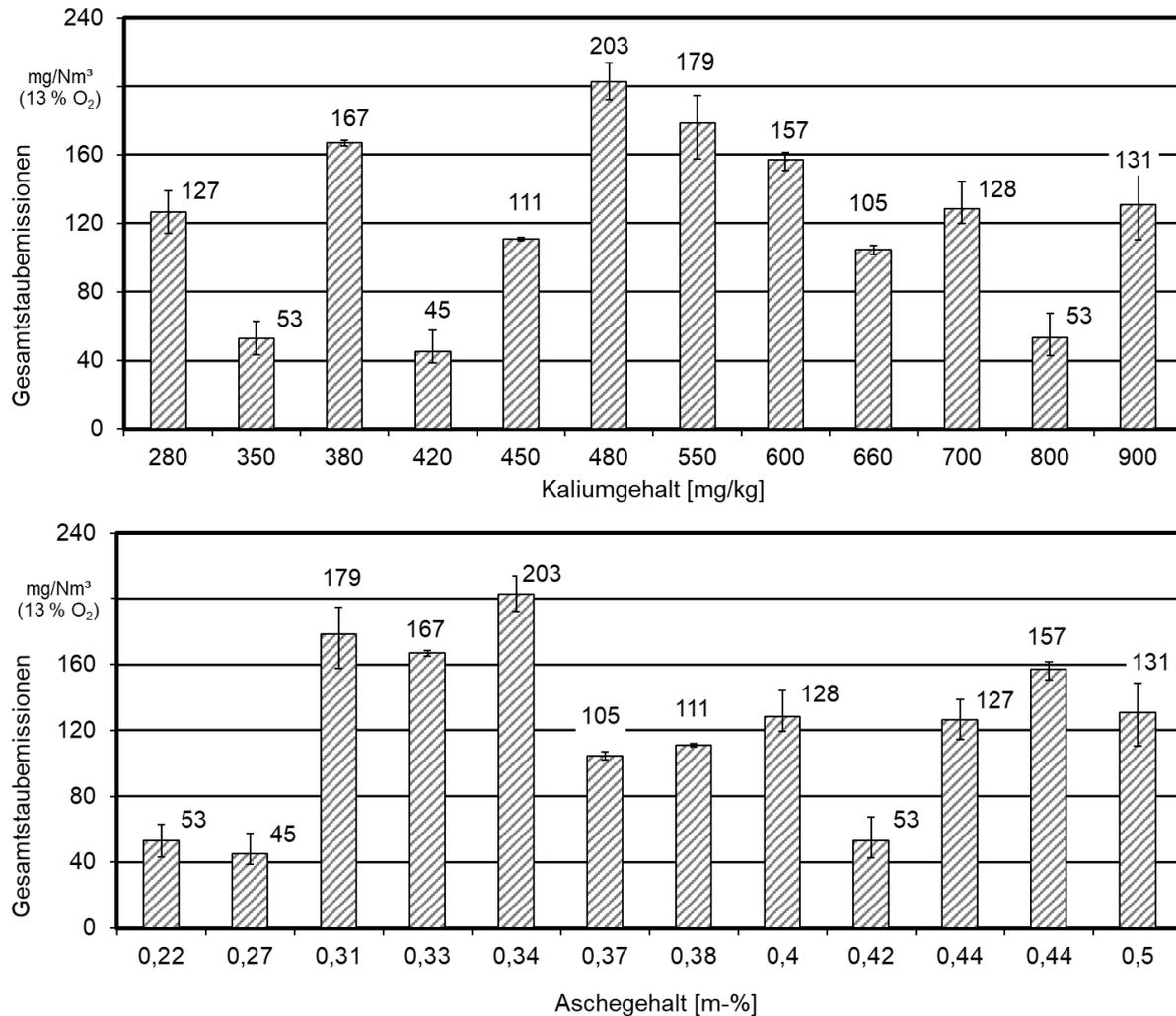


Abbildung 1: Brennstoffbedingte Partikelemission – Ergebnisse einer Serienuntersuchung marktgängiger Holzpellets an einem Pelletofen, aufsteigend sortiert nach Kaliumgehalt (Bild oben) und nach Aschegehalt im Brennstoff (Bild unten) (nach [80])

Einfluss der Pelletlänge. Der Einfluss der Pelletlänge [95] [82] und des Pelletdurchmessers [53] auf die Emissionen von Pellet-Einzelraumfeuerungen war bereits Bestandteil einiger Untersuchungen.

Nach WÖHLER ET AL. [95] führen Sortimente mit sehr langen Pellets in Pelletöfen zu einem geringeren Brennstoffmassenstrom in die Brennkammer, wodurch sich automatisch die Wärmeleistung und die Temperaturen in der Brennkammer reduzieren. Dadurch führen nach dieser Untersuchung längere Pellets zu höheren gasförmigen Emissionen und mehr Gesamtstaub. Die Regelungsparameter (z. B. Schneckendrehzahl oder Luftzufuhr) der Pelletöfen wurden dabei nicht vor den Messungen auf die jeweilige Pelletlänge und veränderte Schüttdichte des verwendeten Brennstoffs angepasst.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt die Untersuchung von SIKANEN ET AL. [82]. Hier führte, bei identischer Einstellung für Schneckendrehzahl und Luftmenge, eine Erhöhung der mittleren Pelletlänge zu einem Abfall der Brennraumtemperatur um 31 % bzw. der Abgastem-

peratur am Abgasstutzen um 25 %. Auch wird beschrieben, dass kürzere Pellets zu einer gleichmäßigeren Beschickung durch die Förderschnecke führen und damit einen weniger stark fluktuierenden Abbrand begünstigen. Es wird vermutet, dass die größere Oberfläche kürzerer Pellets sich positiv auf den Abbrand auswirkt, während lange Pellets manchmal im Brennertopf die Flamme unterdrücken, weil das Zünden langer Pellets länger dauert. Eine Zunahme der Gesamtstaubemissionen bei zunehmender Pelletlänge mit einer Ausnahme wurde ebenfalls bei KHALSA ET AL. [53] für einen Pelletofen beobachtet. Die geringsten Staubemissionen wurden für die Mischung aller Längenklassen für Pellets mit einem Durchmesser von 4 mm und 6 mm festgestellt.

Einfluss des Pelletdurchmessers. Bei den Untersuchungen zum Einfluss des Pelletdurchmessers (4 mm und 6 mm Pellets) an einem Pelletofen ergab sich laut KHALSA ET AL. [53] ein positiver Effekt im Hinblick auf die Gesamtstaubemissionen und NO_x-Emissionen, wenn vorher eine Anpassung der Förderschnecke auf 4 mm-Pellets erfolgt war. Dieser war vor allem im Teillastbereich deutlich. Bei den CO-Emissionen lagen die 4 mm-Pellets auf einem höheren Niveau als die 6 mm-Pellets. Allerdings wurde hier für die Herstellung der 4 mm- und 6 mm-Pellets Rohmaterial mit einem unterschiedlichen Gehalt an Aerosolbildnern und einem deutlich unterschiedlichen Si/K-Verhältnis verwendet, was die Ergebnisse stark infrage stellt.

Einfluss des Wassergehalts. Der Einfluss des Wassergehalts von Holzpellets in einem Pelletkessel wurde bereits von DÖHLING ET AL. [39] untersucht. Dabei wurde der Wassergehalt zwischen 2,9 und 12,1 m-% variiert. Im Wesentlichen wurde hier eine Erhöhung der Gesamtstaubemissionen mit steigendem Wassergehalt (im Rohgas) festgestellt. Diese konnte auf eine höhere Kaliumfreisetzung mit zunehmendem Wassergehalt zurückgeführt werden. Bei den gasförmigen Emissionen wurde sowohl für sehr niedrige (2,9 m-%) als auch für höhere (12,1 m-%) Wassergehalte eine Erhöhung festgestellt. Im mittleren Bereich zwischen ca. 6 und 8 m-% wurden wesentlich niedrigere gasförmige Emissionen festgestellt.

Einfluss der Holzart bzw. des Wuchsorts. Auch der Einfluss der Holzart wurde von DÖHLING ET AL. [39] betrachtet. Hierbei wurden Fichtenpellets von drei verschiedenen Standorten sowie Kiefernpellets und Pappelpellets untersucht. Die Untersuchungen ergaben stark unterschiedliche Gesamtstaubemissionen zwischen den Holzarten, wobei Pappel die höchsten Staubemissionen verursachte. Aber auch zwischen den Fichtensortimenten wurden standortabhängig stark unterschiedliche Gesamtstaubemissionen gemessen. Diese Unterschiede ließen sich weitestgehend auf die Gehalte aerosolbildender Elemente (v. a. K) sowie aerosolbindender Elemente (v. a. Si) zurückführen. Diese Untersuchung deckt nur zwei für die Pelletierung von A1-Pellets relevante Nadelhölzer ab, da die verwendete Pappel wegen des hohen Aschegehalts nicht für diese Qualitätsklasse geeignet war.

In SCHMIDT ET AL. [79] wurden Tannen-, Buchen- und Eichenpellets in einem 6 kW-Pelletofen unter Nennlastbedingungen verbrannt. Dabei wurden die geringsten CO- und Staubemissionen für die Tannenpellets nachgewiesen, gefolgt von den Eichenpellets und Buchenpellets. Zusätzlich wurden von SIPPULA ET AL. [83] Pellets aus fünf verschiedenen

Holzarten mit und ohne Rinde in einem Pelletofen verbrannt und hinsichtlich der Emissionen untersucht. Es zeigte sich, dass die CO-Emissionen für die Holzarten Fichte und Kiefer geringer ausfielen als für Erle, Birke und Weide. Die niedrigsten Gesamtstaubemissionen wurden für Kiefer, Fichte und Birke nachgewiesen, wohingegen deutliche höhere Gesamtstaubemissionen für Erle und Weide nachgewiesen wurden. In beiden Veröffentlichungen konnte ein Zusammenhang zwischen dem Kaliumgehalt im Brennstoff und den Gesamtstaubemissionen nachgewiesen werden [79] [83].

Einfluss des Aschegehalts. Bei den Untersuchungen von DÖHLING ET AL. [39] wurde auch der Aschegehalt durch Zugabe von Rinde variiert. Während durch die Erhöhung des Aschegehalts von ca. 0,6 m-% auf ca. 1,1 m-% durch Zugabe von 10 m-% Rinde ein deutlicher Anstieg der Gesamtstaubemissionen beobachtet wurde, führte eine weitere Erhöhung des Aschegehalts bzw. des Rindenanteils zu einer Reduzierung der Gesamtstaubemissionen gegenüber der Referenz (ca. 0,6 m-%). Dies ist auf das durch die Zugabe von Rinde erhöhte Si/K-Verhältnis und damit die Einbindung von Aerosolbildnern in die Asche (Unterkapitel 3.2) zurückzuführen. Alle zur Referenz untersuchten Aschegehalte liegen allerdings außerhalb der Spezifikationen der A1-Qualität von Holpellets und die Referenz mit ca. 0,6 m-% schon sehr nahe am Grenzwert von 0,7 m-%, weshalb diese Ergebnisse nicht auf die heute marktgängigen Pellets übertragbar sind.

In SIPPULA (2007) [83] wurde auch der Aschegehalt von fünf verschiedenen Holzarten variiert, indem zum einen das Stammholz und zum anderen die Rinde pelletiert wurde. Es zeigte sich, dass bei der Verbrennung der Rindenpellets deutlich höhere CO- und Gesamtstaubemissionen freigesetzt wurden.

Einfluss des Feinanteils. Ein steigender Feinanteil bis zu 20 % wirkte sich in einem 25 kW-Pelletkessel mit Unterschub nicht auf die Gesamtstaubemissionen aus. Im Gegensatz dazu stiegen die CO-Emissionen sowie die NO_x-Emissionen mit zunehmendem Feinanteil an [42].

3.4 Einfluss von Bindemitteln, Additiven und mineralischen Verunreinigungen auf die Verbrennung

Im ENplus-Handbuch werden Anforderungen an Additive definiert. Additive werden während der Pelletproduktion in den Rohstoff gemischt, um die Qualität, den Stromverbrauch und den Materialdurchsatz positiv zu beeinflussen. Der Anteil an Additivzugabe während der Produktion ist dabei auf maximal 1,8 m-% beschränkt [34].

Im folgenden Text werden die Additive wie in ENplus angegeben in Bindemittel (Stärken, Pflanzenmehle etc.) und Additive (hier Kaolin) zur Verbesserung der Verbrennungsqualität unterschieden.

Einfluss von Bindemitteln. Der Einsatz von Bindemitteln während der Pelletierung soll den Pelletierprozess durch eine Beeinflussung der Pressguteigenschaften und/oder eine Erhöhung der Festigkeit der Pellets erreichen bzw. eine gleichmäßigere Pelletqualität trotz Schwankungen des Rohmaterials sicherstellen [52] [38]. Bisher wurden viele Arbei-

ten zum Einfluss solcher Bindemittel unterschiedlicher Herkunft auf die Pelleteigenschaften sowie den Pelletdurchsatz und den Energieverbrauch während des Pelletierprozesses durchgeführt [86] [3] [55]. In diesen Studien wird teilweise auch darauf hingewiesen, dass zur Klärung des Einflusses solcher Bindemittel auf die Emissionen und das Ascheschmelzverhalten Feuerungsversuche notwendig und sinnvoll wären [55] [86]. Diese wurden hier aber nicht durchgeführt. Lediglich bei einer Studie zum Einfluss des Bindemittels auf die Emissionen bei der Verbrennung von Baumwollstängeln zeigte sich für das Bindemittel Lignosulfat ein Anstieg der PM₁-Emissionen [96]. PICHLER ET AL. entwickelten 2009 ein enzymatisch-quantitatives Verfahren zur Stärkebestimmung in Holzpellets, mit dem sich der Stärkegehalt von Pellets verhältnismäßig präzise bestimmen lässt [75].

Einfluss von Additiven. Um die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs zugunsten niedrigerer Emissionen (v. a. Partikel bzw. Aerosole) sowie einer verringerten Störanfälligkeit durch Schlackebildung (eher nicht relevant für Holzpellets) positiv zu beeinflussen, kann ein Additiv, wie beispielsweise das Tonmineral Kaolin, dem Rohmaterial vor der Pelletierung beigemischt werden [52].

Wenn die Bildung partikelförmiger Emissionen beeinflusst werden soll, liegt das Hauptaugenmerk auf dem im Brennstoff enthaltenen Kalium (K), das üblicherweise zusammen mit Natrium (Na) den Hauptanteil der Aerosolbildner in fester Biomasse ausmacht, sowie auf dem Schwefel- (S) und Chlorgehalt (Cl). Über die sogenannten sekundären Bildungsreaktionen mit hoher Reaktivität (Formeln (3.1)–(3.3)) bilden sich bei der Verbrennung aus dem im Brennstoff enthaltenen K, S und Cl zunächst HCl_(g), SO_{2(g)} und bei Temperaturen über 1.200 °C KOH_(g). Diese bilden beim Abkühlen vorwiegend Kaliumsalze (K₂SO₄, KCl und K₂CO₃), die niedrige Schmelztemperaturen aufweisen und mit dem Abgasstrom mitgerissen werden. KCl (fest bei < 760 °C) und K₂SO₄ machen ca. 80 bis 90 % der gesamten anorganischen Aerosolfracht aus [52].



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

Bei den natriumhaltigen Komponenten kondensiert zunächst NaCl, gefolgt von Na₂SO₄ [52] bei fortschreitender Abkühlung.

Zur Verringerung der Kaliumsalzbildung stehen folgende Optionen zur Verfügung [52]:

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

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde Kaolin (Abschnitt 4.2.1) als aluminiumbasiertes Additiv verwendet. Aluminium bindet Kalium und Silizium in die Asche ein und erhöht damit den Ascheanfall. Neben aluminiumbasierten Zusatzstoffen wären auch Additive, die den Gehalt an Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel im Brennstoff erhöhen, wie beispielsweise Kalk, Magnesiumoxid, Calciumphosphate, Ammoniumsulfate, Aluminiumsulfate und Eisensulfate, denkbar [52].

Ascheschmelzverhalten. Aschen bestimmter Halmgutbrennstoffe, wie z. B. Stroh, können bereits ab Temperaturen von 900 °C schmelzen und daher kaum bis gar nicht in konventionellen Holzfeuerungsanlagen eingesetzt werden [52]. Bei Holzpellets der Qualitätsklasse A1 sollte nach *DINplus* und *ENplus* die Ascheerweichungstemperatur über 1.200 °C liegen, um einen kontinuierlichen Betrieb der Feuerung zu gewährleisten [34] [37]. Trotzdem treten in der Praxis Probleme durch Verschlackung und/oder Versinterung bei der Verbrennung von *ENplus*- oder *DINplus*-Holzpellets auf [70] [40]. Den größten positiven Einfluss auf die Ascheerweichungstemperatur scheinen aluminiumbasierte Additive zu haben [52]. Jedoch sind – abhängig von der Brennstoffzusammensetzung – auch auf Magnesium und Calcium basierende Additive geeignet, um das Ascheschmelzverhalten zu beeinflussen.

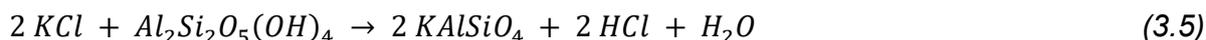
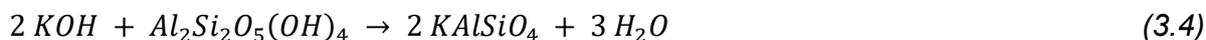
Zur Einbringung von Additiven in den Brennstoff gibt es verschiedene Möglichkeiten [49]:

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

Wirkweise und Berechnung der notwendigen Additivmenge am Beispiel Kaolin. Eine Kaolinbeimischung zum Brennstoff bewirkt meist eine verringerte Schlackebildung sowie eine Minderung der Feinstaubemissionen, erhöht aber den Aschegehalt des Brennstoffs. Die aus einschlägiger Literatur bekannten aerosolbildenden Elemente sind die Alkalimetalle Kalium (K) und Natrium (Na), die Spurenelemente Zink (Zn) und Blei (Pb) sowie Schwefel (S) und Chlor (Cl) [84] [59], wobei Kalium (K) dominiert.

K wird größtenteils während der Verbrennung als KOH und KCl in die Gasphase freigesetzt, aber auch kleinere Mengen an K_2SO_4 und K_2CO_3 können gebildet werden [51].

Kaolin ist ein Tonmineral und besteht zum größten Teil aus dem Mineral Kaolinit ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$). Alkalimetalle wie Kalium können in Anwesenheit von Kaolinit nach den Formeln (3.4)–(3.9) zu schwerschmelzenden kristallinen Verbindungen wie Kalsilit (KAlSiO_4) oder Leucit (KAlSi_2O_6) reagieren [73].



Folgt man den Reaktionsgleichungen (3.4)–(3.9), so wird deutlich, dass für die stöchiometrische Fixierung von 2 mol K in der Asche 1 mol $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ benötigt wird. Aus diesem Zusammenhang kann die für die Fixierung des Kaliums stöchiometrisch benötigte Menge an Kaolinit unter Verwendung der molaren Massen und des Kaliumgehalts in der Biomasse berechnet werden. Außerdem muss noch der Kaolinitgehalt im verwendeten Kaolin-Mehl (hier 78 m-%) berücksichtigt werden. Zusätzlich können weitere Sicherheitszuschläge einberechnet werden, um die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens und damit die Reaktion der Edukte (Kaolinit und Kaliumverbindungen) zu Kaliumaluminiumsilikaten zu erhöhen [6]. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass es auch zu Reaktionen zwischen Kaolinit und Erdalkali-Metallen (Ca und Mg) kommen kann, was vor allem bei calciumreichen holzartigen Brennstoffen berücksichtigt werden sollte. Zuletzt müssen auch die physikalischen Eigenschaften des Kaolins, wie z. B. Vermahlungsgrad und Wassergehalt, berücksichtigt werden. Alle diese Punkte beeinträchtigen die „Effektivität“ des eingebrachten Kaolinitis und erhöhen somit die benötigte Additivmenge im Brennstoff. Im

Projekt ERANET BIOFLEX! wurde in den erarbeiteten Guidelines zu dem Thema Brennstoffdesign folgende Berechnungsmethode entwickelt [7]:

- Umrechnung der aschebildenden Elemente der Biomasse und des Additivs von mg/kg, d auf mol/kg durch Division der Massenkonzentrationen durch die jeweiligen Molmassen (K: 39,10 g/mol, Na: 22,99 g/mol, Ca: 40,08 g/mol und Mg: 24,31 g/mol).
- Berechnung der theoretisch minimal nötigen Kaolinit-Menge $Additiv_{theo_min}$ (Formel (3.10)) in mol/kg der jeweiligen Biomasse, um alle Alkalimetalle zu binden (K und Na).

$$Additiv_{theo_min} = (K_{Brennstoff} + Na_{Brennstoff})/2 \quad (3.10)$$

- Berechnung der technisch mindestens erforderlichen Kaolinzugabemenge $Additiv_{level(I)}$ unter Berücksichtigung der Konzentrationen an K, Na, Ca und Mg im Additiv (K_{add} , Na_{add} , ...) durch Formel (3.11).

$$Additiv_{level(I)} = \frac{Additiv_{theo_min}}{\frac{Al_{add} - (K_{add} + Na_{add} + 2(Ca_{add} + Mg_{add}))}{Al_{add}}} \quad (3.11)$$

- Um weitere potenzielle Unsicherheiten und limitierende Effekte auf die Funktionalität, Verfügbarkeit und die Effizienz des Additivs zu berücksichtigen, kann ein Faktor von z. B. 90 % berücksichtigt werden (Formel (3.12)). Dieser Faktor sollte, basierend auf den spezifischen Gegebenheiten sowie den experimentellen Erfahrungen des Anwenders dieser Methode angepasst werden. Solche Gegebenheiten werden in den im Projekt ERANET BIOFLEX! erarbeiteten „Guidelines for advanced fuel and boiler design“ [7] beschrieben.

$$Additiv_{leve(II)} = \frac{Additiv_{level(I)}}{0,9} \quad (3.12)$$

Der positive Effekt von Kaolin wurde auch schon für Holzpellets mit Bindemittel bei sehr kleinen Dosierungen in einer Studie der Hochschule Rottenburg nachgewiesen [47]. In einer anderen Studie additivierten HÜLSMANN ET AL. [48] Buchenpellets mit 0,5 und 1,0 m-% Kaolin. Dies reduzierte die CO-Emissionen bei einem Pelletofen, führte jedoch bei einem Pelletkessel bei der mittleren Additivierungsstufe zu einer Reduktion, während es bei Zugabe von 1 m-% Kaolin zu einer Steigerung der CO-Emissionen kam. Bezüglich der Gesamtstaubemissionen wirkte sich die Kaolinzugabe beim Pelletkessel vorteilhaft aus, jedoch zeigte sich beim Pelletofen nur bei der mittleren Additivierungsstufe eine Verringerung der Gesamtstaubemissionen. Durch die Zugabe von Kaolin verschob sich auch die Korngrößenverteilung der Gesamtstaubemissionen hin zu kleineren Partikeln. Deshalb

soll in diesem Projekt zusätzlich überprüft werden, ob eine generelle Additivierung von Holzpellets mit minimalen Kaolinmengen für Kleinfeuerungen möglich und sinnvoll sein könnte.

Mineralische Verunreinigungen von Holzpellets. Ein Mineralbodeneintrag in biogene Festbrennstoffe kann während der Ernte, der Aufbereitung, der Lagerung oder des Transports geschehen. Bei einem Eintrag von Mineralboden in biogene Festbrennstoffe kann es zu vielfältigen Problemen bei der Verbrennung kommen. Dabei tritt eine erhöhte mechanische Belastung der Anlagen auf, aber auch eine Veränderung der inhaltsstofflichen Brennstoffzusammensetzung ein. Aufgrund von Mineralbodeneinträgen in biogene Festbrennstoffe kommt es zu einer Erhöhung des Aschegehalts und einer Verringerung des Heizwerts sowie, je nach Boden und Gestein, zu einer Anreicherung verbrennungskritischer Inhaltsstoffe, wie beispielsweise Si oder K [35]. Somit kann es bei der Verbrennung von mit Mineralboden verunreinigten Brennstoffen u. a. zu einer erhöhten Partikelemission (K), aber auch zu einer erhöhten Schlackebildung (K, Si) kommen. Gleichzeitig kann der Gehalt an Schwermetallen zunehmen, wodurch eine Verwertung oder Entsorgung der Aschen negativ beeinflusst wird.

Unter bestimmten Voraussetzungen könnte sich ein Eintrag mit Mineralboden aber auch positiv auf die Verbrennung auswirken, wenn dieser aluminiumbasierte Tonminerale (z. B. Kaolinit) enthält. Da es sich bei Mineralböden i. d. R. um Mischungen zahlreicher Materialien handelt, sind jedoch durchweg positive Effekte auf die Verbrennung eher nicht zu erwarten.

Insgesamt sind die Einflüsse, die ein Eintrag von Mineralboden auf die Verbrennung haben kann, vielfältig. Für einen störungsfreien und emissionsarmen Anlagenbetrieb sollte daher eine Verschmutzung der Brennstoffe vermieden werden [58].

4 Material und Methoden

Die Untersuchung möglicher Einflussparameter hinsichtlich der Verbrennung von Holzpellets wurde zweigeteilt. Einmal wurden 28 Sortimente marktverfügbarer Pellets hinsichtlich der Brennstoffparameter und in Feuerungsversuchen hinsichtlich der gasförmigen und der Gesamtstaubemissionen untersucht. In einer zweiten Versuchsreihe wurden Pellets aus Rohstoffen bekannter Herkunft und Holzart hergestellt und dabei gezielt bestimmte Brennstoffparameter variiert und ebenfalls Verbrennungsversuchen unterzogen.

4.1 Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 28 markterhältliche Pelletsortimente (siehe Tabelle 3) vom Markt (Brennstoffhändler und Baumärkte) oder direkt von den Pelletproduzenten bezogen. Alle untersuchten Pelletsortimente waren als *ENplus-A1*-Qualität deklariert. Insgesamt drei der 28 Pelletsortimente stammten von Betreibern einer Kleinfeuerungsanlage, die mit diesem Brennstoff Probleme beim Anlagenbetrieb durch Verschlackung oder erhöhtes Ascheaufkommen im Abgasweg hatten. Der Gesamtprobenumfang betrug jeweils 120 kg. Die meisten Pelletsortimente wurden in je acht 15 kg-Säcken bezogen. Jedes Sortiment wurde gemäß dem Vorgehen in Unterkapitel 4.3 analysiert und nach den Methoden in Unterkapitel 4.4 in mindestens einer Feuerungsanlage untersucht.

Tabelle 3: Übersicht der Pelletsortimente im Pelletscreening

Nr.	Produktionsort	Bezug von	Zertifikate laut Verpackung
1	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i>
2	Deutschland	Handel	<i>ENplus A1</i>
3	Deutschland	Betreiber	<i>ENplus A1</i>
4	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i>
5	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i> , <i>DINplus</i>
6	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i> , <i>DINplus</i>
7	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i> ,
8	Tschechien	Betreiber	<i>ENplus A1</i>
9	Litauen	Handel	<i>ENplus A1</i>
10	Polen	Handel	<i>ENplus A1</i> , <i>DINplus</i>
11	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i>
12	Deutschland	Hersteller	<i>ENplus A1</i>

Nr.	Produktionsort	Bezug von	Zertifikate laut Verpackung
13	Deutschland	Handel	ENplus A1
14	Deutschland	Handel	ENplus A1, PEFC
15	Deutschland	Handel	ENplus A1, PEFC
16	Deutschland	Hersteller	
17	Deutschland	Hersteller	ENplus A1, DINplus
18	Deutschland	Hersteller	ENplus A1
19	evtl. Import	Handel	ENplus A1
20	evtl. Import	Handel	ENplus A1
21	Deutschland	Hersteller	ENplus A1, DINplus
22	Deutschland	Hersteller	ENplus A1, DINplus
23	evtl. Import	Handel	ENplus A1
24	Deutschland	Betreiber	ENplus A1
25	evtl. Import	Handel	ENplus A1
26	Niederlande	Hersteller	ENplus A1, DINplus
27	Deutschland	Handel	ENplus A1
28	Litauen	Handel	ENplus A1, DINplus

4.2 Herstellung der Versuchspellets

4.2.1 Eingesetzte Rohstoffe

Zur Herstellung der Versuchsbrennstoffe wurden Rohstoffe mit bekannter Herkunft und Holzart in verschiedenen Lieferformen verwendet (siehe Tabelle 4). Um die in der Praxis häufig beobachtete Lagerhaltung großer Spanhaufen darzustellen, wurden dem TFZ zwei Bigbags feuchte Sägespäne zur Verfügung gestellt und einmal im Bigbag und einmal als kleine Menge von ca. 1 m³ je sieben Monate (Anfang Oktober 2019 bis Ende April 2020) im Freien gelagert. Alle vom Holz-Energie-Zentrum Olsberg zur Verfügung gestellten Rohstoffe (Sägespan, trocken zerkleinert, TPM-Hackgut und Sägespan feucht) stammten aus einer großen Brennstoffcharge und sollten daher homogen hinsichtlich der Inhaltsstoffe sein. Außerdem wurden bei einigen Versuchsbrennstoffen vor der Pelletierung Additive zum Rohmaterial zugegeben. Dabei wurden Stärken als Bindemittel und das Tonmineral Kaolin als Additiv zur Bindung des Aerosolbildners Kalium in der Asche [61] eingesetzt. Eine Zusammenstellung der bei der Pelletierung verwendeten Additive findet sich in Tabelle 5.

Tabelle 4: *Übersicht der eingesetzten Rohstoffe für die Pelletierung der Versuchsbrennstoffe*

Holzart	Lieferform	Herkunft / beschafft über
Fichte ohne Rinde	Sägespan, trocken, zerkleinert mit Hammermühle	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Fichte ohne Rinde	TMP-Hackgut für Papierindustrie	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Fichte ohne Rinde	Sägespan, feucht, zerkleinert mit Hammermühle, sieben Monate gelagert im Bigbag	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Fichte ohne Rinde	Sägespan, feucht, zerkleinert mit Hammermühle, sieben Monate gelagert als Miete	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Fichte mit Rinde	Fichtenrundlinge d < 12 cm, gewaschen	Zachersdorf, Bayern
Kiefer ohne Rinde	Kiefernbohlen, sägerau	Holzhandlung Pongraz Straubing-Bogen
Lärche ohne Rinde	Kappstücke von Terrassendiehlen, naturbelassen	Holzhandlung Pongraz Straubing-Bogen
Douglasie ohne Rinde	Sägespan, feucht	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Buche	Pellets ohne Bindemittel	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Buche	Buchenrundlinge d < 12 cm, gewaschen	Brennstoffhändler in Geiersthal
Eiche ohne Rinde	Eichenholzkappstücke, naturbelassen	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Eiche ohne Rinde	Eichensägespan, feucht	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Tropenholz	Pellets ohne Bindemittel	Holz-Energie-Zentrum Olsberg
Apfelholz	Hackgut, feucht	Apfelplantagen nördlich von Erfurt

Tabelle 5: *Übersicht der eingesetzten Additive für die Pelletierung der Versuchsbrennstoffe*

Additiv	Bezogen von / Herkunft	Bemerkungen
Weizenstärkehaltiges Mehl	Holz-Energie-Zentrum Olsberg	Stärkegehalt ca. 98 m-%, d
Weizenstärke, nativ	Schellinger KG	–
Kartoffelstärke, nativ	Südstärke GmbH	Stärkegehalt ca. 80 m-%, ar
Kartoffelstärke, abfallende Qualität	Südstärke GmbH	Stärkegehalt ca. 85 m-%, ar, hoher Anteil modifizierter Stärken
Kaolin CSP	Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG	Abfallprodukt bei der Kaolinherstellung mit 78 m-%, d Kaolinitgehalt

4.2.2 Eingesetzte Pelletiertechnik

Bei der am TFZ eingesetzten Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) handelt es sich um eine Flachmatrizenpresse (Abbildung 2). Die technische Spezifikation der Flachmatrizenpresse ist in Tabelle 6 zusammengestellt.



Abbildung 2: Aufbau der Pelletieranlage (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) am TFZ mit Materialzufuhr und Vibro-Rinne

Tabelle 6: Technische Spezifikationen der Pelletieranlage Amandus Kahl 33-390 [2]

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

Der Vorteil dieser Technik liegt darin, dass sie – mit den entsprechenden Matrizen – sowohl zur Zerkleinerung der Biomasse als Kollermühle als auch zum Pelletieren verwendet werden kann. Die Flachmatrizen bieten generell auch die Möglichkeit einer beidseitigen Verwendung. Hierbei handelt es sich um Matrizen mit konusförmigen Auslassbohrungen, die nach dem Wenden der Matrize als Einlasskonus wirken und zusätzlich einen „Schluck“ (trichterförmige Einführstrecke) aufweisen (Abbildung 3) [52]. Im Gegensatz dazu kommen im industriellen Maßstab in Deutschland vorwiegend Ringmatrizen zum Einsatz.

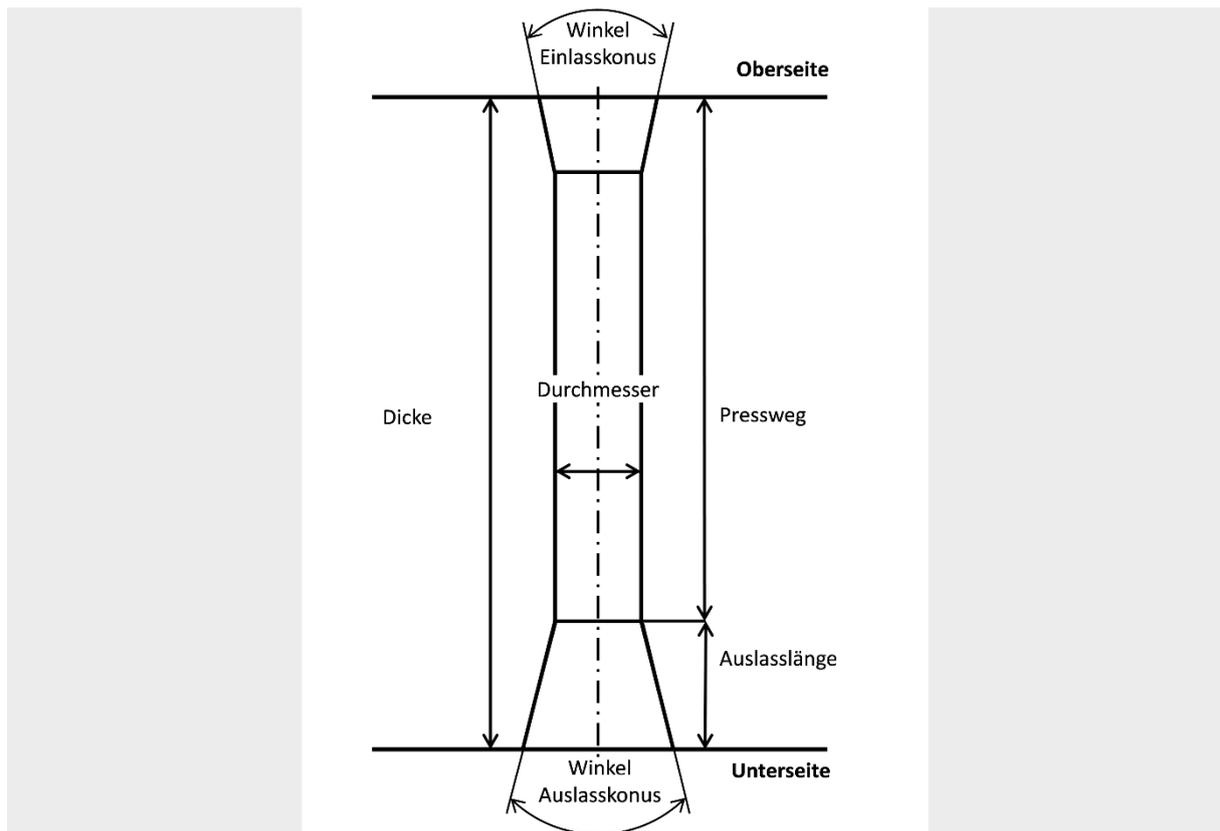


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Presskanals einer beidseitig nutzbaren Flachmatrize (Quelle: TFZ)



Abbildung 4: Exaktmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK) mit Wasserdosierung zur Befeuchtung des gemahlene Rohmaterials mit einer Weißel-Spritze, Waage und im Deckel des Mischers verbauten Düsen

Tabelle 7: Technische Spezifikationen des verwendeten Exaktmischers

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

Für die Konditionierung des zerkleinerten Materials mit Wasser und Additiv kam ein Exaktmischer (Stockmann Landtechnik GmbH, Typ 500 ESK) zum Einsatz (Abbildung 4). Die Wasserzugabe erfolgte dabei mittels einer Weißel-Spritze, die mit konstantem Druck über am Deckel des Probenmischers verbaute Düsen Wasser zugibt. Die zugeführte Menge an Wasser wird über die Masseänderung der Weißel-Spritze definiert. Hierzu wurde die Plattformwaage B2.2 der PESA WAAGEN GmbH mit einer Genauigkeit von 0,01 kg verwendet (Abbildung 4). Das Additiv wurde auf einer Plattformwaage mit einer Auflösung von 0,005 kg (PFK988-D600, Mettler Toledo GmbH) eingewogen. Die Zugabe des Wassers

bzw. Additivs erfolgte gleichmäßig während des Homogenisierungsprozesses über dafür vorgesehene Schlitze im Deckel des Exaktmischers. Zur Wasserzugabe vor der Pelletierung besteht die Möglichkeit, über eine in der Pelletieranlage integrierte und mit einem Durchflussrotameter versehene Dosiereinheit während des Pelletierens zusätzlich Wasser zuzugeben. Die Zerstäubungsdüsen sind direkt hinter dem Einfüllstutzen der Pelletieranlage positioniert. Die Einwaage der Biomasse erfolgte in großen Hartkunststoffkisten mittels einer Plattformwaage mit einer Auflösung von 0,005 kg (PFK988-D600, Mettler Toledo GmbH).

Zunächst wurden die Rohmaterialien in der Pelletieranlage zerkleinert, falls diese nicht schon zerkleinert geliefert worden waren. Anschließend wurde der Wassergehalt des gemahlenden Materials bestimmt. Die zerkleinerte Biomasse wurde dann mit einer definierten Menge Wasser im Exaktmischer vermischt und über Nacht stehen gelassen, um einen homogenen Wassergehalt für die Pelletierung zu gewährleisten. Additive wurden, sofern verwendet, in einem zweiten Schritt der bereits befeuchteten Biomasse hinzugegeben, um eine bessere Adhäsion des Kaolins an den Biomassepartikeln zu erzielen. Je nach Art der Biomasse bzw. Mischung und Additivgehalt muss zur Pelletierung bzw. Zerkleinerung die geeignete Matrize ausgewählt werden. Dafür standen am TFZ zwei Matrizen zur Zerkleinerung sowie vier Matrizen zum Pelletieren zur Verfügung (siehe Tabelle 8). Das angegebene Pressverhältnis ergibt sich entweder aus dem Verhältnis Lochdurchmesser zu Pressweg (oben) oder Lochdurchmesser zu Matrizenstärke (unten).

Die produzierten und untersuchten Längenverteilungen (Abschnitt 4.2.3) wurden durch das Holz-Energie-Zentrum Olsberg mit einer CPM-Pelletieranlage hergestellt. Dabei handelt es sich um eine Pelletieranlage mit Ringmatrize und zwei Kollern mit einer Durchsatzleistung von 3 t/h. Die verwendete Presskanallänge betrug 37 mm, außerdem wurde zur Einstellung der Pelletlänge eine einstellbare HD-Technik verwendet.

Tabelle 8: Technische Spezifikationen der am TFZ verfügbaren Matrizen

Matrizenstärke	[mm]	50	30	50	40	40	36	33
Lochdurchmesser	[mm]	12,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Beidseitig nutzbar	[-]	nein	ja	ja	ja	Ja	ja	ja
Einlasskonus oben	[°]	60,0	60,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Auslasskonus unten	[°]	–	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Pressweg	[mm]	12,0	6,0	36,0	30,0	27,0	24,0	18,0
Pressverhältnis oben	[-]	1:1,0	1:1,0	1:6,0	1:5,0	1:4,5	1:4,0	1:3,0
Pressverhältnis unten	[-]	–	1:5,0	1:8,3	1:6,6	1:6,6	1:6,0	1:5,5
Anwendung	[-]	Zerkleinern	Zerkleinern	Pelletieren	Pelletieren	Pelletieren	Pelletieren	Pelletieren

4.2.3 Übersicht der hergestellten Versuchsbrennstoffe

Aus den unter Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Rohstoffen wurden insgesamt 31 Versuchsbrennstoffe hergestellt. Die Sortimente 6 bis 9 (siehe Tabelle 9) wurden durch das Holz-Energie-Zentrum Olsberg gezielt für das Projekt mit der beschriebenen Pelletiertechnik hergestellt. Die Sortimente 26 und 30 wurden von extern zugekauft, wobei durch den Projektpartner DEPI gesicherte Aussagen zum eingesetzten Rohstoff getroffen werden konnten. Die restlichen Sortimente wurden alle am TFZ mit der unter Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Pelletiertechnik hergestellt. Bei den Sortimenten 2 bis 5 wurde lediglich Sortiment 1 verwendet und hinsichtlich des Wassergehalts und des Feinanteils gezielt abgestuft.

Tabelle 9: Übersicht über die hergestellten Versuchsbrennstoffe

Nr.	Verwendete Brennstoffbezeichnungen	Eingesetzter Rohstoff	Additiv und Additivgehalt	Bemerkungen
1	Fichte Nullprobe/ Fichte 1/Flach HM	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	–	Flachmatrize 24 mm (oben) TFZ
2	Fichte niedriger Wassergehalt	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	–	Sortiment 1, getrocknet auf 3 m-%
3	Fichte hoher Wassergehalt	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	–	Sortiment 1, befeuchtet auf 10 m-%
4	Fichte hoher Feinanteil	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	–	Sortiment 1, 3 m-% Feinanteil zugemischt
5	Fichte sehr hoher Feinanteil	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	–	Sortiment 1, 10 m-% Feinanteil zugemischt
6	Fichte normal/ Ring 0,5 WS	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	0,5 m-% weizenstärkehaltiges Mehl	Ringmatrize 37 mm, Holz-Energie-Zentrum
7	Fichte lang	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	0,5 m-% weizenstärkehaltiges Mehl	Ringmatrize 37 mm, Holz-Energie-Zentrum
8	Fichte mittel	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	0,5 m-% weizenstärkehaltiges Mehl	Ringmatrize 37 mm, Holz-Energie-Zentrum
9	Fichte kurz	Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle	0,5 m-% weizenstärkehaltiges Mehl	Ringmatrize 37 mm, Holz-Energie-Zentrum
10	Fichte niedrige Partikeldichte/ Fichte < PD/ Flach < PD		–	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ
11	Fichte Weizenstärke niedrig/ Fichte 0,5 WS		0,5 m-% weizenstärkehaltiges Mehl	Flachmatrize 24 mm (oben) TFZ
12	Fichte Weizenstärke hoch/ Fichte 1,8 WS		1,8 m-% weizenstärkehaltiges Mehl	Flachmatrize 30 mm (oben) TFZ
13	Fichte Kartoffelstärke 1 niedrig/ Fichte KSn 0,5		0,5 m-% Kartoffelstärke nativ	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ
14	Fichte Kartoffelstärke 1 hoch/ Fichte 1,8 KSn		1,8 m-% Kartoffelstärke nativ	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ

Nr.	Verwendete Brennstoffbezeichnungen	Eingesetzter Rohstoff	Additiv und Additivgehalt	Bemerkungen
15	Fichte Kartoffelstärke 2 niedrig/ Fichte 0,5 KSa		0,5 m-% Kartoffelstärke abfallende Qualität	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ
16	Fichte Kartoffelstärke 2 hoch/ Fichte 1,8 KSa		1,8 m% Kartoffelstärke abfallende Qualität	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ
17	Fichte Kaolin niedrig/ Fichte 0,17 Kao		0,17 m-% Kaolin CSP	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ
18	Fichte Kaolin hoch/ Fichte 0,34 Kao		0,34 m-% Kaolin CSP	Flachmatrize 18 mm (oben) TFZ
19	Fichte Kollermühle/ Fichte NP Hackschnitzel/ flach KM/HS	TMP-Hackgut für Papierindustrie	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 24 mm Flachmatrize (oben) TFZ
20	Fichte gelagert, Bigbag/ flach Bigbag	Sägespan feucht, zerkleinert mit Hammermühle, sieben Monate gelagert im Bigbag	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 18 mm Flachmatrize (oben) TFZ
21	Fichte gelagert, Miete/ flach Miete	Sägespan feucht, zerkleinert mit Hammermühle, sieben Monate gelagert als Miete	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 18 mm Flachmatrize (oben) TFZ
22	Fichte 2 mit Rinde	Fichtenrundlinge d < 12 cm, gewaschen	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 30 mm Flachmatrize (oben) TFZ
23	Kiefer	Kiefernbohlen, gehackt	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 30 mm Flachmatrize (oben) TFZ
24	Lärche	Lärchenbretter, gehackt	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 30 mm Flachmatrize (oben) TFZ
25	Douglasie	Sägespan feucht	–	27 mm Flachmatrize (oben) TFZ
26	Buche 1	als Pellets geliefert	–	unbekannt
27	Buche 2	Buchenrundlinge d < 12 cm	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 24 mm Flachmatrize (oben) TFZ
28	Eiche 1	Eichenkappstücke ohne Rinde gehackt	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 30 mm Flachmatrize (oben) TFZ
29	Eiche 2	Sägespan feucht	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 30 mm Flachmatrize (oben) TFZ
30	Tropenholz-Laubholz-Mischung	als Pellets geliefert (Mischung aus Sipo, Meranti, ...)	–	unbekannt
31	Apfel	Hackgut feucht	–	zerkleinert mit 6 mm pelletiert mit 24 mm Flachmatrize (oben) TFZ

4.3 Analytik

In den folgenden Abschnitten werden die angewendeten Analysemethoden beschrieben und dabei nach physikalischen und inhaltsstofflichen Brennstoffparametern (Abschnitt 4.3.1), der Analyse von Partikeln aus der Verbrennung sowie der Brennstoffaschen (Abschnitt 4.3.2) und den eingesetzten Schnellbestimmungsmethoden (Abschnitt 4.3.3) unterteilt.

4.3.1 Physikalische und inhaltsstoffliche Brennstoffparameter

Standardparameter. Die Probenahme erfolgte immer an einer Gesamtprobenmenge von mindestens 120 kg je Pelletsortiment nach DIN EN ISO 18135 [29]. Bei Anlieferung als Sackware wurden immer acht Säcke à 15 kg geöffnet und mehrmals homogenisiert. Aus der Gesamtprobe wurden nach DIN EN ISO 14780 [27] repräsentative Teilproben für die einzelnen Bestimmungen hergestellt (siehe Abbildung 5). Die Standardparameter nach DIN EN ISO 17225-2 [14] wurden nach den in Unterkapitel 3.1, Tabelle 1 aufgeführten Normen bestimmt. Die Elementaranalysen wurden durch Eurofins Umwelt Ost GmbH in Freiberg durchgeführt.

Partikeldichte. Die Partikeldichte beschreibt die Dichte des einzelnen Pellets. Die Schüttdichte wird daher maßgeblich von der Pelletlänge und der Partikeldichte beeinflusst. Die Bestimmung der Partikeldichte erfolgte durch Wiegen einzelner Sortimente in Luft und Wasser mit einer dafür geeigneten Analysenwaage (Sartorius AG, LA310S) in Verbindung mit dem Dichtebestimmungsset (Sartorius AG, YDK01) nach DIN EN ISO 18847 [50]. Dabei wurde die Masse in Wasser immer drei Sekunden nach dem Eintauchen der Pellets abgelesen. Die Partikeldichte ist im Wesentlichen abhängig von der Holzart und der Beschaffenheit (z. B. Vermahlungsgrad) des zur Pelletierung eingesetzten Rohmaterials [52] [41]. Nach dem aktuellen Entwurf des neuen *ENplus*-Handbuchs [43] soll die Partikeldichte zukünftig erfasst werden, jedoch sind noch keine Grenzwerte festgelegt.

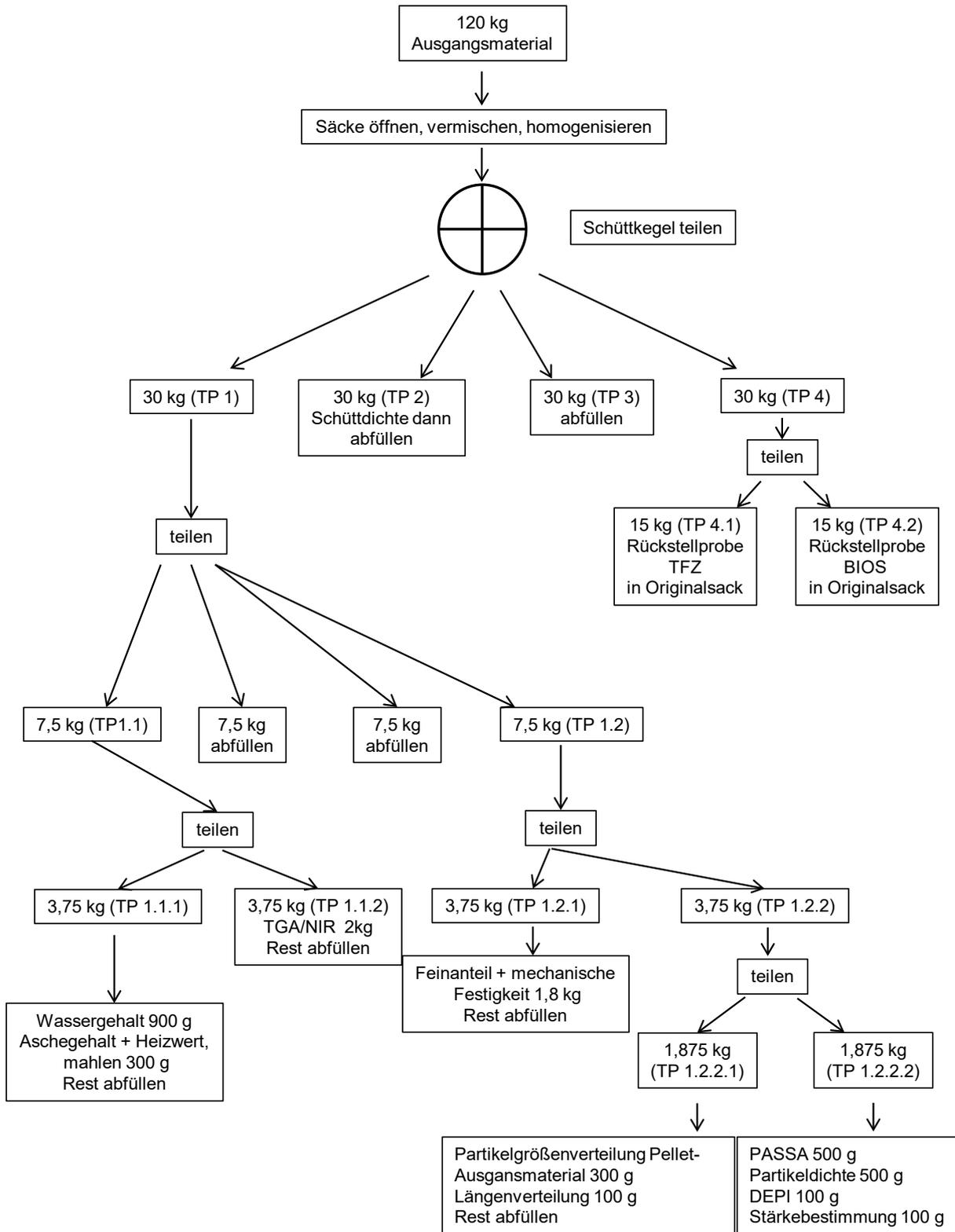


Abbildung 5: Schema der Probenteilung und Probennahme für die marktverfügbaren Holzpellets und die Versuchpellets am TFZ (TP – Teilprobe)

Partikelgrößenverteilung des Pellet-Ausgangsmaterials. Die verschiedenen Pelletsortimente können sich zusätzlich zu den Abmessungen der Pellets auch in den Maßen der verpressten Einzelbestandteile unterscheiden. Diese ergeben sich im Wesentlichen durch die Beschaffenheit des eingesetzten Ausgangsmaterial (z. B. Holzart) und die verwendete Zerkleinerungstechnik. Die Partikelgrößenverteilung des Pellet-Ausgangsmaterials wurde nach der gültigen Norm DIN EN ISO 17830 bestimmt [23]. Dabei werden 300 g Pellets in 100 °C heißem vollentsalzten Wasser gelöst, anschließend bei 60 °C im Trockenschrank (Binder GmbH, FED720-02-42004) getrocknet und mittels Riffelprobenteiler in drei Teilproben geteilt. Eine Teilprobe dient zur Bestimmung des Wassergehalts nach DIN EN ISO 17830 [23]. An den restlichen zwei Teilproben wird eine Siebanalyse mittels Siebkaskade (Tabelle 10) und Vibrationssiebmaschine (Retsch AS 200 control) nach der Norm DIN EN ISO 17827-2 durchgeführt [21].

Tabelle 10: Siebe und Fraktionen der Siebanalyse (nach DIN EN ISO 17827-2) [21]

Sieb	Sieb-Art	Lochgröße, mm	Siebfraction, mm
Sieb 1	Rundloch	3,15	> 3,15
Sieb 2	Drahtgewebe	2,8	2,8–3,15
Sieb 3	Drahtgewebe	2,0	2,8–2,0
Sieb 4	Drahtgewebe	1,4	2,0–1,4
Sieb 5	Drahtgewebe	1,0	1,4–1,0
Sieb 6	Drahtgewebe	0,5	1,0–0,5
Sieb 7	Drahtgewebe	0,25	0,5–0,25
Sammelschale	–	–	< 0,25

Die Leergewichte sowie die Gewichte der beladenen Siebe wurden mit einer Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von 0,01 g (Mettler Toledo XSR4002S) bestimmt.

Nach DIN EN ISO 17225-2 werden Holzpellets für die industrielle Verwendung in die Klassen I1–I3 eingeteilt [14]. Dabei werden die Siebdurchgänge bei < 3,15 mm, < 2 mm und < 1 mm berechnet und die Klassen nach Tabelle 11 eingeteilt.

Tabelle 11: Einteilung der Klassen bei Holzpellets für die industrielle Verwendung nach der Partikelgrößenverteilung des Pellet-Ausgangsmaterials [14]

Summe Partikel	I1, m-%	I2, m-%	I3, m-%
< 3,15 mm	≥ 99	≥ 98	≥ 97
< 2,0 mm	≥ 95	≥ 90	≥ 85
< 1,0 mm	≥ 60	≥ 50	≥ 40

Pellethärte. Die Pellethärte wurde mit einem Pressling-Härteprüfer (Amandus Kahl GmbH Co. KG) untersucht (siehe Abbildung 6). Dabei wird zunächst der Kolben mithilfe der Spannschraube (5) so weit zurückgedreht, bis die Anzeigenase (4) auf Stellung 0 steht. Die Kolbenspitze (2) wird leicht zurückgedrückt und ein einzelnes Pellet wird dann zwischen Kolbenspitze und Amboss (1) eingelegt. Daraufhin wird über die Spannschraube so lange zunehmender Druck auf die Längsseite des Pellets ausgeübt, bis es zerspringt. Die Anzeigenase zeigt den ausgeübten Druck in kg an. Bei den hier durchgeführten Härteprüfungen wurde immer die stärkere 3,5-mm-Feder (3) für den unteren Skala-Bereich zwischen 0 und 100 kg verwendet [1]. Je Pelletsortiment wurde an fünf Pellets die Härtebestimmung durchgeführt und der Mittelwert berechnet.



Abbildung 6: Pressling-Härteprüfer der Amandus Kahl GmbH Co. KG

Bestimmung weiterer Elemente. Zusätzlich zu den Standardparametern wurde eine erweiterte Elementaranalyse aller Aschebildner und Schwermetalle durchgeführt. Deren möglicher Einfluss auf die Verbrennung ist in Tabelle 12 zusammengestellt. Tabelle 13 zeigt die Bestimmungsgrenzen für alle Parameter der durch Eurofins Umwelt Ost GmbH Freiberg durchgeführten Elementaranalysen.

Tabelle 12: Zusätzliche inhaltstoffliche Parameter, die nicht in der DIN EN ISO 17225-2 limitiert sind

Parameter	Bestimmung nach Norm	Möglicher Einfluss auf die Verbrennung [52]
Aluminium (Al), Eisen (Fe)	DIN EN ISO 16967 [15]	–
Calcium (Ca), Magnesium (Mg)		Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Phosphor (P)		Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Kalium (K)		Ascheerweichungsverhalten, Ascheverwertung, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Silizium (Si)		Ascheerweichung, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Mangan (Mn)	DIN EN ISO 16968 [16]	–

Tabelle 13: Bestimmungsgrenzen für durch Eurofins Umwelt Ost GmbH vorgenommene Elementaranalysen

Parameter	Einheit	Bestimmungsgrenze
Kohlenstoff (C)	m-%	0,2
Wasserstoff (H)	m-%	0,1
Stickstoff (N)	m-%	0,05
Schwefel (S)	m-%	0,005
Chlor (Cl)	m-%	0,005
Aluminium (Al)	mg/kg	10
Arsen (As)	mg/kg	0,8
Blei (Pb)	mg/kg	2
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,2
Calcium (Ca)	mg/kg	20
Chrom (Cr)	mg/kg	1
Eisen (Fe)	mg/kg	5
Kalium (K)	mg/kg	5
Kupfer (Cu)	mg/kg	1
Magnesium (Mg)	mg/kg	30

Parameter	Einheit	Bestimmungsgrenze
Mangan (Mn)	mg/kg	1
Natrium (Na)	mg/kg	10
Nickel (Ni)	mg/kg	1
Phosphor (P)	mg/kg	10
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,05
Silicium (Si)	mg/kg	100
Zink (Zn)	mg/kg	1

Thermogravimetrie. Für fast alle Brennstoffe erfolgte eine thermogravimetrische Analyse (TGA). Diese wurden von der Università Politecnica delle Marche (UNIVPM) durchgeführt. Dabei wurde eine simultane Thermowaage (STA PT 1600 TG-DSC, Linseis Messgeraete GmbH) eingesetzt. Die Pelletproben wurden am TFZ mit einer schwermetallfreien Schneidmühle (Pulverisette 19, Fritsch GmbH) auf eine Partikelgröße $< 0,25$ mm gemahlen und homogenisiert. Alle Untersuchungen fanden unter Stickstoffatmosphäre statt, um das Pyrolyseverhalten der Brennstoffe zu untersuchen. Es wurde je Probe eine Doppelbestimmung mit einer Probenmenge von je 50 mg durchgeführt. Die Aufheizrate wurde auf 20 K/min festgelegt. Folgende Temperaturrampe wurde verwendet:

- Aufheizen auf 105 °C mit 20 K/min und Halten für 1 h (Trocknungsphase),
- Aufheizen auf 800 °C mit 20 K/min,
- Bestimmung des gebundenen Kohlenstoffs bei 500 °C.

Die so erhaltenen Messdaten wurden von der BIOS Bioenergiesysteme GmbH ausgewertet. In einem ersten Schritt wurden dabei folgende charakteristische Parameter zur Bewertung von TGA- bzw. DTG-Kurven bestimmt (siehe Abbildung 7). Die DTG-Kurve (derivate thermogravimetry) repräsentiert die Ableitung des Massenverlusts über die Zeit.

T_{Onset} Zeigt den Beginn der Hemicellulose-Zersetzung an. Sie wird durch Extrapolation der Steigung der Massenverlustrate im ersten lokalen Maximum der $-d^2m/dt^2$ -Kurve (bis zum Nulllevel der Y-Achse) definiert.

T_{Schulter} Bei Auftreten einer „Schulter“ ist die maximale Zersetzung der Hemicellulose durch T_{Schulter} gekennzeichnet, definiert durch den Punkt, an dem $-d^2m/dt^2$ in diesem Bereich den Wert erreicht, der null am nächsten liegt. In den Fällen, in denen sich Hemicellulose- und Cellulose-Zersetzung weniger stark überlappen, markiert der Parameter T_{Schulter} die Spitze der Hemicellulose-Zersetzung (siehe Abbildung 7).

T_{Peak} Temperatur, bei der die höchste Massenverlustrate erreicht wird (hauptsächlich mit der Cellulose-Zersetzung assoziiert).

T_{Offset} Beginn der Region, die von der Lignin-Zersetzung dominiert wird. Wird durch Extrapolation der Massenverlustrate (bis zum Nulllevel der Y-Achse) erhalten, die dem lokalen Minimum in $-d^2m/dt^2$ in diesem Bereich entspricht.

Holzkohlenanteil: Der Prozentsatz der bei $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ($m_{500 \text{ }^\circ\text{C}}$) erhaltenen Feststoffmassenfraktion.

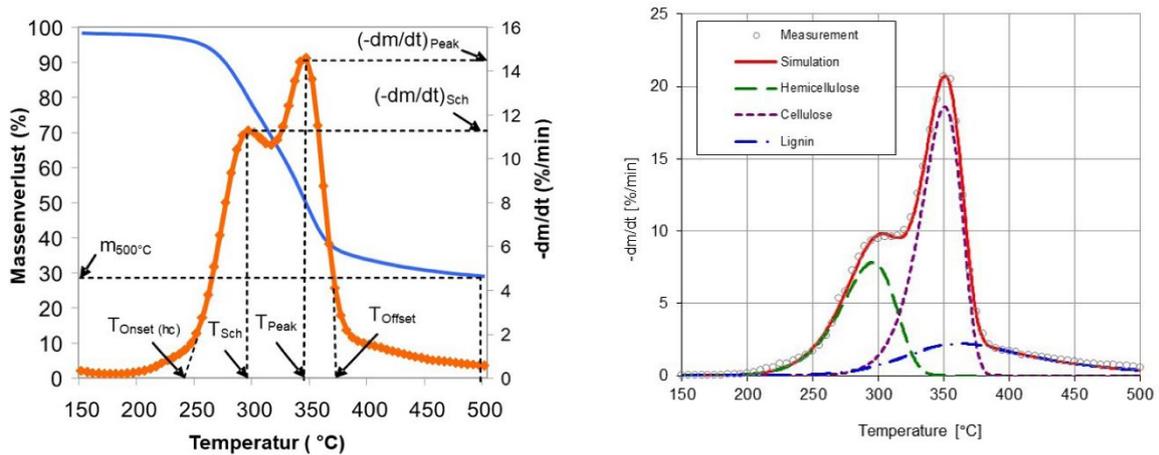


Abbildung 7: Charakteristische Parameter zur Bewertung von TGA-Kurven (blau) bzw. DTG-Kurven (derivate thermogravimetry; rot) (links) und Auswertung der Anteile an Hemicellulose, Cellulose und Lignin (rechts)

Dann werden die Anteile an Hemicellulose, Cellulose und Lignin aus den TGA-Kurven berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die thermische Zersetzung von Biomasse durch die Zersetzung dieser drei Pseudokomponenten bestimmt wird. Diese kann für jede Komponente einzeln mit einer Arrhenius-Gleichung beschrieben werden.

$$\frac{da_i}{dt} = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) (1 - a_i) \tag{4.1}$$

mit i : Fraktion (Hemicellulose, Cellulose, Lignin), a_i : Massenverlust der Fraktion, A_i : Prä-exponentialfaktor und E_i : Aktivierungsenergie.

a_i ist zu Beginn 0 und am Ende des Bewertungsbereichs 1 (also bei 500 °C).

$$a_i = \frac{m_{0,i} - m_{t,i}}{m_{0,i} - m_{f,i}} \tag{4.2}$$

Der Gesamtmassenverlust ergibt sich aus der Summe der Massenverluste aller Komponenten.

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{i=0}^N c_i \frac{da_i}{dt} \quad (4.3)$$

Dieses Modell erster Ordnung liefert eine gute Näherung für die Zersetzung von Cellulose und Hemicellulose [5]. Für Lignin wurde jedoch gezeigt, dass eine Reaktion höherer Ordnung zu einem besseren Ergebnis führen kann [65]. Dazu wird im Arrhenius-Ansatz die Reaktionsordnung n berücksichtigt ($n = 1 \dots 5$).

$$\frac{da_i}{dt} = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) (1 - a_i)^{n_i}$$

Ein mathematischer Ansatz zur Berechnung der kinetischen Parameter jeder Komponente besteht darin, nach dem Minimum einer Zielfunktion zu suchen, die von diesen kinetischen Parametern abhängt. Eine Möglichkeit besteht darin, die Zielfunktion als Differenz zwischen dem experimentellen und dem simulierten Gesamtmassenverlust zu definieren und diese entsprechend zu minimieren.

$$\text{Zielfunktion} = \sum_{i=1}^N \left(\left(\frac{da_i}{dt} \right)_{exp} - \left(\frac{da_i}{dt} \right)_{sim} \right)^2$$

Diese Minimierung wird in einem von BIOS entwickelten Auswertungstool anhand eines in Matlab implementierten Solvers durchgeführt.

NIR-Analyse zur Holzartbestimmung. An einem weiteren Teil der Proben wurden ebenfalls an der Università Politecnica delle Marche Untersuchungen mit einem Fourier-Transform-Nah-Infrarot-Spektrometer (FT-NIR-Spektrometer) (Nicolet iS10, Thermo Fischer Scientific), ausgestattet mit einer Ulbrichtkugel (Smart NIR UpDRIFT, Thermo Fischer Scientific) zur Analyse der diffusen Reflexion bei Feststoffen und Pulvern, durchgeführt. Die UNIVPM hatte in vorangegangenen Untersuchungen bereits mathematische Modelle entwickelt, um mittels NIR die Holzart (Laubholz oder Nadelholz) zu bestimmen [64] [41] [88] und zwischen naturbelassenem und behandeltem Holz, Holz und Rinde [88] [64] oder Holz und Halmgut zu unterscheiden [64]. In weiteren Projekten werden bereits Modelle zur Bestimmung des Heizwerts und des Aschegehalts [63] entwickelt. Damit stellt die NIR-Technologie eine interessante Möglichkeit dar, in Zukunft schnell und kostengünstig bestimmte Brennstoffeigenschaften bestimmen zu können. Die NIR-Technologie wird mittlerweile auch in mobilen Geräten verwendet und könnte in Zukunft eventuell auch in die Feuerung (z. B. Förderschnecke) integriert werden, um online Brennstoffparameter zu erfassen.

Stärkegehalt. Ein bisher noch nicht ausreichend untersuchter Parameter hinsichtlich des Verbrennungs- und Ascheschmelzverhaltens ist der Stärkegehalt in industriell hergestellten Pellets. Die Stärke dient zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Verkleis-

terung) und Erhöhung der Gleitfähigkeit der Pellets [52]. Die Bestimmung des Stärkegehalts der marktverfügbaren Pellets aus dem Pelletscreening wurde von der Holzforschung Austria durchgeführt. Die Untersuchung der Proben erfolgte enzymatisch unter Anwendung eines Stärke-UV-Test-Kits zur Bestimmung von nativer Stärke und Stärkepartialhydrolysaten in Lebensmitteln und anderen Probenmaterialien (R-Biopharm, NR. 10 207 748 035) [46].

Vor der Analyse wurden die Pelletproben aufgemahlen und homogenisiert. Um die in den Pellets vorhandene Stärke in eine lösliche Form zu überführen, wurden die Proben im Rahmen der Probenvorbereitung einer sauren Hydrolyse unterzogen. Hierzu wurde ein geeignetes Probenaliquot der gemahlene Probe mehrmals mit 40%igem Ethanol gewaschen und anschließend mit Salzsäure eine Stunde bei 60 °C im Wasserbad unter Rühren inkubiert. Der Feststoffanteil wurde mittels Nutsche noch im heißen Zustand abfiltriert. Nach der pH-Wert-Einstellung auf einen Wert von ca. 4,5 (durchgeführt mit Natronlauge) wurde das Filtrat mit deionisiertem Wasser auf ein geeignetes Volumen aufgefüllt und gemäß der Anleitung des Stärke-Test-Kits nach entsprechender Reagenzien-Zugabe fotometrisch bei 340 nm vermessen. Die Wiederfindung der analytischen Methode, bestimmt durch Kontrollmessungen unterschiedlicher Stärketypen, liegt bei 93 %.

Energiedichte. Die Energiedichte (ED) beschreibt die durch den Brennstoff zugeführte Energie bezogen auf die Masse unter Berücksichtigung der Schüttdichte (BD) und des Heizwerts (Hu) im Anlieferungszustand (ar) und lässt sich nach Formel (4.4) berechnen.

$$ED, a. r. = Hu, a. r. \times BD, a. r. \quad (4.4)$$

Schüttungsporosität. Die Schüttungsporosität ϕ beschreibt das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen der Schüttung durch das Verhältnis von Schüttdichte zu Partikeldichte (PD) im Anlieferungszustand (ar) und lässt sich nach Formel (4.5) berechnen.

$$\phi = 1 - \frac{BD}{PD} \quad (4.5)$$

4.3.2 Analyse von Partikeln aus der Verbrennung und Brennstoffaschen

Bestimmung von TIC, TOC an Brennstoffproben und IC, OC, EC an Staubfiltern. Nach DIN EN ISO 17225-2 [14] ist der Aschegehalt des Brennstoffs nach Veraschung bei 550 °C nach DIN EN ISO 18122 [25] für A1-Pellets auf 0,7 m-% begrenzt. Elemente wie z. B. Kalium, Calcium und Magnesium begünstigen bei der Veraschung von Biomasse die Bildung von Karbonaten (z. B. Kaliumkarbonat). Diese Karbonatverbindungen werden bei höheren Temperaturen aufgespalten und CO₂ wird freigesetzt [52]. Unter den richtigen Bedingungen (Temperatur, Atmosphäre) schmelzen Karbonatverbindungen während der

Verbrennung von Biomasse und weisen dabei einen niedrigen Schmelzpunkt (z. B. K-Karbonat 788–904 °C) auf [92]. Dieser Anteil des Kohlenstoffs lässt sich z. B. mit einem Kohlenstoff/Wasserstoff/Feuchte-Analysator (LECO RC612) ermitteln. Der Karbonatanteil der bei 550 °C hergestellten Brennstoffasche wird mit der sogenannten TIC/TOC-Methode bestimmt. Dabei wird die Probe unter Sauerstoffatmosphäre bei 550 °C in den Kohlenstoffanalysator eingebracht und nach einer Haltedauer von 180 s mit einer Temperaturrampe von 120 °C/s auf 1.000 °C ebenfalls unter Sauerstoffatmosphäre aufgeheizt (siehe Abbildung 8). Der Anteil des Kohlenstoffs, der bei 550 °C zu CO₂ umgesetzt wird, wird dabei dem TOC zugerechnet und der Anteil, der oberhalb von 550 °C zu CO₂ umgesetzt wird, dem TIC. Um vom TIC (C in m-%) auf den Karbonatanteil zu schließen, wird der TIC mit dem Faktor 3,66 multipliziert, um von C in m-% auf das im Karbonat gebundene CO₂ in m-% umzurechnen.

Bei der Bestimmung elementaren Kohlenstoffs (EC) und organischen Kohlenstoffs (OC) in Filterstäuben kommt eine Kombination aus der TIC/TOC-Methode im ersten Schritt (siehe oben) und einer weiteren Methode zur Abgrenzung des elementaren Kohlenstoffs zum Einsatz. Dabei wird die Probe unter Stickstoffatmosphäre (inert) von 250 °C auf 550 °C mit 120 °C/s aufgeheizt und dort über 90 s gehalten. Anschließend wird unter Stickstoffatmosphäre mit 120 °C/s weiter auf 1.000 °C aufgeheizt und wieder über 90 s gehalten. Beide Peaks werden dem inerten Kohlenstoff zugeordnet. Anschließend wird unter Stickstoffatmosphäre wieder auf 100 °C abgekühlt und dann unter Sauerstoffatmosphäre erneut auf 1.000 °C aufgeheizt. Dieser Peak wird dem EC zugeordnet (siehe Abbildung 9) und kann direkt als C in m-% interpretiert werden, da es sich um elementaren Kohlenstoff handelt. OC ergibt sich aus dem inerten Kohlenstoff (Methode 2) abzüglich des TIC aus Methode 1. Um zu berücksichtigen, dass OC aus Kohlenwasserstoffen und nicht aus reinem Kohlenstoff besteht, wird der Wert in C m-% noch mit dem Faktor 1,4 (nach Literaturdaten) multipliziert. Der Karbonatanteil ergibt sich wieder aus TIC multipliziert mit 3,66 (C auf CO₂). Beide Methoden wurden vom Projektpartner BIOS speziell für Biomasseproben experimentell entwickelt und am TFZ bei der Bestimmung ebenfalls angewendet. Es wurde immer je Probe eine Doppelbestimmung durchgeführt. Der Anteil des organischen Kohlenstoffs OC deutet auf Partikel aus unvollständiger Verbrennung, z. B. Teere, hin, der elementare Kohlenstoff EC z. B. auf Ruß oder mitgerissene Holzkohlepartikel und der IC auf mitgerissene karbonathaltige Aschepartikel auf Planfiltern der Staubmessungen.

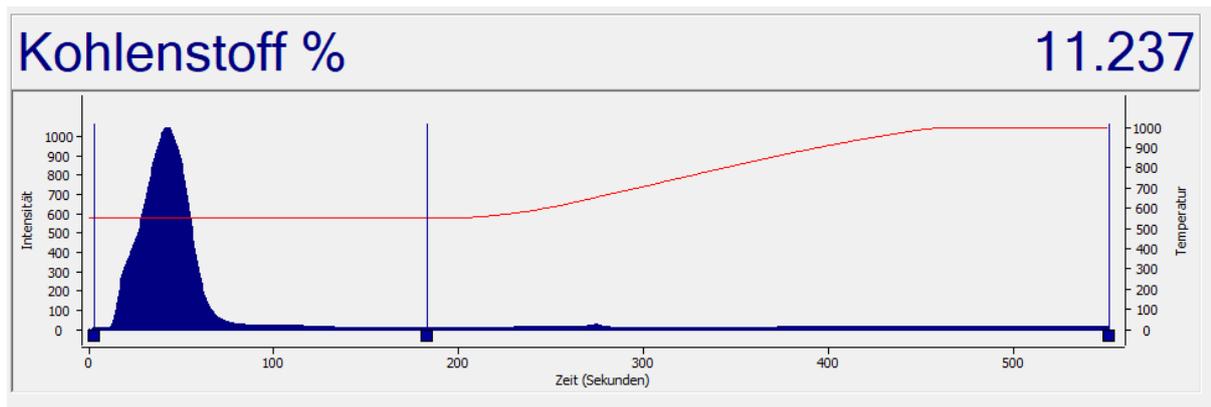


Abbildung 8: Intensitäts- und Temperaturverlauf einer TIC/TOC-Bestimmung an einer Partikelprobe

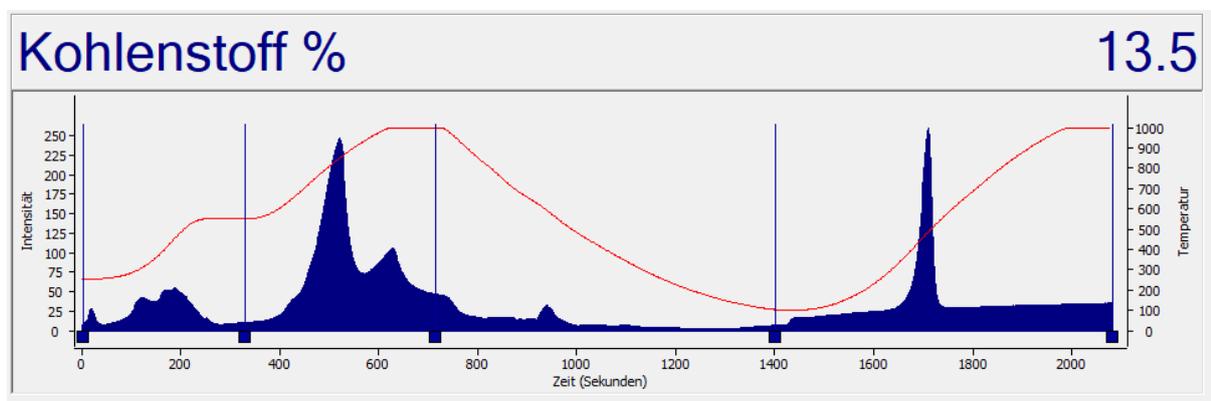


Abbildung 9: Intensitäts- und Temperaturverlauf einer EC/OC-Bestimmung an einer Partikelprobe

PASSA-Methode. Die PASSA-Methode (Pellet Ash and Slag Sieving Assessment) wurde in einem europäischen Verbundprojekt (EU-AshMeIT, Grant Agreement No. 287062) für Pellets entwickelt [81]. Diese bislang nur für Forschungszwecke verwendete Methode wurde am TFZ weiterentwickelt und verändert. Im Rahmen der hier aufgezeigten Untersuchungen wurden 200 g des pelletierten Brennstoffs in einer Glühchale (Tiegel) eingewogen. Diese muss eine Temperaturbeständigkeit von mindestens 1.050 °C aufweisen. Zum Einwiegen der Brennstoffprobe sowie zur Bestimmung des Leergewichts der Glühchale wurde eine Waage mit einer Auflösung von 0,01 g (Kern & Sohn GmbH, 572-35) verwendet.

Die Probe wird in einem Muffelofen (L40, Nabertherm GmbH) thermisch behandelt. Dabei folgt man dem in Abbildung 10 vorgegebenen Temperaturprogramm mit einer Aufheizrate von 10 K/min. Die maximale Temperatur beträgt dabei 1.000 °C.

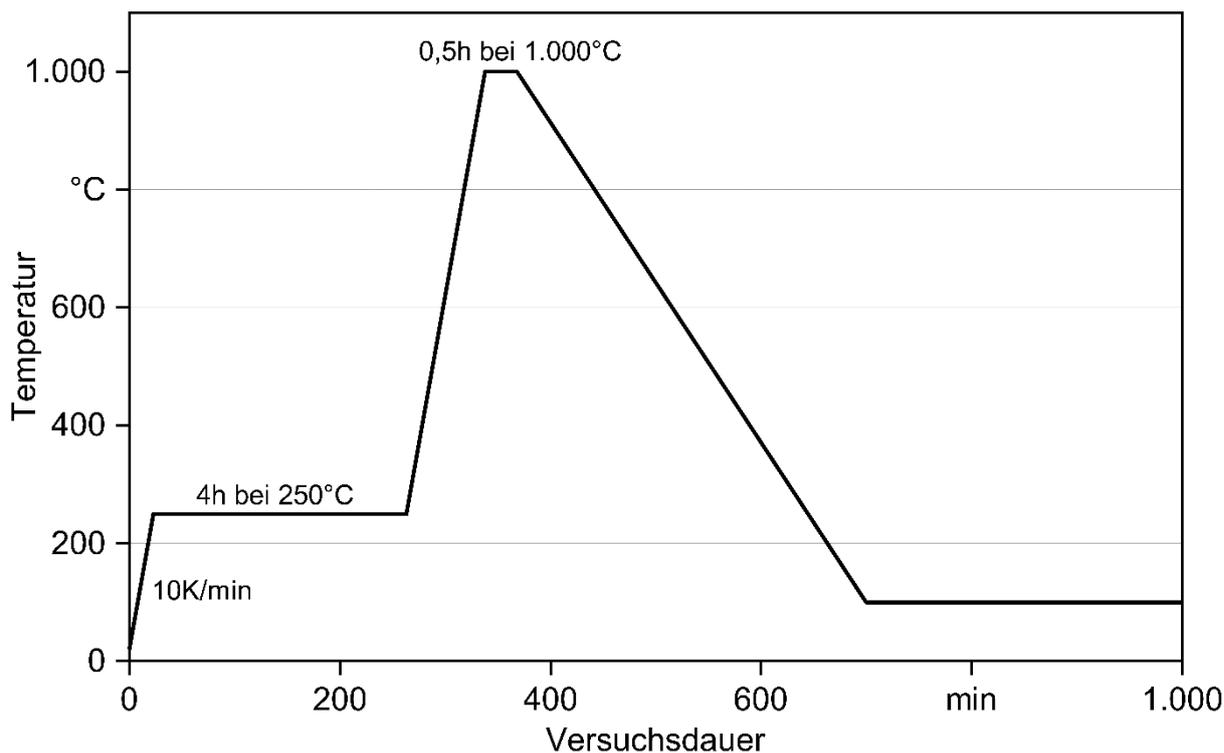


Abbildung 10: Temperaturprogramm bei der Veraschung nach der PASSA-Methode

Nachdem die Probe auf 100 °C abgekühlt ist, wird sie dem Muffelofen entnommen und fotografiert. Danach muss die Probe im Exsikkator vollständig auf Raumtemperatur abkühlen. Anschließend wird die Probe inklusive der Glühschale erneut gewogen. Hierfür ist wieder eine Waage mit einer Auflösung von 0,01 g zu verwenden. Jetzt wird die Probe aus der Glühschale mit einem Pinsel entfernt. Die leere Glühschale wird erneut gewogen, um die Masse des anhaftenden Materials zu bestimmen. Dieser Anteil wird zu der Fraktion > 2 mm gerechnet.

Der lose Anteil der Probe wird durch eine Siebanalyse hinsichtlich der gebildeten Schlackeagglomerate bewertet. Verwendet werden Drahtgewebesiebe mit einer Maschenweite von 2 mm, 1 mm und 0,5 mm. Die Probe wurde mittels einer Siebmaschine (Retsch GmbH & Co. KG, Siebmaschine, AS200 control) in Sieben mit 100 mm Durchmesser für fünf Minuten bei einer Amplitude von 0,5 gesiebt. Die Masse der gewonnenen Aschefractionen wurde mit einer Waage mit einer Auflösung von mindestens 0,001 g ermittelt (Analysewaage 220 g MS204S/01, Mettler Toledo GmbH).

Pro Brennstoffprobe erfolgte jeweils eine Doppelbestimmung. Aus den Ergebnissen lässt sich der sogenannte Slag-Index berechnen. Dabei handelt es sich um den relativen Anteil einer bestimmten Asche-Korngrößenfraktion an der Gesamtaschemenge nach der thermischen Behandlung der Probe. Für die Beurteilung diverser Holzpellets eignet sich der Slag-Index für die Fraktion > 2 mm oder > 1 mm [81].

Bewertung der Feuerungsaschen. Die Aschen aus den Feuerungsversuchen wurden mit demselben Siebverfahren untersucht wie bei der PASSA-Methode. Aus der Grobfraktion (> 2 mm) wurden zusätzlich vor dem Sieben unverbrannte und teilverkohlte Pellet-

rückstände händisch aussortiert und die Schlackebrocken, falls vorhanden, visuell und durch Drucktest mit den Fingern nach Tabelle 14 beurteilt.

Tabelle 14: Beschreibung der fünf Verschlackungsgrade nach [72]

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

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

4.3.3 Untersuchte Schnellbestimmungsmethoden

Schnellbestimmung der Partikeldichte mit Messzylinder. Um den zeitlichen Aufwand zu verringern, wird in der Industrie teilweise schon auf vereinfachte Verfahren zur Bestimmung der Partikeldichte zurückgegriffen. Eine gängige Vorgehensweise mit einem Messzylinder wurde in dieser Arbeit im Vergleich zur normierten Methode nach EN ISO 18847 validiert.

Dafür wird ein identisch zur Norm [50] vorbereitetes Gemisch aus vollentsalztem Wasser und dem vorgesehenen Tensid in einen 2.000-ml-Messzylinder überführt. Dies erfolgt sehr langsam, um eine starke Schaumbildung zu verhindern. Ist kein Schaum auf der Oberfläche mehr sichtbar, wird das Volumen abgelesen und notiert. In den Versuchen lag dieses Volumen für alle Sortimente bei einem Wert von 1.000 ml. Aus der Versuchsprobe wird nun eine Prüfmenge (in diesem Fall etwa 400 g) entnommen und auf 0,1 g genau eingewogen. Mithilfe eines Trichters werden die Holzpellets rasch in den Messzylinder mit der Flüssigkeit überführt. Nach einer Dauer von drei Sekunden wird das Volumen an der Skala des Zylinders erneut abgelesen und notiert (Abbildung 11).



Abbildung 11: Versuchsaufbau der Partikeldichtemessung im Messzylinder als Schnellbestimmungsmethode nach der Zugabe von Pellets

Die Partikeldichte (ρ_M) lässt sich im Anschluss durch Division der Einwaage der Pellets (m) und durch das verdrängte Volumen (Formel (4.6)) berechnen. Dabei stellt V_1 das Volumen vor der Zugabe der Pellets dar und V_2 entspricht dem gemessenen Volumen drei Sekunden nach Zugabe der Prüfmenge.

$$\rho_M = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (4.6)$$

Berechnung der Partikeldichte über die stereometrische Volumenbestimmung. Als weitere Alternative zum Normverfahren lässt sich die Partikeldichte durch die Maße und Gewichte einer Prüfmenge berechnen. Dieses Verfahren ist im Anhang A1 der DIN EN ISO 18847 [50] für Briketts beschrieben. Dafür wird das Gewicht der zur Bestimmung der Längenverteilung nach DIN EN ISO 17829 [22] genutzten Teilmenge bestimmt. Mithilfe der per Messschieber ermittelten Einzellängen der je 100 Pellets sowie des mittleren Durchmessers wird näherungsweise das Zylindervolumen für die Teilmenge berechnet (Formel (4.7)). Dabei ist r_{mittel} die Hälfte des Mittelwerts des gemessenen Durchmessers und l_{gesamt} die Summe der gemessenen Einzellängen der 100 Pellets.

$$V = r_{\text{mittel}}^2 \times \pi \times l_{\text{gesamt}} \quad (4.7)$$

Die Partikeldichte (ρ_M) wird im Anschluss berechnet, indem das Gewicht der Prüfmenge (m) mit einer Genauigkeit von 0,01 g durch das berechnete Zylindervolumen (V) geteilt wird (Formel (4.8)).

$$\rho_M = \frac{m}{V} \quad (4.8)$$

Fotooptische Längenvermessung pelletVISION. Mit der fotooptischen Methode pelletVISION kann die Länge von Pellets bestimmt werden, der Durchmesser hingegen wird dabei nicht erfasst. Das von der Holz-Energie-Zentrum Olsberg GmbH mitentwickelte System besteht aus einer Lichtkabine mit integrierter Messkamera und Beleuchtung, einer Schublade (Pelletschublade) sowie der zugehörigen Software (Abbildung 12).



Abbildung 12: Versuchsaufbau pelletVISION zur Schnellbestimmung der Pelletlänge

Zur Messung der Längenverteilung wird die vorbereitete Prüfmenge der Pellets in den vertieften Rillen der Pellet-Schublade gleichmäßig verteilt eingelegt und entlang dieser Rillen ausgerichtet. Dabei ist laut Hersteller zu beachten, dass die einzelnen Pellets mit

ausreichend Abstand zueinander platziert werden, da das System ansonsten möglicherweise mehrere Pellets zu einer gemessenen Länge zusammenfasst und so überlange Pellets detektiert. Die Lichtquelle beleuchtet die Prüfmenge von unten, wodurch die lichtundurchlässigen Pellets auf dem Messbild als dunkle Flächen abgebildet werden. Die einzelnen Pellets werden dabei von der Auswertesoftware mit der gemessenen Länge in mm mit einer Dezimalstelle beschriftet und durch farbliche Unterscheidung in zwei Größenbereiche untergliedert. Die Längenbeschriftung in gelber Farbe kennzeichnet Pellets mit einer Länge ≤ 15 mm und in grüner Farbe werden Längen > 15 mm angegeben (Abbildung 13).

Bevor mit der Auswertung der Messung begonnen wird, ist zu überprüfen, ob fehlerhafte Messwerte vorliegen. Ein fehlerhafter Messwert ist beispielsweise daran zu erkennen, dass einzelne Pellets keine gemessene Länge aufweisen oder – wie zuvor beschrieben – mehrere Pellets zu einer Messlänge zusammengefasst wurden (Abbildung 13). Im Fall eines aufgetretenen Fehlers werden die Pellets neu angeordnet und anschließend die Messung wiederholt.

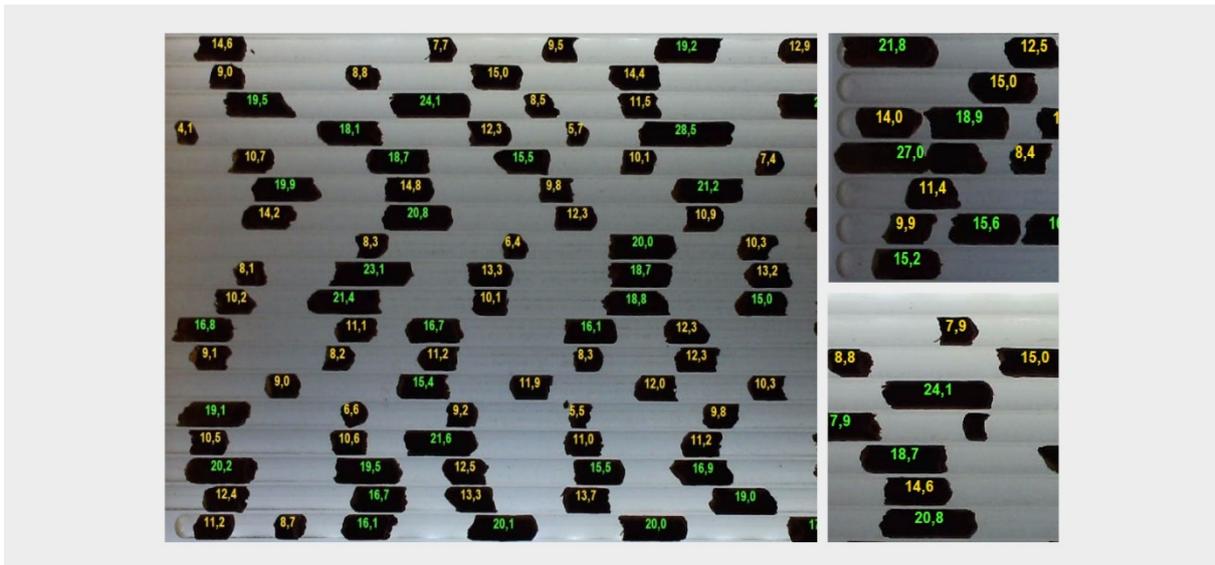


Abbildung 13: Beispiel Messbild pelletVISION (links), Fehlmessung zwei Pellets zusammengefasst (oben rechts, Wert 27,0), Fehlmessung nicht gemessenes Pellet (unten rechts, kein Wert)

Die Auswertung einer korrekten Messung mit der dazugehörigen Software liefert Angaben über die gemessene Stückzahl, den Mittelwert der gemessenen Längen, die maximale Länge sowie die Standardabweichung. Außerdem werden verschiedene Tabellen und Diagramme mit den Messdaten erstellt. Eine weitere Auswertung der gemessenen Daten ist über die Softwarefunktion „Report“ möglich. Die Ergebnisse werden in mm auf zwei Dezimalstellen angegeben. Da hier dieselben Pellets verwendet wurden wie beim händischen Vermessen zur Bestimmung der Pelletlänge, können diese Werte direkt miteinander verglichen werden.

Fotometrische Methode zur Bestimmung der Pelletgrößenverteilung, die von BIOS im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Die Methode basiert auf der Vermessung von Pellets in einer sogenannten Fotobox (siehe Abbildung 14). Diese Fotobox ermöglicht eine gleichmäßige und wiederholbare Beleuchtung der Probe ohne starke Schlagschatten. In diese Fotobox wurde ein grüner Hintergrund eingelegt, der einen optimalen Kontrast zur Probe sicherstellt, sodass die Umrisse der einzelnen Pellets möglichst gut aufgelöst werden können. Die Proben werden in der Fotobox platziert und von oben mit Maßstab fotografiert. Die eigentliche Vermessung der Pelletgeometrie wird mit dem quelloffenen Computerprogramm „FiJi“ durchgeführt, mit dem zunächst die Umrisse der Pellets aus dem Foto extrahiert werden können. Im Anschluss wird automatisch die größte und kleinste Ausdehnung der einzelnen Objekte bestimmt (siehe Abbildung 15).

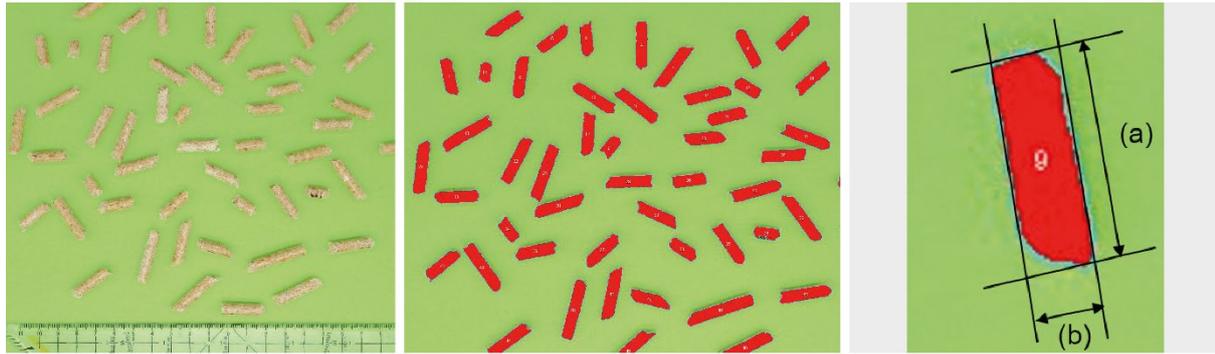


Vorne geöffnete Fotobox mit grünem Hintergrund und Beleuchtung.



Geschlossene Fotobox. Durch die Öffnung an der Oberseite wurden die Probenfotos aufgenommen.

Abbildung 14: Messaufbau der von BIOS im Projekt entwickelten Pelletvermessungsmethode



Originalfoto vor der
Bearbeitung

Foto nach der
Umriss-Erkennung durch „Fiji“

(a) größte Ausdehnung des
Pellets (Länge)
(b) kleinste Ausdehnung
des Pellets (Durchmesser)

Abbildung 15: Auswertungsbeispiel für die von BIOS im Projekt entwickelte Pelletvermessungsmethode

Bestimmung der mechanischen Festigkeit mit dem Ligno-Tester. Für die Bestimmung der mechanischen Festigkeit wird in der Pelletier-Praxis häufig alternativ zur Normprüfmethode das System Ligno-Tester des Herstellers Borregaard LignoTech verwendet. Diese Methode setzt Pellets, die durch einen zugeführten Luftmassenstrom in einer Prüfkammer verwirbelt werden, einer mechanischen Belastung durch Stöße untereinander und Stöße gegen ein Prallblech aus. Dafür wird jeweils eine Probenmenge größer 100 g zuvor mit einem Lochblechsieb mit einer Lochweite von 3,15 mm bei 400 cm Durchmesser gesiebt, diese Probenvorbereitung entspricht der Feingehaltsbestimmung nach DIN EN ISO 18846 [20].

Von dem auf dem Sieb verbliebenen Material wird eine Prüfmenge von 100 g entnommen und mit einer Präzisionswaage (Mettler Toledo PG12001-S) auf 0,01 g genau gewogen. Die Probe wird dann vorsichtig in die Prüfkammer überführt und diese anschließend mit dem Deckel verschlossen. Um den Austritt von Staub in die Umgebung zu vermeiden, wird auf dem Deckel ein Filterpapier platziert und mit einem weiteren Deckel an dieser Stelle fixiert (Abbildung 16).



Abbildung 16: Versuchsaufbau System Ligno-Tester, Gerät aufgeklappt Ausgangszustand (oben), Prüfkammer beladen mit Pellets (unten links), Gerät verschlossen während der Prüfung (unten rechts)

Im Anschluss wird entsprechend der Bedienungsanleitung eine Pelletbeanspruchung über 60 Sekunden bei 70 mbar gestartet. Nach Ablauf der Messdauer stoppt der Luftmassenstrom automatisch. In der Prüfkammer befindet sich nun ausschließlich der Grobanteil, der Feinanteil ist bereits durch die Lochung in eine darunter befindliche Auffangkammer gelangt. Der Inhalt der Prüfkammer wird durch Kippen in ein tariertes Gefäß überführt und auf 0,01 g genau gewogen.

Die mechanische Festigkeit wird laut Hersteller durch den sogenannten Lignowert in Massenprozent angegeben. Dieser wird berechnet, indem die Probenmasse nach dem Ligno-Tester ($m_{L, \text{ungesiebt}}$) durch die anfängliche Einwaage (m_E) geteilt wird (Formel (4.9)).

Der ursprünglich für Futtermittel entwickelte Ligno-Tester, der auch heute noch häufig in der Praxis genutzt wird, wurde mit einem 2-mm-Sieb geliefert. Das aktuellere Modell des Ligno-Testers wird von der Firma TEKPRO mit einem 3,15-mm-Sieb vertrieben. Der Ligno-Tester am TFZ wurde nach einer ersten Testserie mit einem Upgrade-Kit der Firma TEKPRO umgerüstet und anschließend Vergleichsmessungen durchgeführt.

$$\text{Lignowert} = \frac{m_{L, \text{ ungesiebt}}}{m_E} \times 100 \quad (4.9)$$

4.4 Feuerungsversuche

Alle Brennstoffe aus Abschnitt 4.2.3 wurden in Feuerungsversuchen hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens untersucht. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Feuerungsanlagen (Abschnitt 4.4.1), die verwendete Messtechnik und die Vorgehensweise während der Feuerungsversuche.

4.4.1 Beschreibung der verwendeten Feuerungen

Für die Feuerungsversuche wurden insgesamt zwei Pelletöfen und zwei Pelletkessel verwendet, die alle einen integrierten Brennstoffbehälter hatten (siehe Tabelle 15). Bei Pelletofen 1 handelt es sich um ein Modell aus dem Jahr 2010 mit einer Nennwärmeleistung von 8 kW. Dies entspricht so zwar nicht mehr dem neuesten Stand der Technik, dennoch sind vermutlich in vielen Haushalten Pelletöfen ähnlicher Bauweise und Technik vorzufinden. Auch viele am Markt erhältliche Pelletöfen im niedrigen Preissegment greifen nach wie vor auf vergleichbare Technik zurück. Auffallend bei diesem Gerät ist die sehr lang und schmal dimensionierte Brennerschale mit einer Länge des Rosts von 11,7 cm und einer Breite von 3,7 cm. Der Brennertopf ist nach oben stark konisch geöffnet, die Sekundärluftdüsen liegen ca. 3 cm über dem Rost. Der Pelletofen verfügt über keine leistungsbezogene Regelung der Brennstoffmenge über die Brennraumtemperatur. Die Brennstoffmenge lässt sich durch den Nutzer bei wechselnden Brennstoffqualitäten nicht einstellen. Stattdessen lässt sich die Verbrennungsluftmenge nach oben und unten in drei Stufen einstellen. Pelletofen 1 verfügt über drei fest einstellbare Heizleistungen, zwischen denen der Pelletofen im Automatikmodus je nach Raumtemperatur wechseln kann. Der Pelletofen verfügt über keine automatische Reinigung des Brennertopfs und auch keinen zyklischen Glutabbrand.

Tabelle 15: Übersicht der relevanten technischen Daten aller verwendeten Pelletfeuerungen

Parameter	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1	Pelletkessel 2
Nennwärmeleistung [kW]	8	6	15	16
Baujahr	2010	2018	2018	2020
Brennstoffzufuhr	Abwurf	Abwurf	seitlicher Einschub	seitlicher Einschub
Rostausführung	Brennertopf	Brennertopf	Kipprost	Starrer Rost
Länge Rost [cm]	11,7	8,7	–	–
Breite Rost [cm]	3,7	4,6	–	–
Länge Brennertopf bei Sekundärluft [cm]	14,5	10,3	–	–
Breite Brennertopf bei Sekundärluft [cm]	6,1	5,3	–	–
Abstand Sekundärluftdüsen zu Rost [cm]	3,0	1,9	–	–
CO-Emissionen bei Volllast laut Typenprüfung [mg/Nm ³ bei 13 % O ₂]	79	117	6	4
Gesamtstaubemissionen bei Volllast laut Typenprüfung [mg/Nm ³ bei 13 % O ₂]	24	19	14	4
Automatische Reinigung Rost	nein	zyklische Erhöhung der Gebläsedrehzahl nach 1 h	Rostbewegung bzw. Abkippen nach 6 h	nein
Leistungsregelung	nein	Brennstoffeinschub kann um einen festen Wert reduziert werden	ja	ja

Bei Pelletofen 2 handelt es sich um ein Modell aus dem Jahr 2018 mit einer Nennwärmeleistung von 6 kW, das dem aktuellen Stand der Technik in der mittleren bis gehobenen Preisklasse entspricht. Die Geometrie des Brennertopfs ist bei diesem Gerät eher kompakt dimensioniert. Die Brennerschale hat eine Rostlänge von 8,7 cm und einer Breite von 4,6 cm. Der Brennertopf ist nach oben leicht konisch geöffnet, die Sekundärluftdüsen liegen ca. 1,9 cm über dem Rost. Der Pelletofen verfügt über eine sehr einfache Leistungsregelung der Brennstoffmenge über die Brennraumtemperatur. Diese reduziert die Brennstoffzufuhr beim Überschreiten einer bestimmten Brennraumtemperatur um einen festen Prozentwert. Eine automatische Erhöhung der Brennstoffzufuhr bei zu niedriger Brennraumtemperatur findet nicht statt. Die Brennstoffmenge lässt sich durch den Nutzer bei wechselnden Brennstoffqualitäten nur reduzieren, nicht erhöhen. Der Pelletofen 2 verfügt

über drei fest einstellbare Heizleistungen zwischen denen er im Automatikmodus je nach Raumtemperatur hin und her wechseln kann. Der Pelletofen 2 verfügt über eine automatische Reinigung des Brennertopfs durch einen zyklischen Glutabbrand, der ca. einmal pro Stunde ausgelöst wird. Dabei wird die Brennstoffzufuhr gestoppt und der Luftstrom erhöht sich kurzzeitig. Nach ca. zwei Minuten stellen sich stationäre Bedingungen wieder ein.

Bei Pelletkessel 1 handelt es sich um eine 15-kW-Kipprostfeuerung mit seitlichem Einschub und er entspricht dem aktuellen Stand der Technik. Der Kessel kann über einen Lastbereich von 30 bis 100 % der Nennwärmeleistung betrieben werden. Im Brennraum befindet sich über dem Brennstoffeinschub eine Füllstandszunge zur Regulierung der Brennstoffzufuhr. Die Entaschung bzw. Rostreinigung erfolgt automatisch innerhalb eines eingestellten Zeitintervalls. Dabei wird ein Glutabbrand durchgeführt und anschließend der segmentierte Rost gekippt und dabei gegen einen fest installierten Stahlkamm abgeschert. Eventuelle Verschlackungen werden dabei gebrochen und vom Rost gelöst. Während der Entaschung wird die Brennstoffzufuhr gestoppt und die Wirbulatoren im Abgaswärmetauscher werden durch Rütteln abgereinigt. Zusätzlich dazu wippt der Rost in regelmäßigen Abständen leicht nach links und rechts, um lose Asche zwischen den Rostelementen durchrieseln zu lassen. Das Primärluft-Sekundärluft-Verhältnis ist bei diesem Kessel durch die Geometrie der Luftzufuhr fest vorgegeben und kann nicht zusätzlich durch Klappen angesteuert werden.

Bei Pelletkessel 2 handelt es sich um eine 16-kW-Brennwertfeuerung mit einem starren Rost und seitlichem Brennstoffeinschub nach aktuellem Stand der Technik. Der Kessel kann über einen Lastbereich von 30 bis 100 % der Nennwärmeleistung betrieben werden und ist sowohl im Brennwertbetrieb als auch im Heizwertbetrieb (hier verwendet) nutzbar. Die Leistungsregelung erfolgt über die Überwachung der Brennraumtemperatur und dient der Anpassung des Brennstoffmassenstroms. Die Entaschung erfolgt automatisch über eine Ascheschnecke, die die über den Rost abgeworfene Asche abtransportiert. Der Wärmetauscher wird mechanisch und mittels Spülen mit Wasser abgereinigt. Das Primärluft-Sekundärluft-Verhältnis ist bei diesem Kessel durch die Geometrie der Luftzufuhr fest vorgegeben und kann nicht zusätzlich durch Klappen angesteuert werden.

4.4.2 Prüfstands Aufbau und Messtechnik

Messungen an den verwendeten Pelletöfen. Die Feuerungsversuche wurden am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums durchgeführt. Abbildung 17 ist eine schematische Darstellung der verwendeten Messstrecke sowie der Anordnung der Messgeräte.

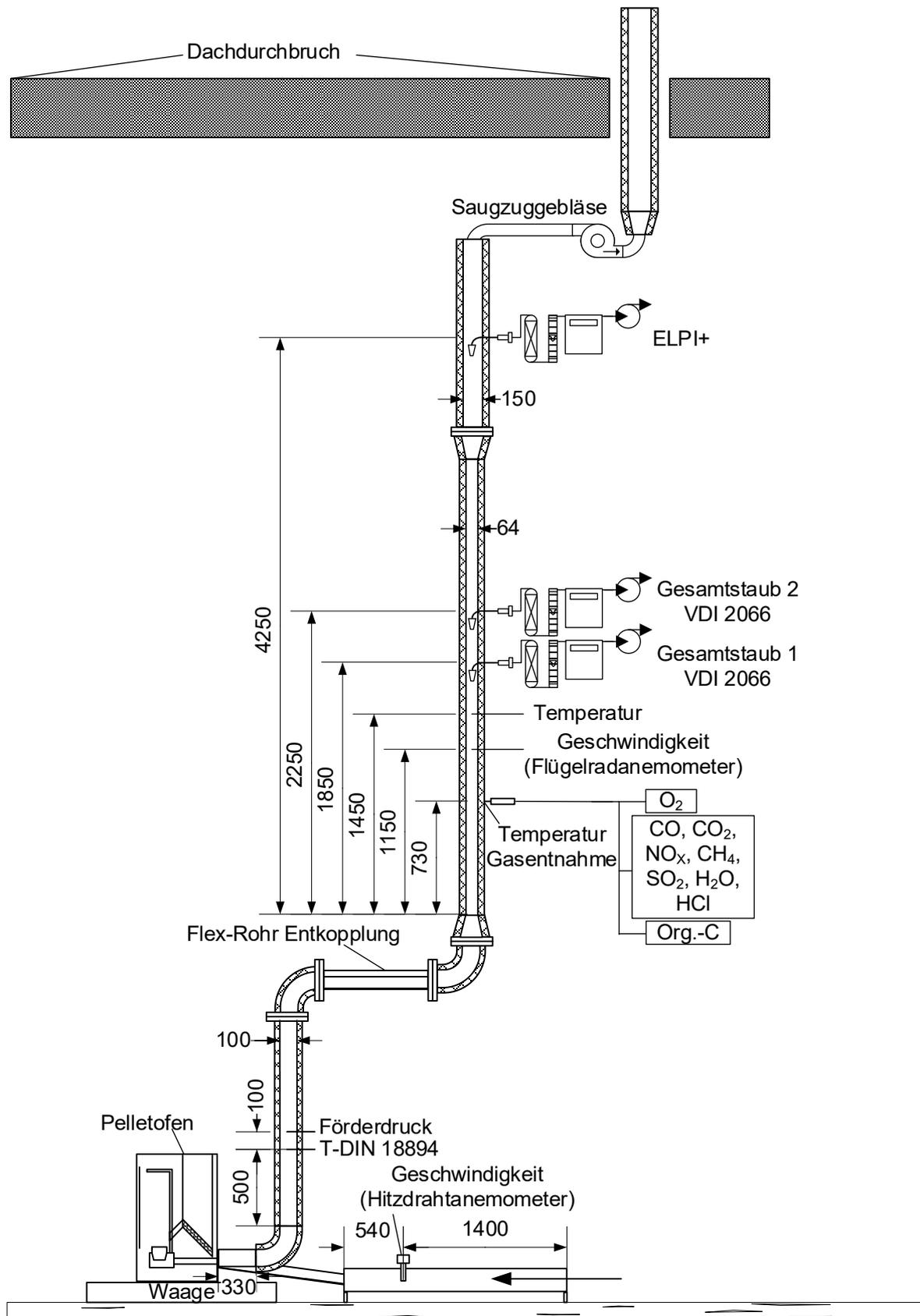


Abbildung 17: Schematische Darstellung der für die Versuche an den Pelletöfen verwendeten Messstrecke und der Anordnung der Messgeräte am Feuerprüfstand des TFZ

Die Abgasmessstrecke besteht aus Edelstahlrohren (V2A). Der untere Teil der Messstrecke, vom Abgasstutzen bis zur Entkopplung aus Edelstahl-Flex-Rohr, hatte einen Innendurchmesser von 100 mm. Der obere Teil der Messstrecke wurde für eine verbesserte Abgasgeschwindigkeitsmessung auf 64 mm verjüngt. Die Messung der Staubemissionen erfolgte in Anlehnung an die VDI 2066 mit Quarzplanfiltern und teilweise vorgeschalteter, mit Quarzwolle gestopfter Hülse [93] (Staubprobenahmeapparatur Paul Gothe GmbH). Bei Pelletöfen 2 konnte auf die vorgeschaltete gestopfte Filterhülse verzichtet werden. 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 rechnerisch auf die Einzelmessungen verteilt. Die Filtrationstemperatur während der Staubprobenahme wurde auf 160 °C eingestellt. 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 der Feuerung mittels einer Abbrandwaage (MettlerToledo GmbH Plattformwaage 600 kg MT KD600) mit einer Auflösung von 0,005 kg.

Für die Messung des Abgasvolumenstroms wurde ein Flügelradanemometer (Höntzsch GmbH, Flügelrad Strömungssensor ZS25/25-ZG4) verwendet. Die Erfassung des Verbrennungsluftvolumenstroms erfolgte mittels Hitzdrahtanemometer (Schmidt Technology GmbH, Strömungssensor SS 20.500)

Zusätzlich zur Messung der Gesamtstaubemissionen wurden Messungen zur Bestimmung der Partikelanzahlverteilung mithilfe eines elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktors (Dekati Ltd., ELPI@+) durchgeführt. Die Partikeldichte wurde bei der Justierung des ELPI+ vor jeder Messung standardmäßig mit 1 kg/m³ angegeben.

Bei beiden Pelletöfen wurden die Brennraumtemperatur sowie die Temperatur im Glutbett (ca. 5 mm über der Mitte des Rosts) mittels Typ-K-Thermoelementen sowie die Druckdifferenz über das Glutbett mittels Differenzdruckmessung (unter und über dem Brennertopf) erfasst.

Messungen an den verwendeten Pelletkesseln. Die Feuerungsversuche wurden, wie auch bei den Pelletöfen, am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums durchgeführt. Abbildung 18 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Messstrecke sowie die Anordnung der Messgeräte.

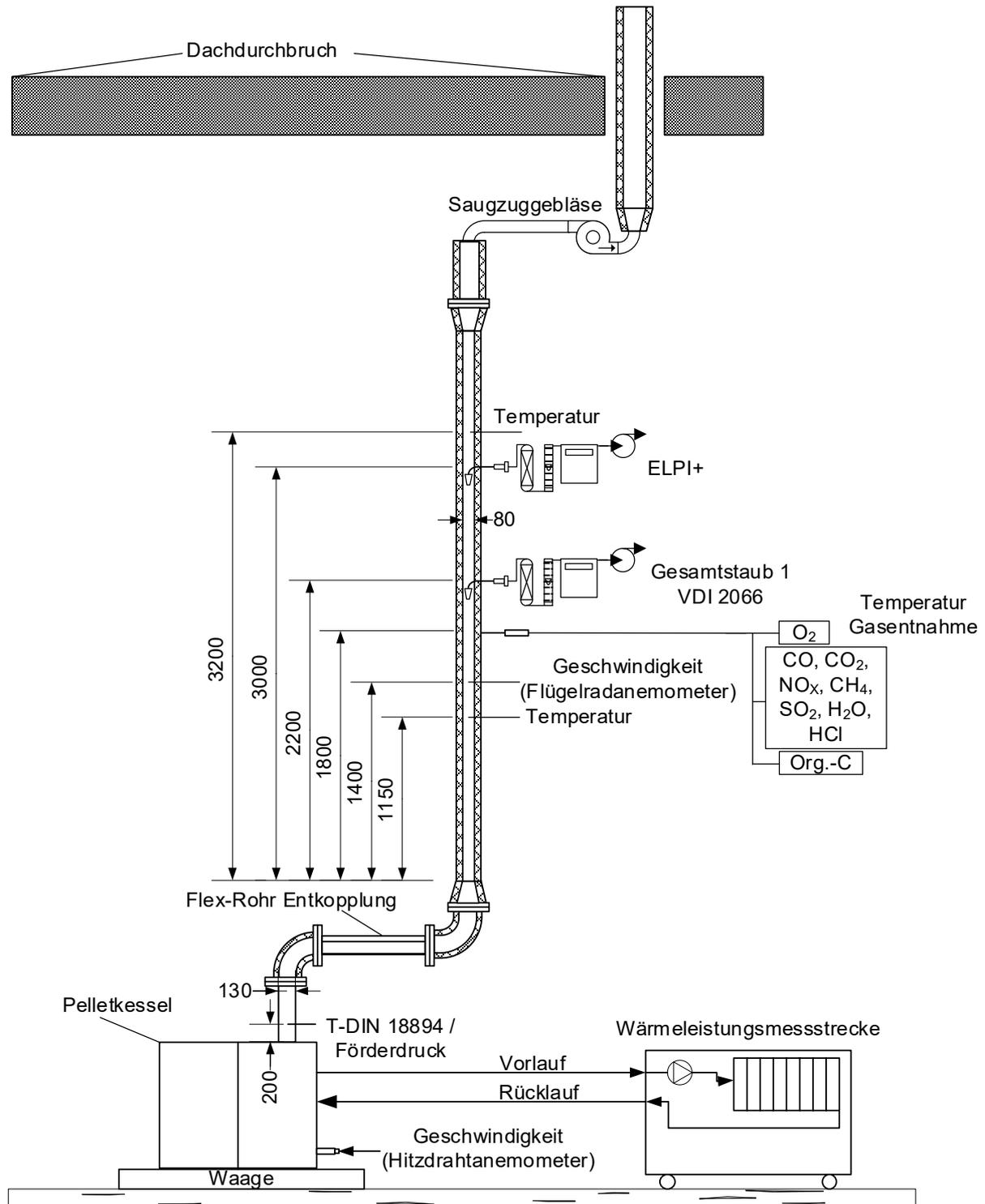


Abbildung 18: Schematische Darstellung der für die Versuche an den Pelletkesseln verwendeten Messstrecke und Anordnung der Messgeräte am Feuerungsprüfstand des TFZ

Die Abgasmessstrecke besteht aus Edelstahlrohren (V2A). Der untere Teil der Messstrecke, vom Abgasstutzen bis zur Entkopplung aus Edelstahl-Flex-Rohr, hatte einen Innendurchmesser von 130 mm. Der obere Teil der Messstrecke wurde nach dem 90°-Bogen auf 80 mm verjüngt.

Im Wesentlichen wurde dieselbe Messtechnik wie bei den Messungen an den Pelletöfen verwendet. Lediglich für die Messung der Verbrennungsluft am zentralen Ansaugstutzen des Pelletkessels wurde ein anderes Hitzdrahtanemometer (Volumenstromsensor Schmidt IL 30.010 MPM, Schmidt Technology GmbH) verwendet.

Die verwendeten Pelletkessel wurden wasserseitig an eine Wärmeleistungsmessstrecke angeschlossen, die den Anforderungen der DIN EN 303-5 [32] zur Erfassung der Wärmeleistung entspricht. Dadurch kann die abgegebene Nutzwärme direkt über den Wasserdurchfluss (Endress + Hauser Promag 53) und die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur (PT100 Thermokon) ermittelt werden. Gleichzeitig kann über diese Wärmeleistungsmessstrecke die Abnahme der Wärmeleistung vom Kessel geregelt werden (Volllast und Teillastbetrieb).

Die Kessel wurden bei Nennwärmeleistung (15 kW bzw. 16 kW) und bei einem vom Hersteller vorgegebenen konstanten Förderdruck von -15 ± 2 Pa betrieben.

4.4.3 Aufbau zur Messung der Umsetzungsprozesse im Feuerraum

Während zwei spezieller Testlaufserien am Pelletofen 2, die in Kooperation von TFZ mit BIOS durchgeführt wurden, wurden von BIOS zusätzlich Messungen im Brennstoffbett und im Feuerraum von Pelletofen 2 mit folgenden Zielsetzungen vorgenommen:

- Vermessung von Brennstoffbetttemperaturprofilen,
- Bestimmung der Rauchgastemperatur am Brennstoffbettaustritt,
- Bestimmung der Gasphasenzusammensetzung am Brennstoffbettaustritt,
- Entnahme des Brennstoffbetts während des Betriebs und sofortiges Quenchen mit Stickstoff zum „Einfrieren“ des Abbrandzustands sowie nachfolgende schichtweise Untersuchung des entnommenen Brennstoffbetts.

Diese Testläufe sollten Basisdaten für die Erstellung und Validierung der CFD-Modelle im Rahmen von AP3 liefern.

Um an zwei Positionen (direkt über dem Brennstoffbett und in der Brennkammer) Messungen der Temperaturen (mittels Absaugpyrometer) und der Gaszusammensetzungen sowie um Temperaturmessungen an mehreren Positionen im Brennstoffbett durchführen zu können, wurden am Ofen seitlich spezielle Messzugänge installiert (siehe Abbildung 19).

Es wurden von BIOS im Haus entwickelte Methoden zur Heißgasprobenahme und Analyse eingesetzt (siehe Abbildung 19). Dabei erfolgt eine Rauchgasabsaugung vom Messpunkt über eine auf 400 °C beheizte Leitung, gefolgt von einer Abkühlung des Rauchgases auf 110 °C und einer Abscheidung von Teeren in einem Quarzfilter. Danach wird das Rauchgas wieder auf 180 °C aufgeheizt und mit N₂ in einer Verdünnungseinheit (Ansyco Type SYCOS P-797) verdünnt, um die Spezieskonzentrationen an die Messbereiche des nachfolgenden FT-IR-Messgeräts (Gaset DX-4000) anzupassen. Ein Teilstrom wird zur Bestimmung des org.-C-Gehalts in einen FID (GRAPHITE 52 M-D PORTABLE (EN-

VIRONNEMENT S.A.) geleitet und das verbleibende Gas zuerst über das FT-IR und nach Abkühlung und Trocknung durch einen weiteren Rauchgasanalysator geleitet (RGA – Rosemount, Typ NGA 2000, Parameter: O₂, CO, CO₂).

Zur Bestimmung des Verdünnungsfaktors wird vor und nach jedem Testlauf CO-Prüfgas (5000 ppm_v) in die Verdünnungseinheit eingeleitet und die CO-Konzentration nach der Verdünnungseinheit gemessen.

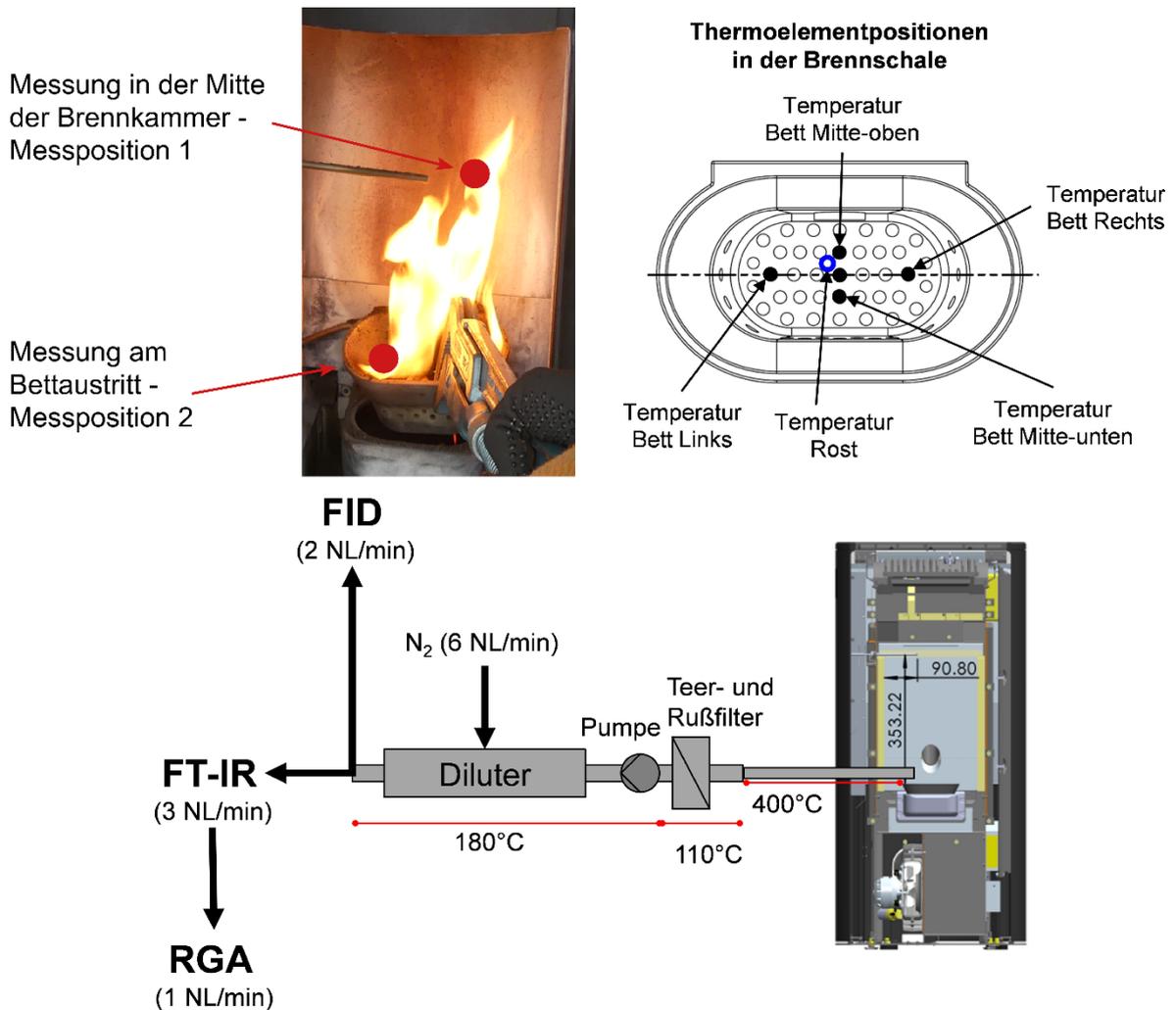


Abbildung 19: Messstellen in der Brennkammer und im Brennstoffbett (oben) sowie Aufbau der Heißgasmessung zur Bestimmung der Brenngaszusammensetzungen am Beispiel der Messposition am Betaustritt (unten)

Am Ende jedes Testlaufs erfolgte ein plötzlicher Reaktionsabbruch durch Quenchen mit Stickstoff (siehe Abbildung 20). Zum Quenchen des Brennstoffbetts wurde die Brennschale aus dem Ofen entnommen und auf einem Behälter platziert, durch den Stickstoff geleitet wird, der in weiterer Folge durch den Rost und das Brennstoffbett strömt. Dieser Behälter wurde zur Kühlung in einem Wasserbad positioniert, da er sich durch Wärmelei-

tung von der Brennschale zu Beginn des Quenchvorgangs stark erwärmt (und damit auch die Quenchwirkung des Stickstoffs vermindert wird).

Nachfolgend wurden einzelne Schichten des Brennstoffbetts (unverkohlte, teilverkohlte und verkohlte Pellets sowie Asche) in der Höhe vermessen und für nachfolgende Analysen beprobt.

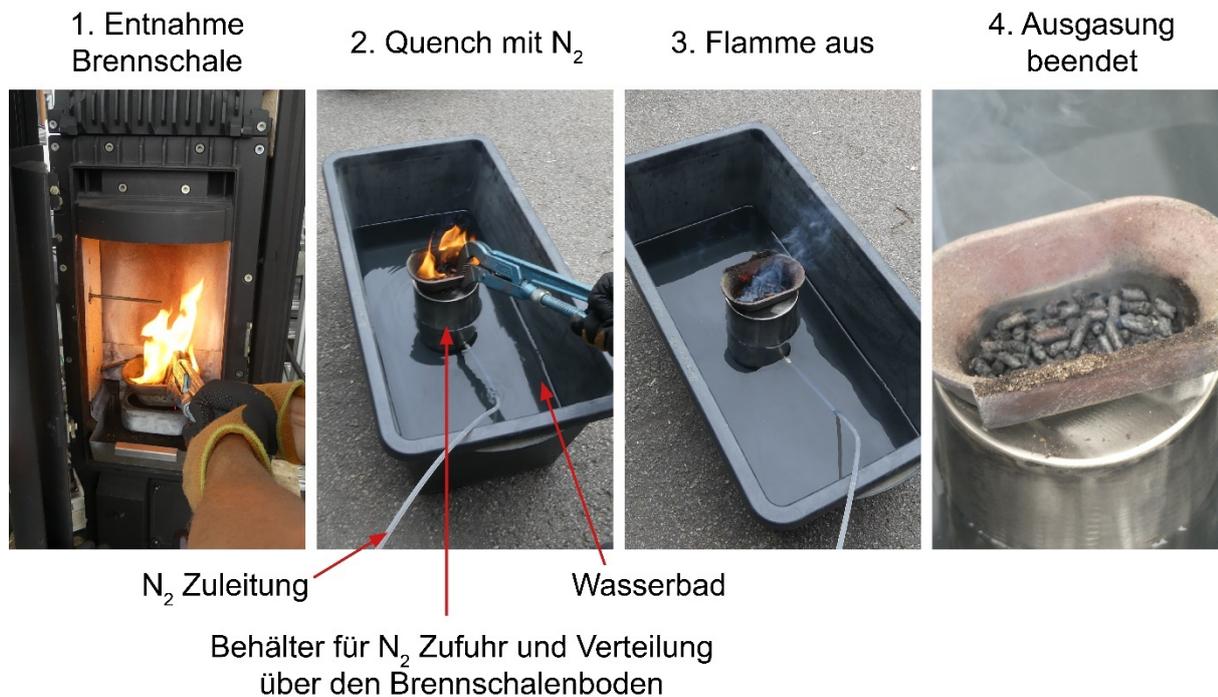


Abbildung 20: Reaktionsabbruch durch Quenchen des Brennstoffbetts

4.4.4 Methodisches Vorgehen während der Feuerungsversuche

Pelletöfen. Bei den Messungen an den Pelletöfen wurde zunächst der zu untersuchende Brennstoff in den Vorratsbehälter eingefüllt und anschließend für jeweils ca. eine Stunde vorgeheizt, um den Pelletofen auf Betriebstemperatur zu bringen und einen möglichst stationären Betrieb bei Nennlast zu erreichen.

Bei Pelletofen 1 wurden nach der Aufheizphase fünf serielle Staubmessungen zu je 15 Minuten durchgeführt. Danach erfolgte ein Glutabbrand durch Abschalten des Pelletofens. Anschließend erfolgten die Entnahme der kalten Asche und des restlichen Brennstoffs und die Reinigung des Pelletofens.

Bei Pelletofen 2 wurden nach dem ersten Reinigungsintervall durch den automatischen Glutabbrand fünf serielle Staubmessungen zu je 14 Minuten durchgeführt. Durch diese Zeitwahl lagen vier Staubmessungen zwischen den stündlichen Reinigungsintervallen. Das Reinigungsintervall fand dann während der fünften Staubmessung statt. Somit kann der Einfluss des Reinigungsintervalls auf die Emissionen mitbewertet werden. Danach erfolgte ebenfalls ein manueller Glutabbrand durch Abschalten des Pelletofens. Anschlie-

ßend erfolgten die Entnahme der kalten Asche und des restlichen Brennstoffs und die Reinigung des Pelletofens. Bei den Messungen mit den Pelletöfen konnten zwei bis drei Pelletsortimente je Messtag untersucht werden.

Um zu untersuchen, inwieweit sich ascheverursachte Auswirkungen, wie z. B. Verschlackungen bzw. Versinterung und/oder ein durch Asche bedingter Anstieg des Glutbetts, erst nach längerem Ofenbetrieb bemerkbar machen, wurden ausgewählte Sortimente über 8 h und ein Sortiment auch über 24 h in Pelletofen 2 untersucht. Hierbei wurden jeweils nach 1 h Aufheizen fünf Staubprobenahmen und am Ende des Ofenbetriebs erneut fünf Staubprobenahmen über je 14 Minuten durchgeführt.

Pelletkessel. Bei den Messungen an den Pelletkesseln wurde diese für 1 bis 1,5 h vorgeheizt, um möglichst stationäre Bedingungen bei Nennlast zu erreichen. Anschließend wurden über einen Zeitraum von ca. 5 h insgesamt fünf Staubmessungen zu je 30 Minuten durchgeführt, um etwaige „Langzeiteffekte“ wie beispielsweise durch Akkumulation von Asche im Brennraum miterfassen und bewerten zu können. Nach dem Versuch kühlte der Kessel über Nacht ab. Die Asche wurde vorsichtig entnommen, der restliche Brennstoff aus dem Vorratsbehälter gesaugt und der Kessel gereinigt. Je Messtag konnte nur ein Brennstoff beim Pelletkessel untersucht werden.

An Pelletkessel 1 wurde ein Pelletsortiment, dass bei den Langzeitmessungen an Pelletofen 2 besonders auffällig war, ebenfalls für 24 h Vollastbetrieb im Pelletkessel verbrannt. Hier wurden je fünf Staubmessungen zu je 30 Minuten nach dem Erreichen der stationären Bedingungen (verteilt über 5 h) und zum Ende des Langzeitversuchs (seriell) durchgeführt.

Messserie zu den Umsetzungsprozessen im Feuerraum mit ausgewählten Brennstoffen. Bei diesen Testlaufserien wurde die im Abschnitt 4.4.3 beschriebene Messtechnik eingesetzt. Es wurden zwei Testlaufkampagnen mit Pelletofen 2 durchgeführt, bei denen jeweils drei Pelletsortimente untersucht wurden.

Während der Testkampagne 1 wurde der Pelletofen 2 mit der Standardregelung betrieben. Diese beinhaltet stündliche Abreinigungsabbrände, in deren Verlauf die Brennstoffzufuhr deaktiviert und das Brennstoffbett abgebrannt wird. Danach erfolgt der erneute Betaufbau. Der Ofenbetrieb unterteilt sich somit in mehrere aufeinanderfolgende Abbrand-Batches, die durch die Reinigungsabbrände abgegrenzt werden. Es wurde pro Testlauftag ein Pelletsortiment eingesetzt und der Ofen wurde über mehrere Batches durchgehend betrieben. Je Batch erfolgten an den beiden Messstellen entweder Messungen der Temperaturen (mittels Absaugpyrometer) oder der Gaszusammensetzung. Die gasförmigen Emissionen am Ofenaustritt wurden über die gesamte Betriebszeit erfasst und es wurden auch über den Testlauftag verteilt mehrere Staubemissionsmessungen durchgeführt. Am Ende des letzten Batches erfolgten Entnahme und Quenchen des Brennstoffbetts.

Um das Verhalten des Brennstoffbetts auch bei einem längeren ungestörten Betrieb untersuchen zu können, wurden während der zweiten Testlaufkampagne die Reinigungsabbrände unterbunden und der Ofen wurde mehrere Stunden kontinuierlich betrieben. Die Messungen mit dem Absaugpyrometer sowie die Bestimmungen der Gaszusammensetzung

zungen an den beiden Messstellen erfolgten abwechselnd in zumindest zwei Wiederholungen über den Tag verteilt. Die gasförmigen Emissionen am Ofenaustritt wurden über die gesamte Betriebszeit erfasst und es wurden auch über den Testlauf tag verteilt mehrere Staubemissionsmessungen durchgeführt. Am Ende des Testlauf tags erfolgten Entnahme und Quenchen des Brennstoffbets.

4.4.5 Versuchsaufbau Laborreaktor und verwendete Messtechnik

Speziell für die Untersuchung des thermischen Zersetzungsverhaltens von Biomasse-Brennstoffen wurde bei BIOS ein Laborreaktor entwickelt. Dieser Batch-Reaktor besteht aus einer elektrisch beheizten Retorte aus Alsint 99.7 (Hochtemperatur-Keramik; 99,7 % Al_2O_3), in der Verbrennungsbedingungen wie in einer Brennstoffschüttung simuliert werden. Das Brennstoffbett wird von oben und seitlich durch Wärmestrahlung aufgeheizt (elektr. Heizelemente; 6 kW). Der Probenhalter (Alsint 99.7) wird auf einer Waage platziert (Online-Massenverlust-Bestimmung) und das Reaktionsmedium (Luft) strömt durch einen Rost ein. Der Reaktionsraum ist gegen den Außenraum über eine Thermoöl-Flüssigdichtung abgedichtet. Es werden während des Abbrands der Gewichtsverlust der Probe, Temperaturen im (an fünf Positionen) und über dem Brennstoffbett sowie die Zusammensetzung des austretenden Gases gemessen (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22).

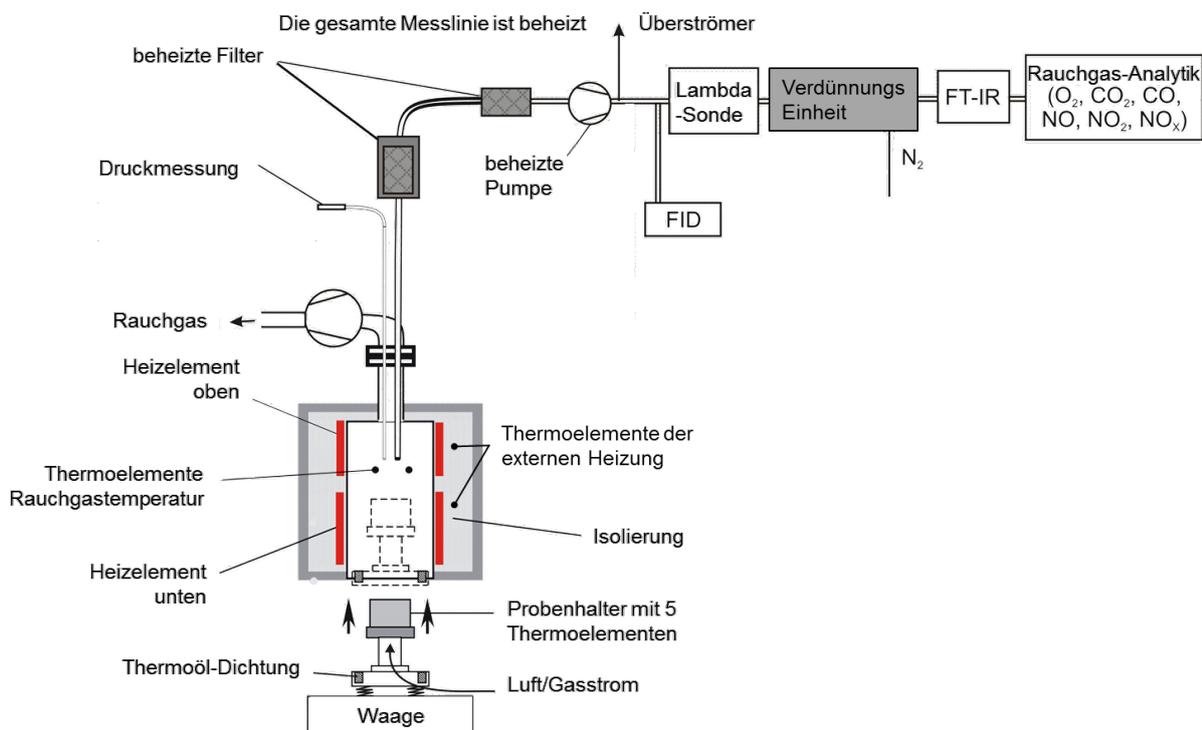


Abbildung 21: Aufbau des Laborreaktors bei BIOS

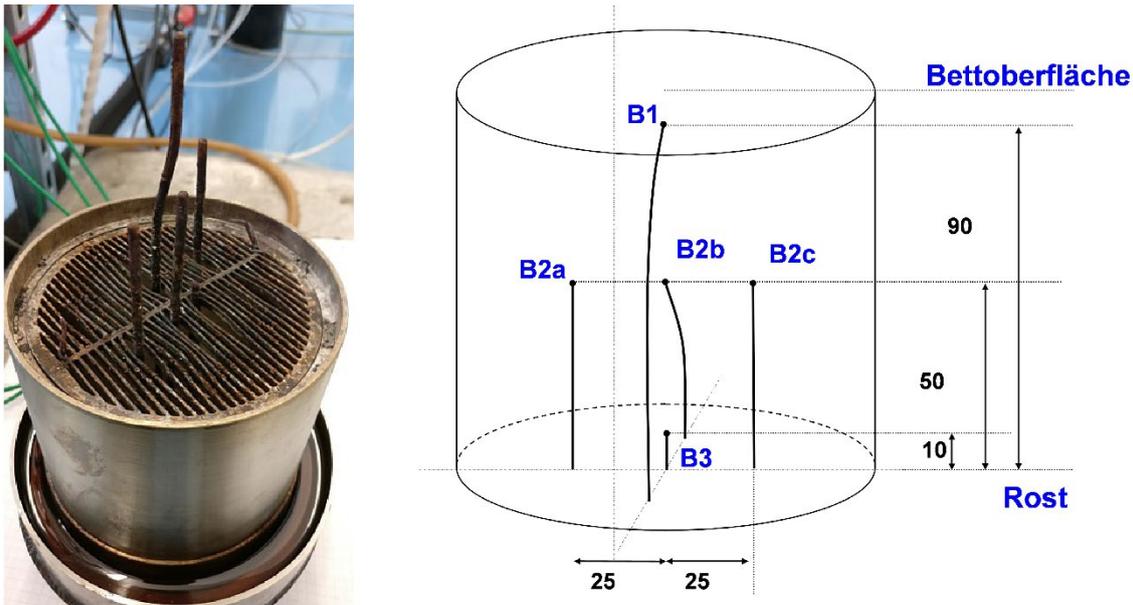


Abbildung 22: Position der Thermoelemente im Brennstoffbett

Abbrandtests an diesem Laborreaktor erfolgen üblicherweise nach folgender Standardprozedur:

Der Probenhalter wird aufgefüllt (Brennstoffeinwaage: ca. 500 g FS) und der Reaktor wird vorgeheizt (Zieltemperaturen: oberes Heizelement 650 °C, unteres Heizelement 450 °C). Dann erfolgen der Einbau des Probenhalters in den Reaktor und die Aktivierung der Luftzufuhr durch das Brennstoffbett (~ 30 NI/min). Während des folgenden Abbrands werden alle relevanten Prozessdaten wie Temperaturen, Abgaszusammensetzung und Gewicht der Probe online aufgezeichnet. Das Versuchsende wird nach vollständigem Abbrand des Brennstoffs erreicht. Die Bestimmung der Gaszusammensetzung am Reaktoraustritt erfolgt dabei mittels FID hinsichtlich organischer Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) (Smart-FID, Er-satec), Lambdasonde (Bosch Lambda Sensor LSU 4.9), FTIR (Ansyco DX-4000) hinsichtlich CO_2 , CO , CH_4 , H_2O , NH_3 , HCN , N_2O und niedriger Kohlenwasserstoffe sowie mittels paramagnetischer (O_2) und ND-IR-Sensoren (CO_2 , CO) (Emerson NGA 2000).

Die so erhaltenen Prozessdaten werden danach hinsichtlich charakteristischer Kenngrößen der thermischen Biomassezersetzung evaluiert. Diese Kenngrößen umfassen den Beginn und die Dauer der flüchtigen Freisetzung sowie der Holzkohlenvergasung, den Beginn und die Dauer der Holzkohlenverbrennungsphase, die maximalen Brennstoffbetttemperaturen und die Massenabbauraten während der einzelnen Phasen, die Geschwindigkeit der Reaktionsfront sowie die Evaluierung der Gasphasenzusammensetzung über die Zeit. Das Einsatzmaterial und die Rückstände (Aschen) werden chemisch analysiert und auf Basis der Analysedaten und der gemessenen Rauchgaszusammensetzungen Elementbilanzen für die Hauptelemente (C, H, N, O) um den Testlauf zur Plausibilitätskontrolle erstellt.

Speziell für die Untersuchungen im Projekt FuturePelletSpec wurde eine neue Methodik für die Testläufe entwickelt, die einen Reaktionsabbruch zu einem definierten Zeitpunkt

und eine nachfolgende detaillierte Evaluierung des Brennstoffbetts ermöglicht. Dazu wurden Abbruchkriterien definiert (siehe Abbildung 23):

- Abbruchkriterium 1 (AK-1): während des Abbaus flüchtiger Bestandteile; definiert durch beginnenden Temperaturanstieg an den Sensoren B2a, B2b, B2c (Reaktionsfront erreicht Mitte des Brennstoffbetts).
- Abbruchkriterium 2 (AK-2): nach Beginn der Holzkohlen-Ausbrandphase; definiert durch Erreichen eines Temperaturmaximums an Sensor B3 (Reaktionsfront hat unteren Bereich des Brennstoffbetts passiert).
- Abbruchkriterium 3 (AK-3): kurz vor Ende der Holzkohlen-Ausbrandphase; definiert durch Abfall der Temperatur an Sensor B3 sowie Erreichen eines Maximums der CO₂-Konzentrationen im Abgas.

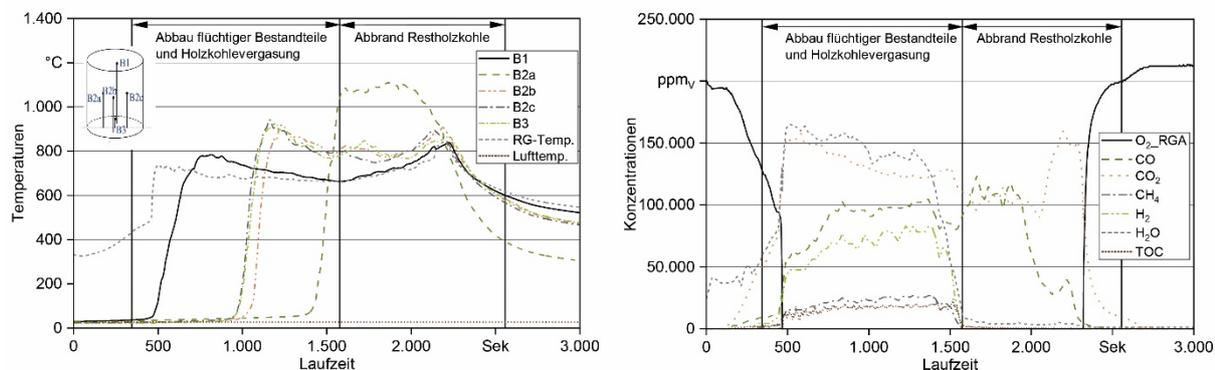


Abbildung 23: Definition der Abbruchkriterien (nähere Erläuterungen zu den Verläufen der Temperatur- und Spezies-Trends siehe Unterkapitel 8.1)

Nach Erreichen des jeweiligen Kriteriums wird von Luftzufuhr auf Stickstoffspülung umgeschaltet und gleichzeitig die Heizung des Reaktors abgeschaltet. Es wird abgewartet, bis die Temperatur an Position B1 auf unter 300 °C bzw. die CO-Konzentrationen im Abgas auf fast null gesunken sind, dann wird der Probenhalter aus dem Reaktor gefahren. Anschließend erfolgen die Bestimmung der Höhe des Brennstoffbetts an der Oberfläche, die schichtweise Entnahme des Brennstoffbetts nach optischer Evaluierung des Ausbrandgrads sowie die Vermessung, Fotodokumentation und Beprobung jeder Schicht. Dabei wird jede Schicht im Brennstoffbett über den optischen Eindruck des „Verkohlungszustands“ identifiziert.

Mit Proben der einzelnen Schichten wurden nachfolgend Analysen hinsichtlich Zusammensetzung (C-, H-, N- und Aschegehalt), Pelletdichte bzw. Holzkohledichte, Druckfestigkeit sowie 3-D-Vermessungen einzelner Pellets zur Bestimmung von Oberfläche und Volumen (3-D-Scan) durchgeführt. So konnten detaillierte Stoffdaten zu Pellets und zum Pelletbett in unterschiedlichen Ausbrandstadien ermittelt werden, die eine wichtige Grundlage für die Modellentwicklung im AP3 bildeten.

4.5 Fördermechanische Versuche am kalten Pelletofen

Es wurden mit ausgewählten Sortimenten aus dem Pelletscreening und den gezielt für die Untersuchungen hergestellten Versuchsbrennstoffen fördermechanische Versuche am kalten Pelletofen 2 (siehe Abschnitt 4.4.1) durchgeführt. Dabei wurden zwei 5-l-Proben je Sortiment genommen und an diesen Proben der Feinanteil nach Norm und die Längenverteilung der Pellets mittels Bildanalyse (Haver & Boecker OHG, Haver CPA 4 Conveyor) vor der Förderung im Pelletofen untersucht. Als Ausgangswert für die Schüttdichte wurde der Wert, der bei Anlieferung (bei Brennstoffen für das Pelletscreening) bzw. nach der Produktion (bei hergestellten Versuchsbrennstoffen) festgestellt worden war, herangezogen.

Anschließend wurden alle Proben nacheinander in den vorher gereinigten Pelletbehälter gegeben und durch Relaisstest im Technikermenü des Pelletofens bei zum Ofenbetrieb identischer Schneckendrehzahl über eine Rutsche in einen Metallbehälter gefördert (Abbildung 24).



Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Durchführung der Förderversuche am kalten Pelletofen

Dabei wurde darauf geachtet, dass die Fallhöhe der Pellets in den Metallbehälter ca. der Fallhöhe der Pellets in die Brennerschale im Realbetrieb entspricht. Während des Förderversuchs wurden bei Leerlaufen der Schnecke (Abbildung 25) der seitlich liegende Brennstoff mit einem Pinsel nachgeschoben, bis der Behälter leer war. Der im Behälter und der Förderschnecke nach Durchlaufen der Pellets zurückgebliebene Feinanteil (Abbildung 25) wurden vollständig entnommen und zur geförderten Probe hinzugegeben.



Abbildung 25: Blick in den Pelletbehälter nach Durchlauf von ca. $\frac{2}{3}$ der Probenmenge

Anschließend wurden erneut Feinanteil, Schüttdichte und Pelletlängenverteilung mittels Bildanalyse bestimmt. Der Ablauf der Förderversuche ist zur Verdeutlichung in Abbildung 26 nochmals grafisch dargestellt.

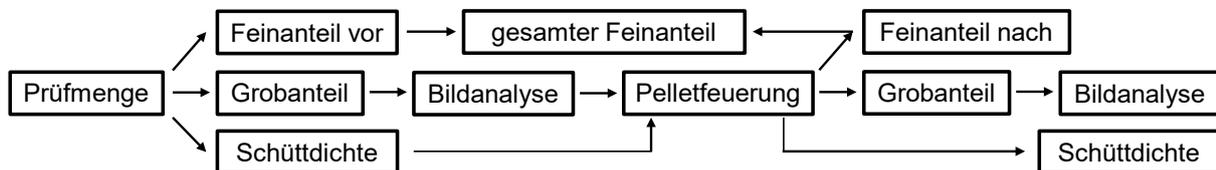


Abbildung 26: Ablauf der Untersuchung zur mechanischen Beanspruchung der Pellets durch die Fördereinrichtung

4.6 Statistische Methoden

Alle statistischen Analysen der Messdaten wurden mit der Software Origin Pro 2015 durchgeführt. Für den Test auf Normalverteilung der Messdaten wurde der Shapiro-Wilk-Test verwendet. Für die Varianzanalyse kam bei Normalverteilung der Einzelwerte eine einfache ANOVA zum Einsatz. Für den paarweisen Mittelwertvergleich aller Mittelwerte einer gesamten Messreihe wurde der Tukey-Test verwendet. Bei Messungen mit hohen Streuungen der Einzelwerte wurden die Ergebnisse des Tukey-Tests, bei Wiederlegung der Nullhypothese zudem mit dem Fischer-LSD-Test abgeglichen. Für den direkten Vergleich, ob sich zwei Mittelwerte signifikant unterscheiden, wurde ein t-Test für verbundene Stichproben verwendet. Für die Korrelationsanalyse wurde eine Pearson-Korrelation berechnet. Die Messdaten wurden als normalverteilt bzw. signifikant angenommen, sobald der

p-Wert $\leq 0,05$ war. Wenn in der folgenden Ergebnisdarstellung also Signifikanz festgestellt wird, sind stets diese Bedingungen erfüllt.

5 Ergebnisse der Brennstoffanalytik

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Brennstoffanalytik diskutiert. Dabei wird wie in Abschnitt 4.2.3 zwischen den Pelletsortimenten aus dem Pelletscreening und den speziell hergestellten oder beschafften Versuchsbrennstoffen unterschieden. Alle Analyseergebnisse finden sich im Anhang 1 in tabellarischer Form.

5.1 Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)

Im folgenden Kapitel werden die Analyseergebnisse der 28 untersuchten Pelletsortimente dargestellt (siehe Unterkapitel 4.1). Sie werden anonymisiert dargestellt und sind in allen Tabellen und Diagrammen nach dem Aschegehalt aufsteigend sortiert (siehe Anhang 1, Tabelle 71 und Tabelle 77).

5.1.1 Physikalische Brennstoffqualität

Die Pelletlänge muss für Holzpellets der Klasse A1 nach DIN EN ISO 17225-2, ENplus und DINplus zwischen 3,15 und 40 mm liegen. Außerdem darf nach Norm höchstens 1 m-% der Pellets über 40 mm Länge aufweisen und eine maximale Länge von 45 mm überschreiten. Alle hier geprüften Sortimente liegen innerhalb dieser Spezifikationen (siehe Abbildung 27).

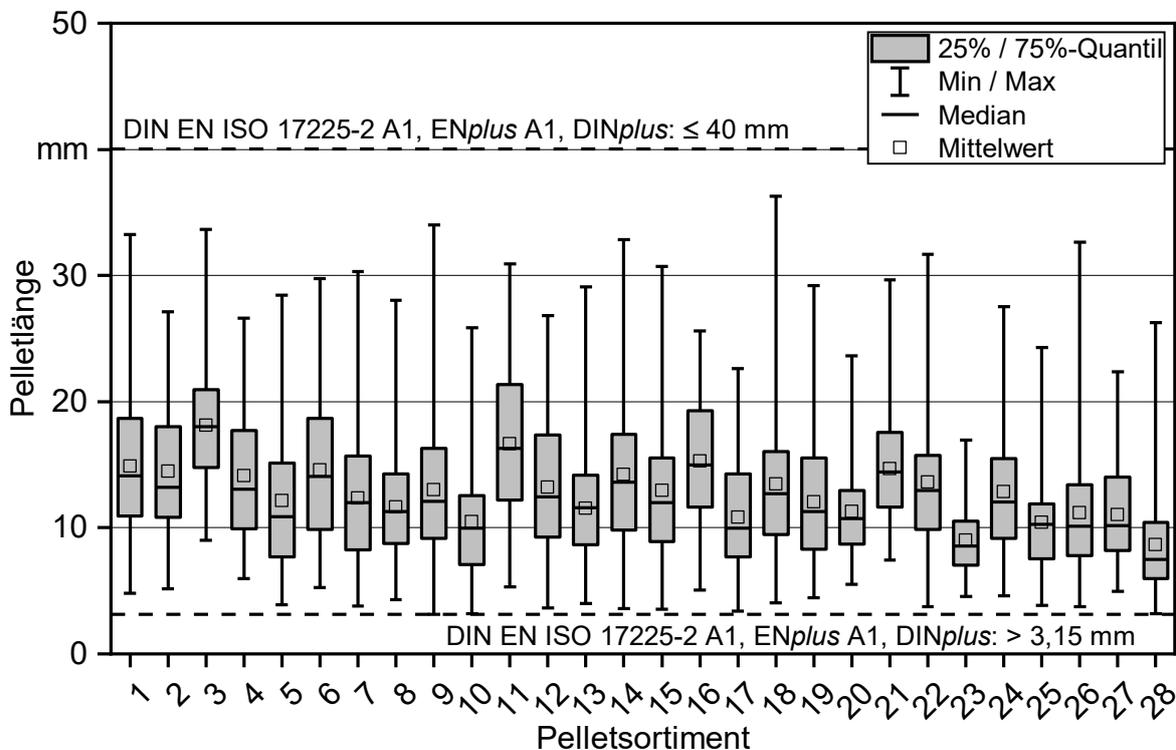


Abbildung 27: Längenverteilung der Pelletsortimente im Pelletscreening bei einer Messung mit Messschieber von je 100 Pellets je Sortiment

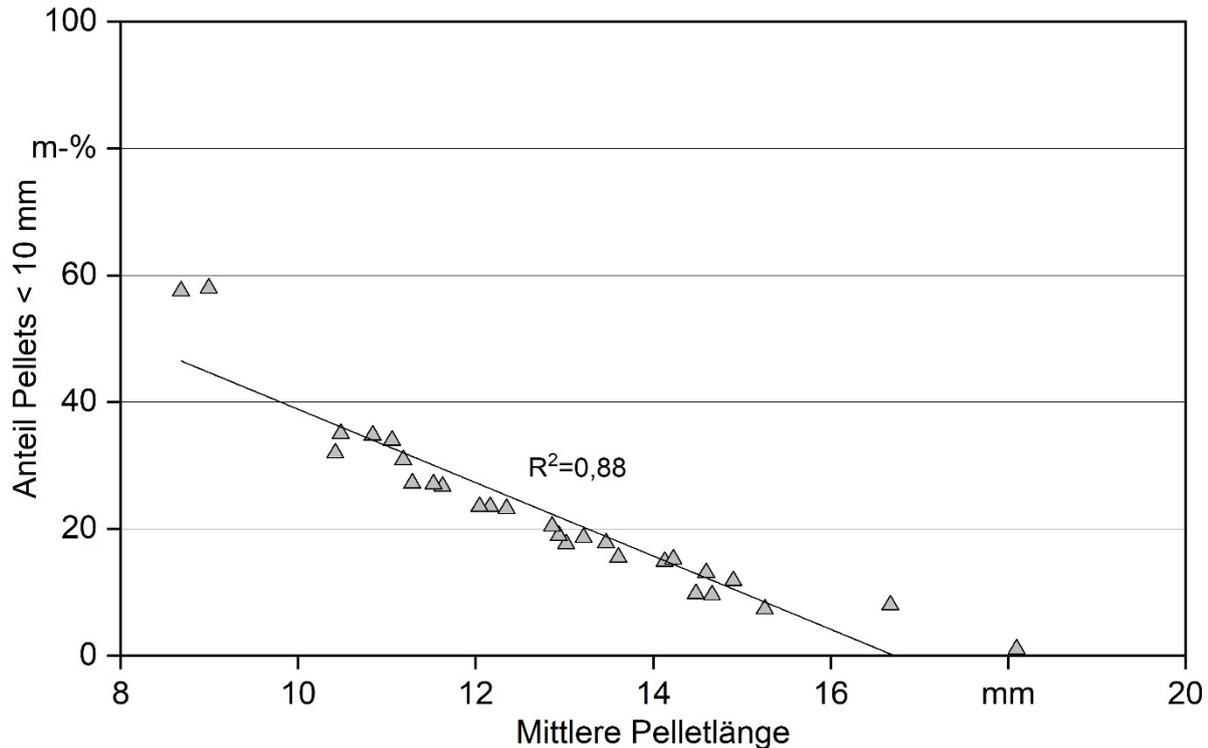


Abbildung 28: Lineare Regression des Anteils an Pellets < 10 mm mit der mittleren Pelletlänge der Pelletsortimente im Pelletscreening

Die mittleren Längen lagen zwischen 8,7 mm (Sortiment 28) und 18,1 mm (Sortiment 3). Der Durchmesser der Pellets lag für alle Sortimente im Bereich von 6 ± 1 mm und der Anteil an Pellets < 10 mm zwischen 1 m-% und 58 m-% (siehe Anhang, Tabelle 73). Dabei zeigt der Massenanteil an Pellets < 10 mm eine signifikante Abhängigkeit ($R^2 = 0,88$) zur Pelletlänge (siehe Abbildung 28).

Für die 28 Sortimente wurde bei Anlieferung nach Homogenisierung und Probennahme der Wassergehalt bestimmt. Die gemessenen Wassergehalte (Abbildung 29) liegen zwischen 3,3 m-% (Sortiment 10) und 9,4 m-% (Sortiment 9). Damit halten alle untersuchten Sortimente den für die A1-Qualität geforderten Grenzwert von 10 m-% ein. Dennoch wird von den hier untersuchten Proben nahezu der komplett mögliche Schwankungsbereich abgedeckt. Der überwiegende Teil der untersuchten Sortimente liegt aber in einem engen Bereich zwischen 6,0 und 7,7 m-%.

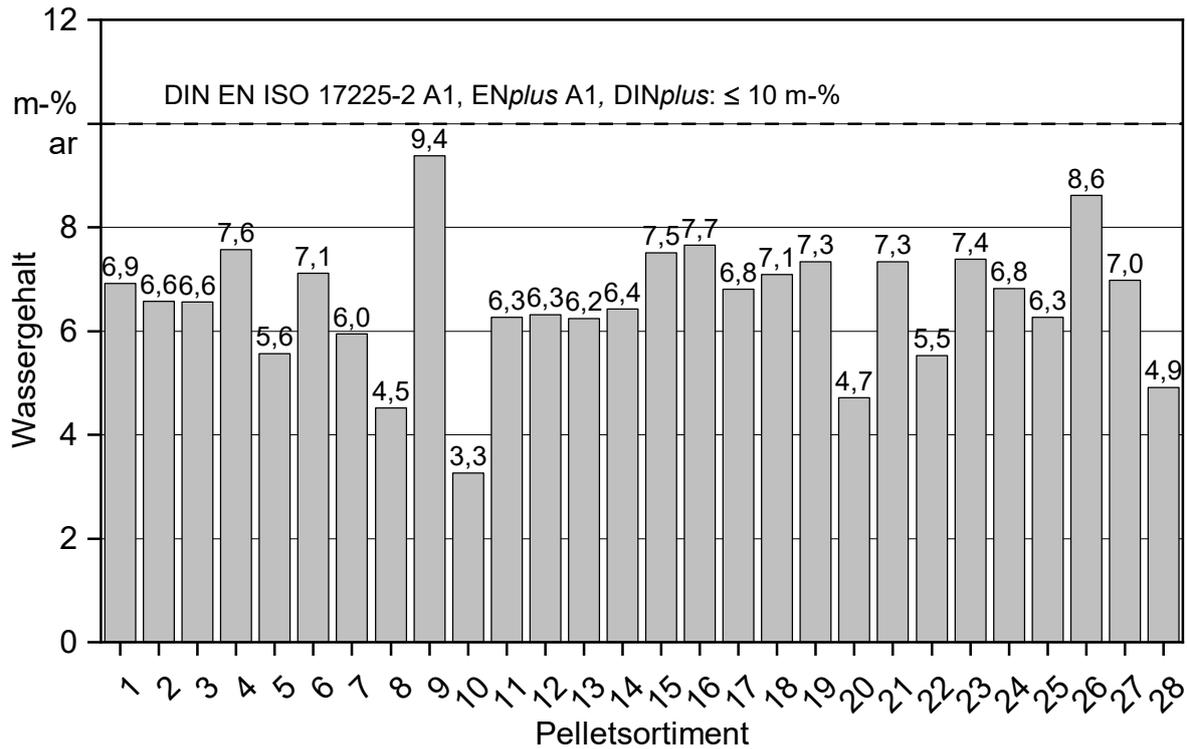


Abbildung 29: Wassergehalte der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening

Der Aschegehalt der untersuchten Pelletsortimente lag zwischen 0,28 m-% (Sortiment 1) und 0,81 m-% (Sortiment 28). Die Sortimente 26 bis 28 liegen auf dem Grenzwert oder leicht über dem für die A1-Qualität geforderten Aschegehaltsgrenzwert, obwohl diese mit diesem Zertifikat vertrieben wurden. Beim Sortiment 26 handelt es sich um Tropenholzpellets, hier lag der Aschegehalt bei 0,69 m-% und wird daher auf 0,7 m-% gerundet. Das Sortiment 27 wurde im Baumarkt erworben und könnte nach Informationen des DEPI Importware aus Osteuropa sein. Dies war allerdings durch die Beschriftung der Pelletsäcke nicht ersichtlich. Nur das Sortiment 28 überschreitet den für A1-Pelletqualität geforderten Aschegehalt von 0,7 m-%. Es wurde über einen Brennstoffhändler bezogen und kommt gemäß Beschriftung aus Litauen. Der Großteil der hier untersuchten Pelletsortimente, nämlich 22 der 28 Sortimente) weist einen Aschegehalt von unter 0,50 m-% auf.

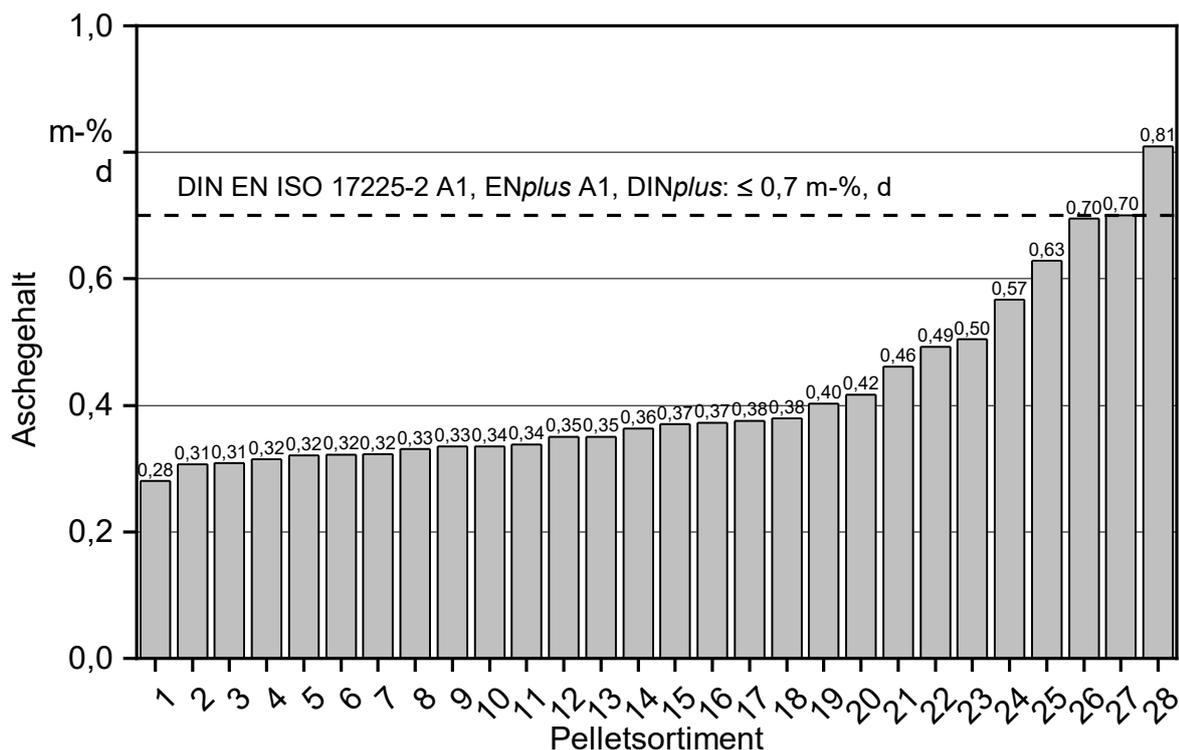


Abbildung 30: Aschegehalt der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening

Die mechanische Festigkeit (Abbildung 31) der untersuchten Pelletsortimente lag zwischen 96,9 m-% (Sortiment 28) und 99,5 m-% (Sortiment 4). Dabei unterschreiten das Sortiment 23 mit 97,2 m-% und Sortiment 28 mit 96,9 m-% deutlich die Anforderung für die ENplus-A1-Qualität von 98,0 m-% sowie die Anforderung nach DIN EN ISO 17225-2, DINplus und ENplus A2 & B von 97,5 m-%. Das Sortiment 23 war bei Ökotest im Jahr 2017 mit „sehr gut“ eingestuft worden [70], dies wurde jedoch 2018 wegen der Unterschreitung der mechanischen Festigkeit von der Redaktion in „mangelhaft“ geändert [78].

Beim Feinanteil < 3,15 mm lag lediglich das Sortiment 28 über dem Grenzwert für Sackware von 0,5 m-% und über dem Grenzwert für Schüttgüter von 1,0 m-% (siehe Abbildung 32). Alle anderen Sortimente lagen unter 0,5 m-%. Der Großteil der hier untersuchten Sortimente weist einen Feinanteil $\leq 0,2$ m-% auf. Die mechanische Festigkeit korreliert hier signifikant ($p < 0,05$, $R^2 = 0,52$) mit dem Feinanteil (siehe Abbildung 33). Dieser Zusammenhang ist zu erwarten, da bei niedriger mechanischer Festigkeit auch mehr Abrieb beim Transport der Pellets entsteht.

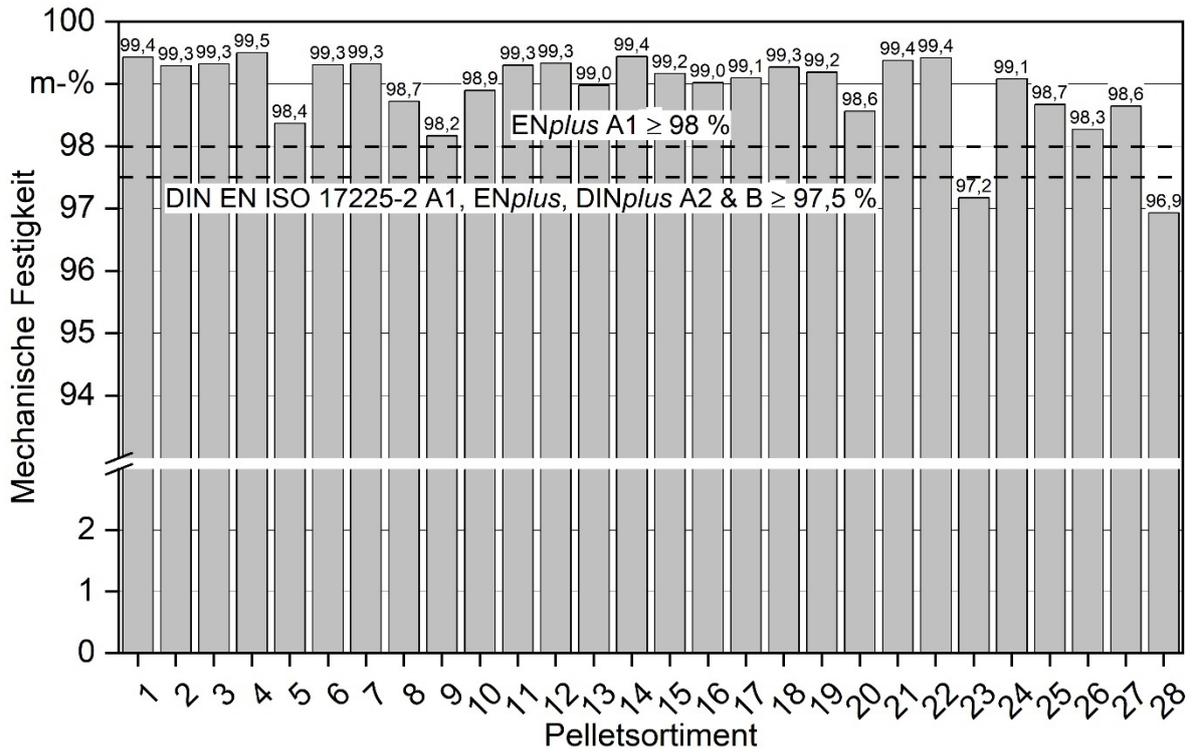


Abbildung 31: Mechanische Festigkeit der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening

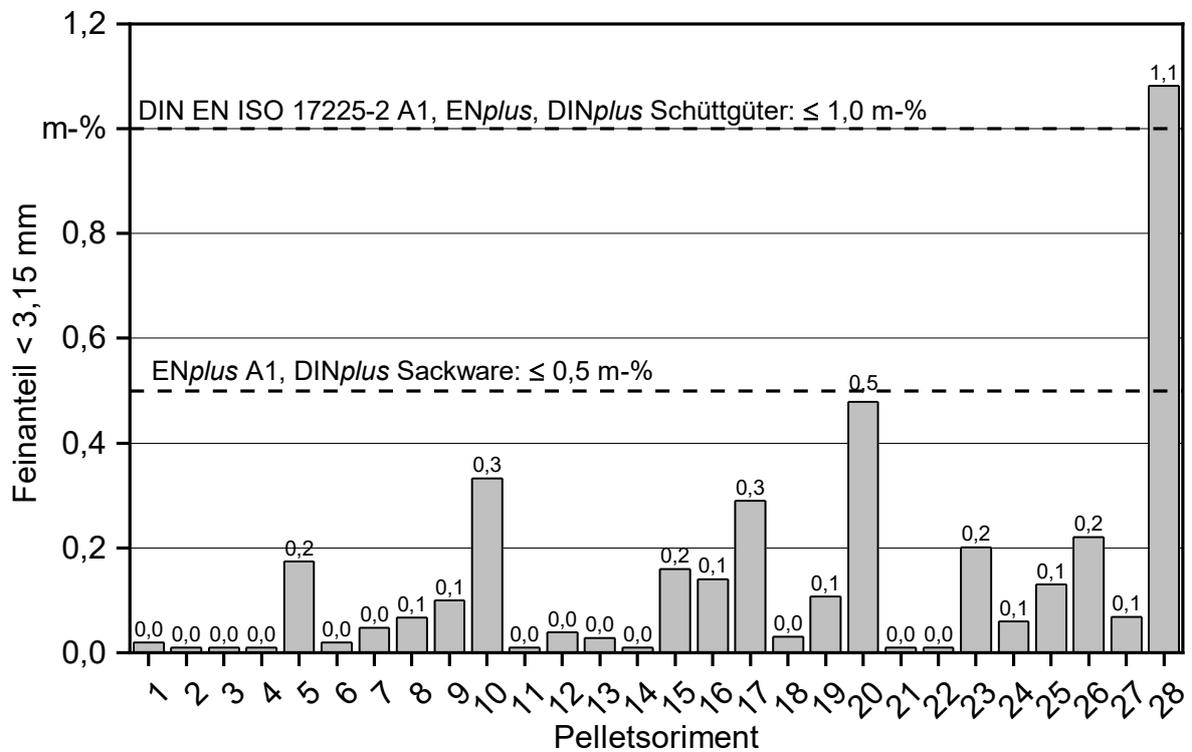


Abbildung 32: Feinanteil der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening

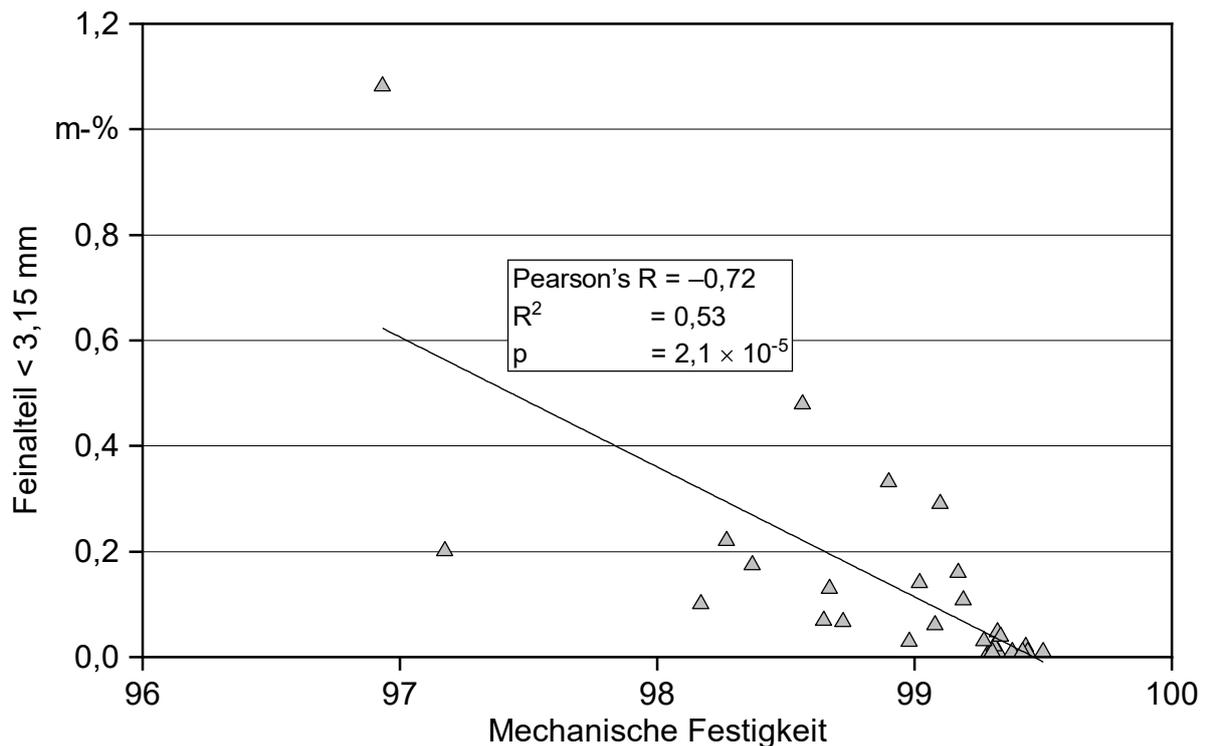


Abbildung 33: Lineare Regression zwischen Feinalteil und mechanischer Festigkeit im Pelletscreening

Die Schüttdichten der untersuchten Pelletsortimente im Anlieferungszustand (ar) sind in Abbildung 34 dargestellt. Alle Sortimente weisen Schüttdichten von mehr als 600 kg/m³ und weniger als 750 kg/m³ auf. Damit werden die Anforderungen der Norm sowie der Zertifizierungsprogramme für die Schüttdichte eingehalten. Die niedrigste Schüttdichte wurde für Sortiment 25 mit 614 kg/m³ bestimmt, die höchste mit 710 kg/m³ für Sortiment 10. Damit wird durch die hier untersuchten Sortimente nahezu das komplette für A1-Pellets zulässige Spektrum an Schüttdichten abgedeckt.

Der Heizwert auf wasserfreier Bezugsbasis (d) der untersuchten Sortimente (Abbildung 35) lag zwischen 18,5 MJ/kg (Sortiment 13) und 19,3 MJ/kg (Sortiment 5). Damit lagen alle untersuchten Pelletsortimente um mindestens 2 MJ/kg über der Mindestanforderung von 16,5 MJ/kg.

Hinsichtlich der nach Norm und Zertifizierungsprogrammen limitierten chemischen Elemente (Unterkapitel 3.1, Tabelle 2) gab es keine Überschreitungen oder Auffälligkeiten (siehe Anhang, Tabelle 76 und Tabelle 77).

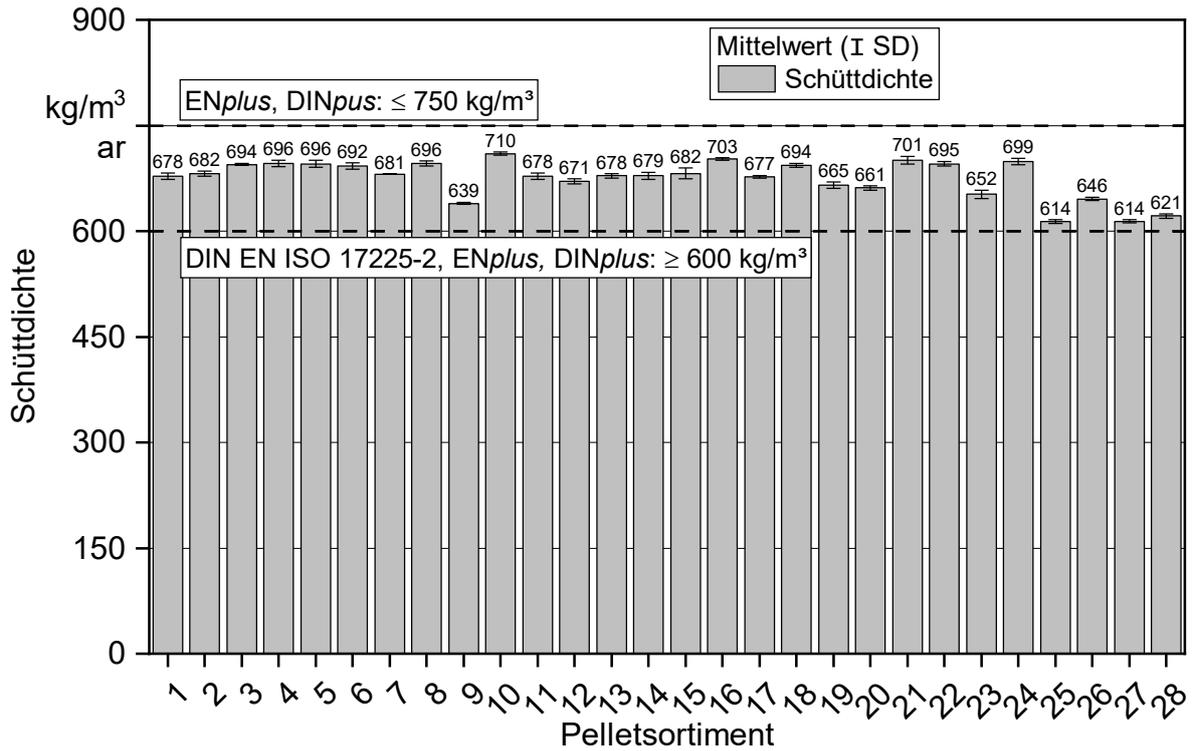


Abbildung 34: Schüttdichte der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening

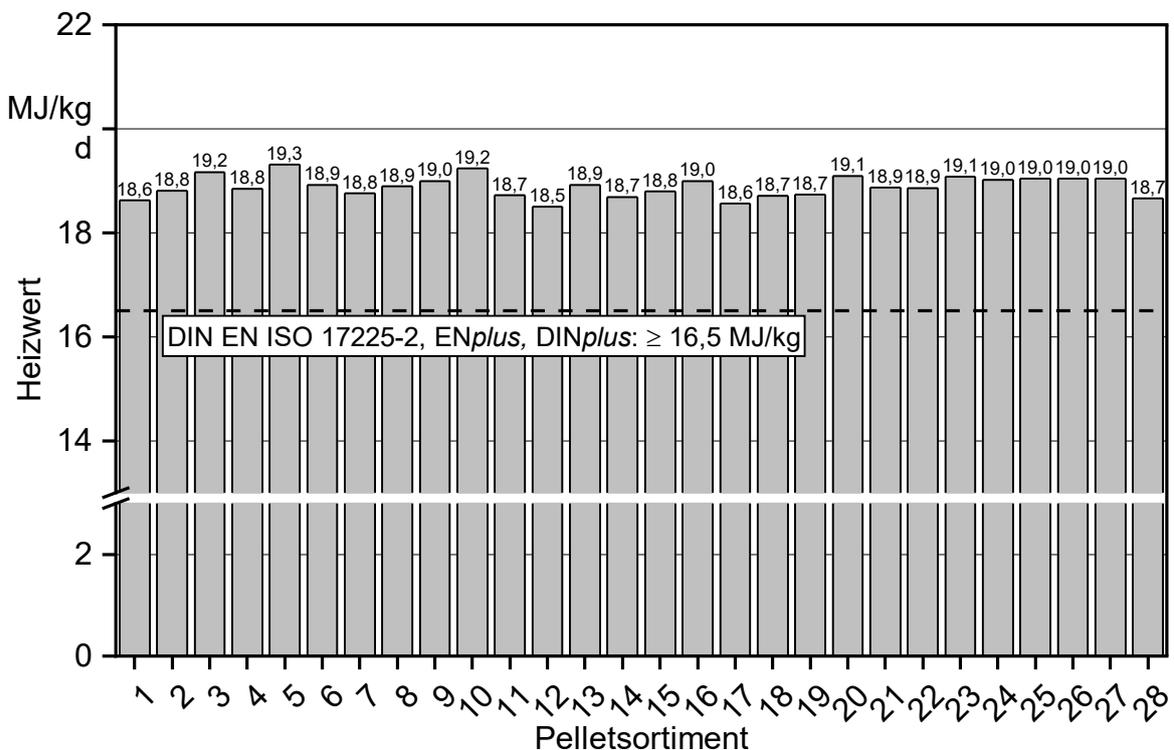


Abbildung 35: Heizwert der untersuchten Pelletsortimente im Pelletscreening

Partikeldichte. Zusätzlich zur Schüttdichte wurde die Partikeldichte (Unterkapitel 4.3) untersucht. Die ermittelte Partikeldichte im Anlieferungszustand (Abbildung 36) lag zwischen 1.239 kg/m³ (Sortiment 25) und 1.330 kg/m³ (Sortiment 10). Damit schwankt sie zwischen

den Sortimenten um maximal 91 kg/m³. Das ist ähnlich wie bei der Schüttdichte, die eine maximale Schwankungsbreite von 96 kg/m³ aufwies. Die Standardabweichung der Einzelbestimmungen liegt bei der Partikeldichte allerdings deutlich höher (siehe Anhang, Tabelle 71), was mit dem deutlich unterschiedlichen Quellverhalten zu erklären ist (siehe Abschnitt 5.2.1, Abbildung 62). Im neuen Entwurf des ENplus-Handbuchs soll die Partikeldichte zunächst nur dokumentiert werden [43].

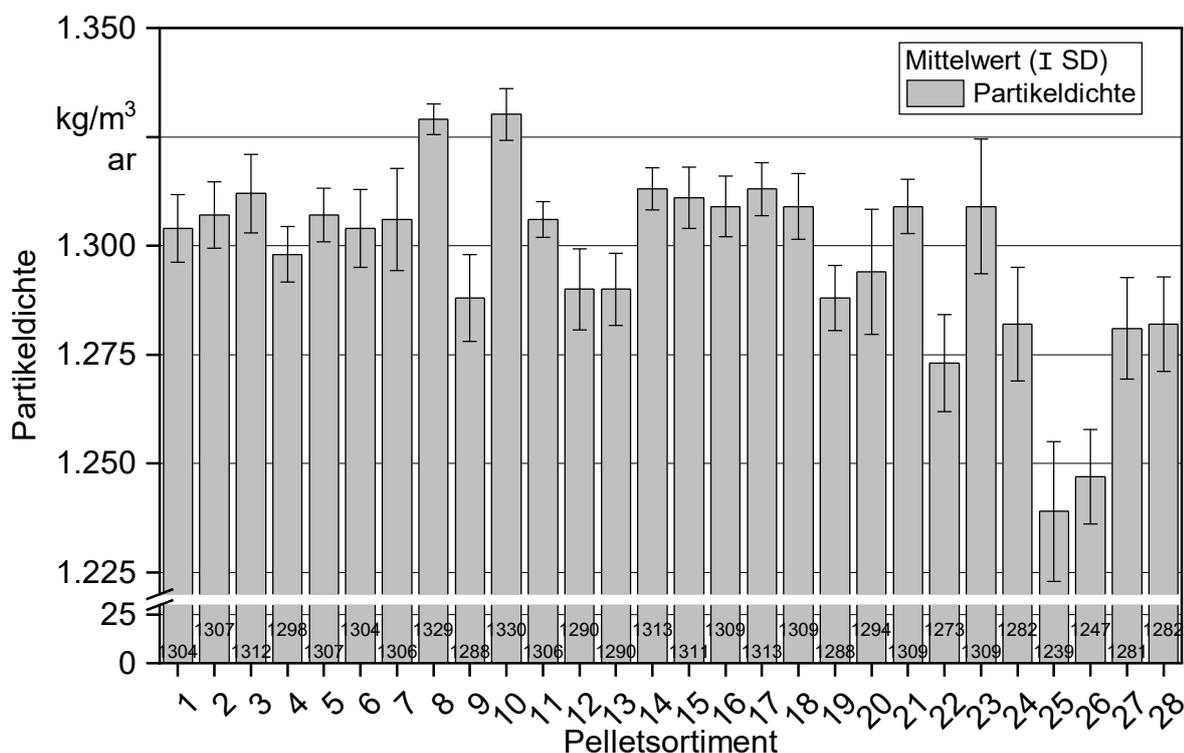


Abbildung 36: Partikeldichte der Pelletsortimente im Pelletscreening

Die Partikeldichte (Abbildung 37) zeigt eine positive Korrelation zur Schüttdichte auf ($p < 0,05$). Der Pearson-Faktor von 0,66 belegt, dass die Partikeldichte einen starken Einfluss auf die Schüttdichte hat. Neben der Partikeldichte hat die Pelletlängenverteilung maßgeblichen Einfluss auf die Schüttdichte [52]. Bei den hier untersuchten Pelletsortimenten zeigt die Schüttdichte eine positive Korrelation mit der mittleren Pelletlänge (Pearson's $R = 0,54$), die auch signifikant ist (siehe Tabelle 16). Dies erscheint allerdings unplausibel, da bei längeren Pellets in der Schüttung eher mehr Hohlräume entstehen und dabei die Schüttdichte sinken sollte. Da bei den Sortimenten aus dem Pelletscreening immer unterschiedliche Rohmaterialien eingesetzt wurden, scheint es wahrscheinlicher, dass sich gleichzeitig mit der Länge auch die Partikeldichte ändert, was zu einer leicht positiven Korrelation (Pearson's $R = 0,28$) führt, die jedoch nicht signifikant ist (siehe Tabelle 16).

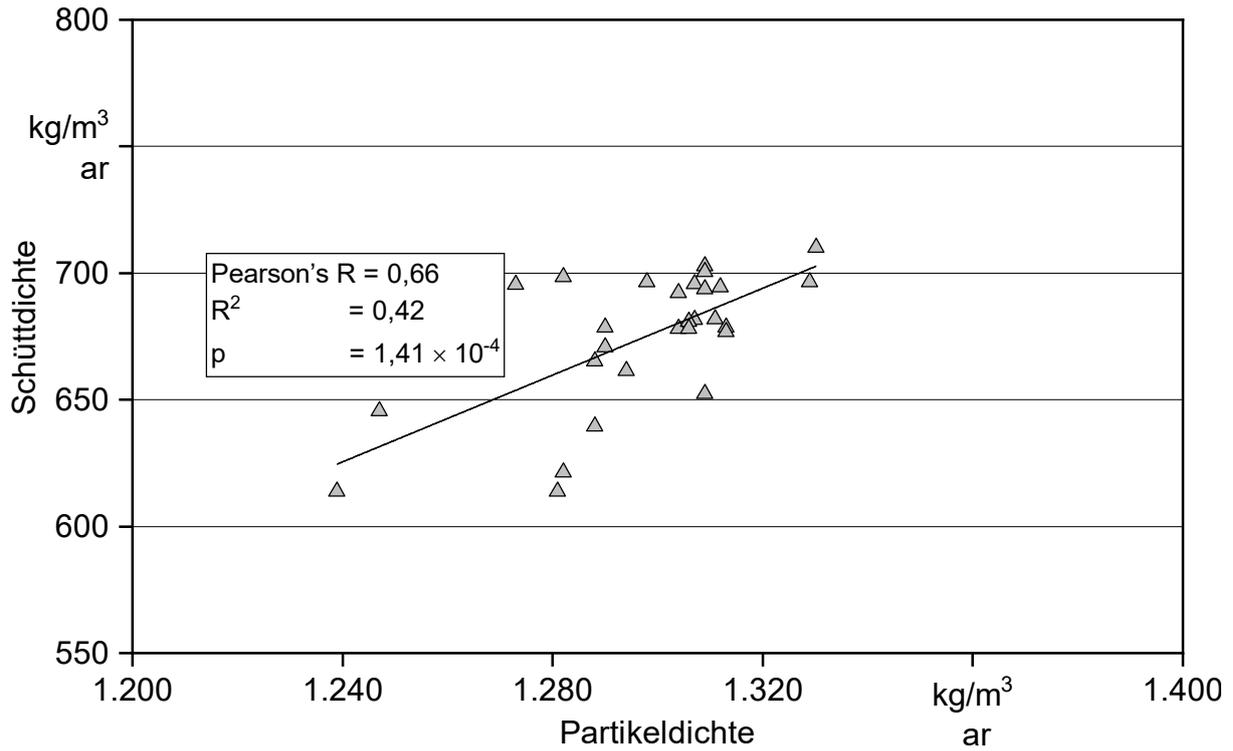


Abbildung 37: Abhängigkeit der Schüttdichte von der Partikeldichte im Pelletscreening

Tabelle 16: Korrelation nach Pearson relevanter Parameter aus dem Pelletscreening

	Schüttdichte	Partikeldichte	Feinanteil	Mechanische Festigkeit	Mittlere Länge	Pellethärte
Schüttdichte	1	0,66*	-0,42	0,60*	0,54*	0,25
Partikeldichte	0,66*	1	-0,12	0,24	0,29	0,22
Feinanteil	-0,42*	-0,12	1	-0,73*	-0,61*	-0,39*
Mechanische Festigkeit	0,60*	0,24	-0,73*	1	0,71*	0,46*
Mittlere Länge	0,54	0,29	-0,61*	0,71*	1	0,45*
Pellethärte	0,25	0,22	-0,39*	0,46*	0,45*	1

* (fett): Der p-Wert der Pearson-Korrelation liegt unter 0,05, d. h., die Steigung der Korrelation unterscheidet sich signifikant von null; Datenbasis sind Werte im Anlieferungszustand (ar).

Aus der Schüttdichte und der Partikeldichte lässt sich nach Formel (4.7) in Abschnitt 4.3.1 die Schüttungsporosität berechnen (siehe Abbildung 38). Diese liegt für die Sortimente aus dem Pelletscreening zwischen 0,45 (Sortiment 22) und 0,52 (Sortiment 27 und 28).

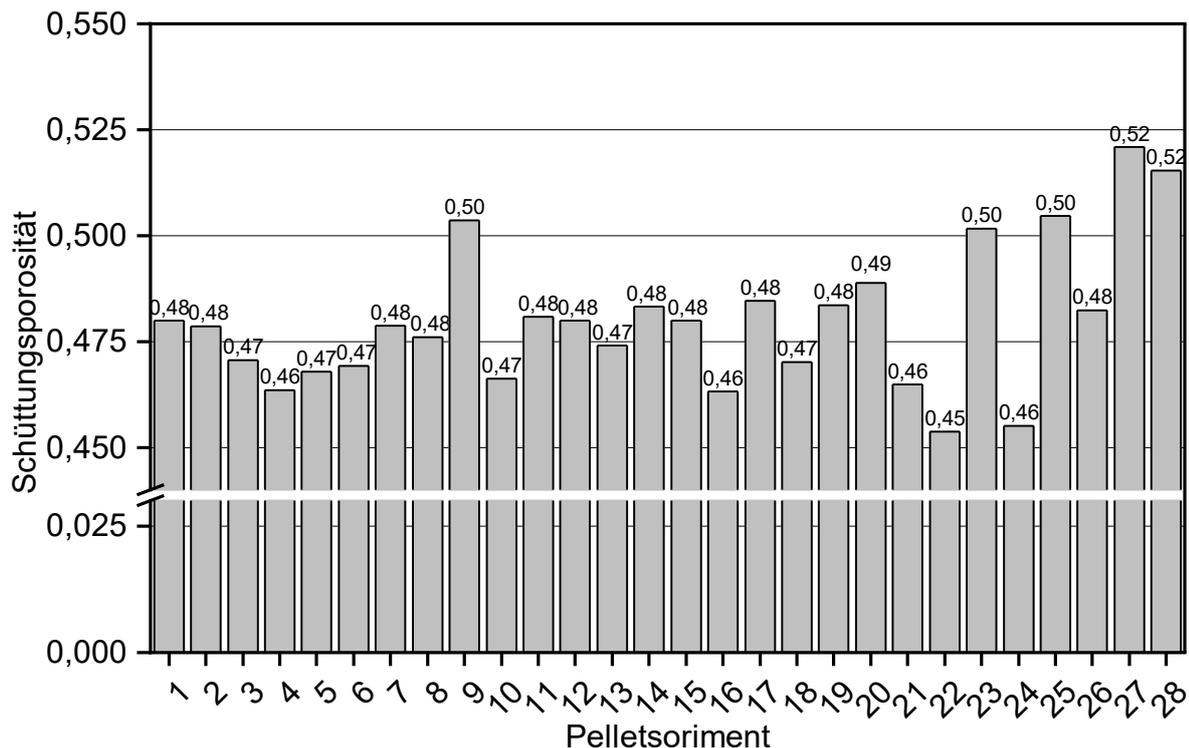


Abbildung 38: Berechnete Schüttungsporosität der Pelletsortimente im Pelletscreening

Ein weiterer aus der Schüttdichte und dem Heizwert berechneter Parameter ist die Energiedichte nach Formel (4.6). Sie liegt für die Sortimente der marktverfügbaren Holzpellets zwischen $10,8 \text{ GJ/m}^3$ (Sortiment 27) und $13,2 \text{ GJ/m}^3$ (Sortiment 10). Damit zeigt dieser Parameter im Hinblick auf den Energieeintrag bei Feuerungen ohne Leistungsregelungen teilweise größere Unterschiede zwischen den Sortimenten auf. Der Großteil der Sortimente befindet sich bei der Energiedichte im Bereich von $12 \pm 0,5 \text{ GJ/m}^3$.

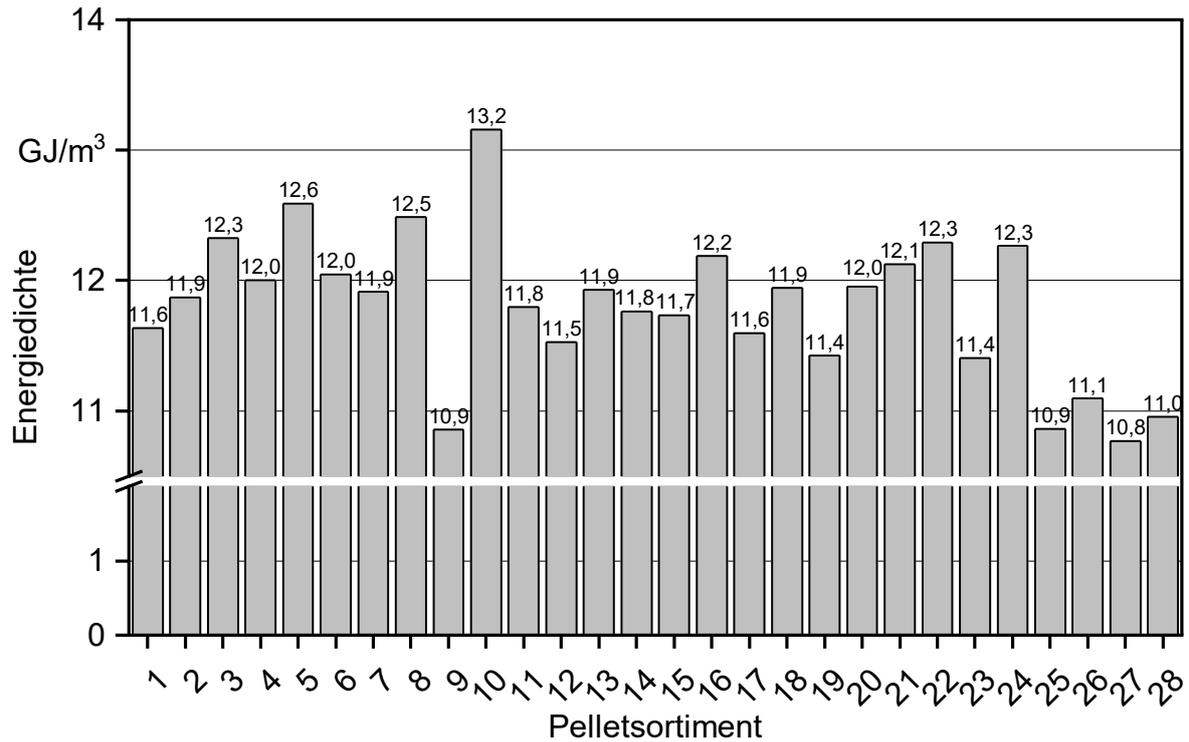


Abbildung 39: Energiedichte der Pelletsortimente im Pelletscreening, im Anlieferungszustand

Abbildung 40 zeigt die Pellethärte, die zwischen 23 kg (Sortiment 23) und 63 kg (Sortiment 2) liegt. Die Schwankungsbreite der Einzelbestimmungen ($n = 5$) liegt zwischen drei und 13 kg und ist bei hohen Pellethärten (um 50 kg) meist wesentlich größer. Die Pellethärte korreliert signifikant mit dem Feinanteil (Pearson's $R = -0,39$), der mechanischen Festigkeit (Pearson's $R = 0,46$) und der Pelletlänge (Pearson's $R = 0,45$). Diese Zusammenhänge waren zu erwarten.

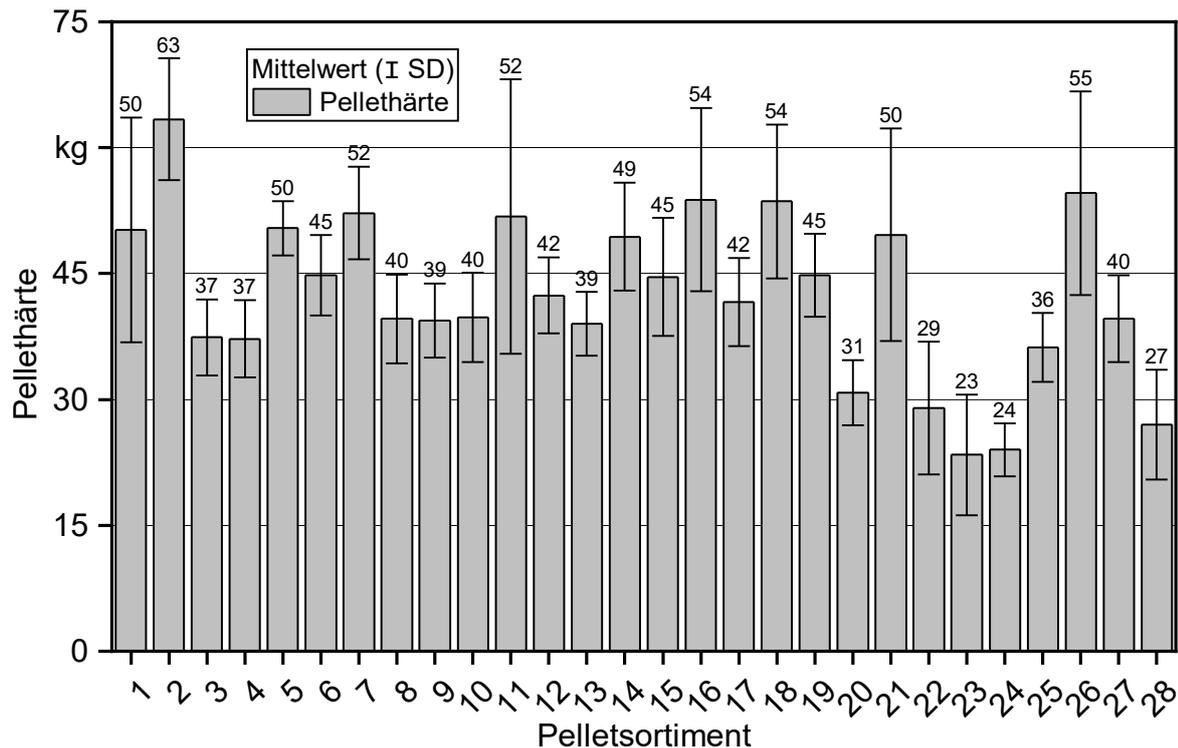


Abbildung 40: Pellethärte der Pelletsortimente im Pelletscreening

Abbildung 41 zeigt die Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials der untersuchten Sortimente. Auffällig sind die Sortimente 2, 5, 8, 13, 17, 18 und 28, die im Vergleich zu den restlichen Sortimenten höhere Anteile an den groben Fraktionen von $> 3,15$ mm bis einschließlich $1,0$ – $1,4$ mm aufweisen. Bildet man jeweils die Summe aller Korngrößen $< 3,15$ mm, $< 2,0$ mm und $< 1,0$ mm, so weisen diese Sortimente die niedrigsten Gehalte auf (Anhang, Tabelle 75). Nach DIN EN ISO 17225-2 werden Holzpellets für die industrielle Verwendung unter anderem nach der Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials den Klassen I1, I2 und I3 zugeordnet (Unterkapitel 4.3, Tabelle 11). Alle auffälligen Sortimente unterschreiten die Anforderung der Summe aller Partikel $< 3,15$ mm für I3 (≥ 97 m-%) und würden daher in keine der drei Klassen fallen. Bei der Summe aller Partikel < 2 mm sind alle Sortimente außer Nr. 28 innerhalb der Klasse I2 (≥ 90 m-%) und Sortiment 28 unter den Anforderungen für I3 (≥ 85 m-%). Bei der Summe aller Partikel < 1 mm sind alle Sortimente außer Nr. 28 innerhalb der Klasse I2 (≥ 50 m-%) und Sortiment 28 in I3 (≥ 40 m-%). Dieser Unterschied könnte auf die direkte Pelletierung trockener Hobel- und Sägespäne ohne weitere Zerkleinerung vor der Pelletpresse hindeuten (Abschnitt 5.2.1, Abbildung 65 und Abschnitt 5.2.2, Abbildung 77). Bei allen anderen Pelletsortimenten scheint eine Trockenhammermühle für die Zerkleinerung eingesetzt worden zu sein, sodass das Ausgangsmaterial feiner war.

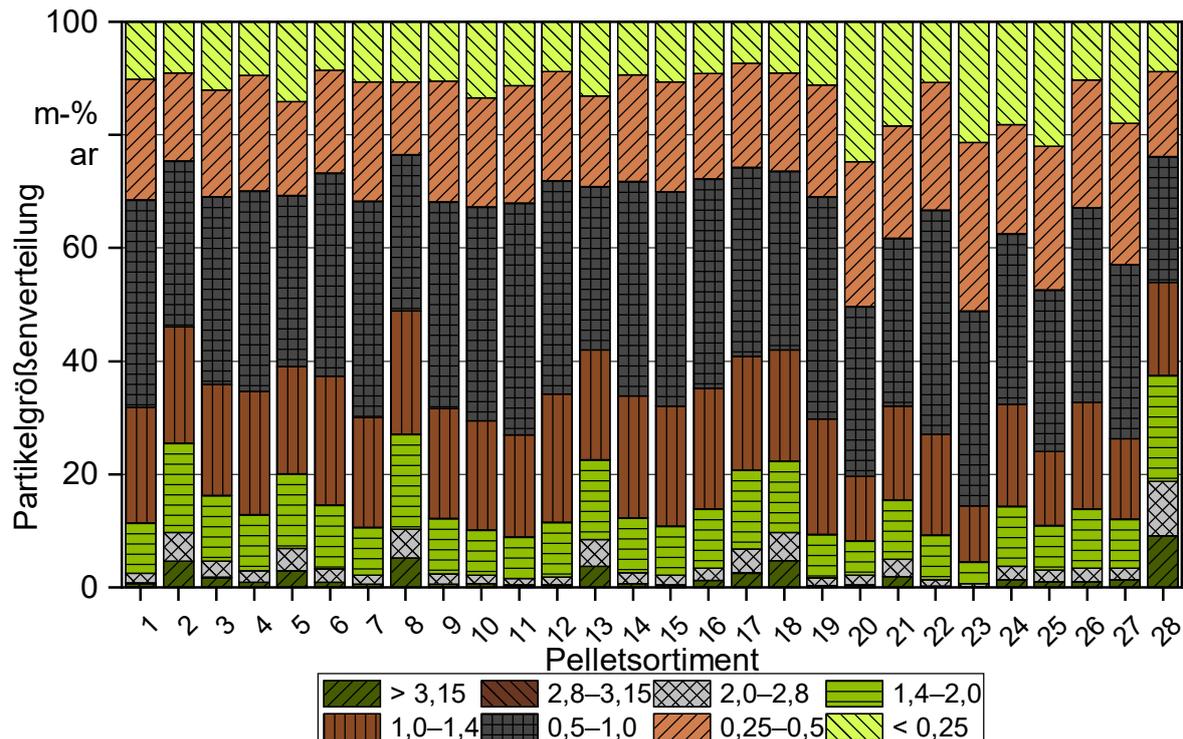


Abbildung 41: Partikelgrößenverteilung des Pelleta Ausgangsmaterials der Pelletsortimente im Pelletscreening

5.1.2 Inhaltstoffliche Brennstoffqualität

Stärkegehalt. Die Ergebnisse der enzymatisch-quantitativen Stärkebestimmung für die Pelletsortimente im Pelletscreening sind in Abbildung 42 dargestellt. Zusätzlich sind, sofern vorhanden, die Angaben der Hersteller zum eingesetzten Bindemittel eingetragen. Sortiment 3 kam erst nach Durchführung der Stärkeanalyse hinzu und wurde nicht mehr untersucht. Berücksichtigt man die Wiederfindungsrate der Stärkebestimmung von ca. 93 % sowie den Stärkegehalt der Bindemittel von typischerweise 85 bis 90 m-% (Angaben der Hersteller) und einen holzimmanenten Stärkegehalt von bis zu 0,3 m-%, muss davon ausgegangen werden, dass die Menge an zugegebenem Bindemittel um bis zu 22,7 % höher liegen kann als hier festgestellt. Abweichungen nach unten sind dahingegen nicht zu erwarten.

Auffällig sind die Sortimente 1 und 15 mit einem Stärkegehalt von 1,7 m-% bzw. 1,9 m-%. Diese partiell hohen Stärkegehalte könnten auf eine schlechte Homogenisierung des Rohmaterials mit der Stärke, auf eine Entmischung zwischen Dosierung und Presse oder eine fehlerhaft eingestellte Dosiereinheit zurückzuführen sein. Auch die Sortimente 20, 25 und 28 weisen Stärkegehalte $> 0,3$ m-% auf, obwohl diese laut Angaben auf der Verpackung ohne den Einsatz von Bindemitteln hergestellt worden sein sollen. Bei den Sortimenten 9, 23 und 27 kann aufgrund der Stärkegehalte unter 0,3 m-% davon ausgegangen werden, dass hier kein Bindemittel verwendet wurde. Die restlichen Sortimente liegen in praxisüblichen Bereichen und decken sich mit den Angaben der Hersteller.

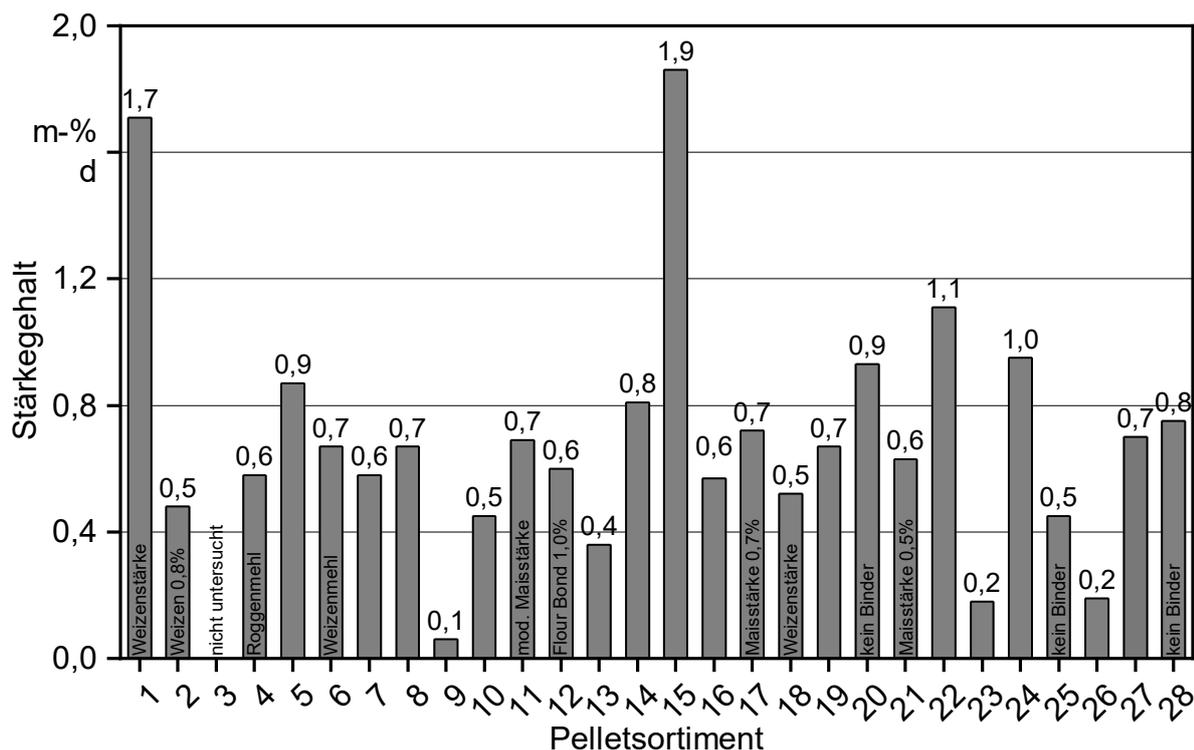


Abbildung 42: Stärkegehalt aus der enzymatisch-quantitativen Stärkebestimmung (Unterkapitel 4.3) und Angaben der Hersteller zum eingesetzten Bindemittel, falls vorhanden

Brennstoffindizes. Die in Unterkapitel 3.2 beschriebenen Brennstoffindizes, das K/Na-Verhältnis (Unterkapitel 3.3) und die berechnete Kaolinmenge (Unterkapitel 3.4) sowie der rechnerisch aus der Kaolinzugabe resultierende Aschegehalt sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Der Stickstoffgehalt der untersuchten Sortimente liegt zwischen $< 0,05$ m-% (Bestimmungsgrenze) und $0,21$ m-% bei Sortiment 20, das laut Beschriftung der Säcke aus einer Mischung aus Nadel- und Laubholz besteht.

Ein wichtiger Indikator zur Abschätzung der Gesamtstaubemissionen ist die Summe der aerosolbildenden Elemente Kalium (K), Natrium (Na), Blei (Pb) und Zink (Zn) (Unterkapitel 3.2). Die Summe der Aerosolbildner ist in Abbildung 43 kumulativ dargestellt und liegt zwischen 383 mg/kg (Sortiment 23) und 1.036 mg/kg (Sortiment 28). Diese Bandbreite deckt sich mit den Werten nach POLLEX ET AL. [76], wobei das Element Kalium dominiert, wie für holzige Biomasse üblich [52], gefolgt von Zink bzw. bei einigen Sortimenten auch Natrium. Holz ohne Rinde bzw. mit nur einem geringen Rindenanteil weist typischerweise Natriumgehalte von 10 bis 50 mg/kg für Nadelholz und von 10 bis 200 mg/kg für Laubholz auf [13]. Hohe Natriumgehalte können auf die Verwendung von Laubholz, ein natriumhaltiges Bindemittel und/oder Verunreinigungen (z. B. Spanplatten oder Streusalz) hinweisen. Der höchste Na-Gehalt wurde für Sortiment 26 bestimmt. Bei diesem Sortiment handelt es sich um Tropenholzpellets, wodurch sich der Natriumgehalt von ca. 93 mg/kg (Anhang Tabelle 77) erklären lässt. Die restlichen Natriumgehalte lagen unter 50 mg/kg und damit im für Nadelholz typischen Wertebereich. Blei lag bei allen untersuchten Sortimenten unterhalb der Bestimmungsgrenze von 2 mg/kg (Anhang, Tabelle 77). Da die Brenn-

stoffe nach dem Aschegehalt aufsteigend sortiert sind, wird sofort ersichtlich, dass die Aerosolbildner nicht mit dem Aschegehalt korrelieren. In Abbildung 43 wurde zudem ein Analysefehler von 15 % des Messwerts der jeweiligen Elementgehalte angenommen, was den in der Praxis üblichen Analyseabweichungen von 15 bis 20 % entspricht. Unter Berücksichtigung dieser Annahme weisen die meisten untersuchten Sortimente im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichbare Gehalte an Aerosolbildnern auf.

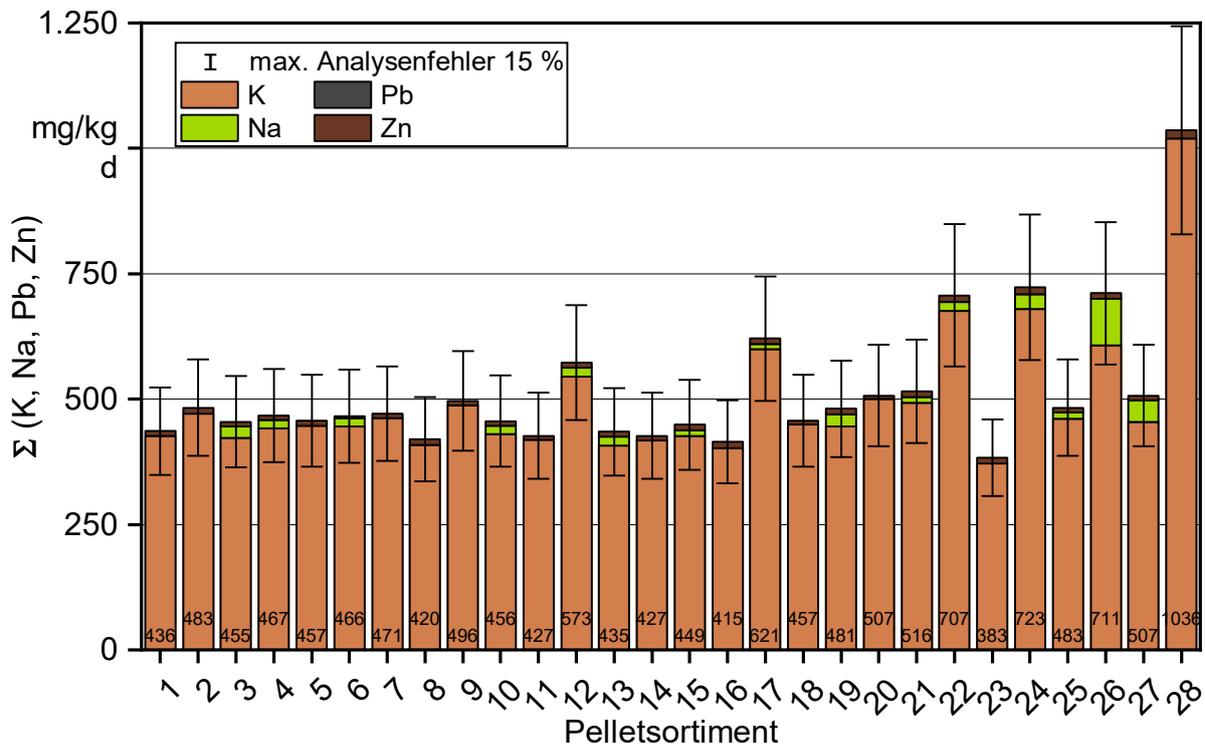


Abbildung 43: Aerosolbildende Elemente der Pelletsortimente im Pelletscreening

Das molare Si/K-Verhältnis beträgt zwischen 0,3 und 2,4 mol/mol und liegt somit für alle Sortimente unter dem Schwellenwert von 2,5 mol/mol, ab welchem Kalium auch vermehrt in die Asche eingebunden und nicht überwiegend in die Gasphase freigesetzt wird [84]. Lediglich Sortiment 27 kommt mit 2,4 mol/mol an den Schwellenwert heran. 24 Sortimente weisen ein Si/K-Verhältnis von unter 1 mol/mol auf. Bei diesen Werten ist auch das Cl/Si-Verhältnis am niedrigsten, die beiden Indizes decken sich vom Verlauf her für die meisten der untersuchten Sortimente.

Das molare (Si + P + K)/(Ca + Mg)-Verhältnis liegt bei allen untersuchten Sortimenten deutlich unter 2,5 mol/mol, daher ist mit Schlackebildung nicht zu rechnen. Die höchsten Werte wurden hier für Sortiment 27 mit 1,3 mol/mol sowie die Sortimente 10, 22 und 24 ermittelt.

Das von WARMING-JESPERSEN ET AL. [94] erwähnte K/Na-Verhältnis (siehe Unterkapitel 3.3) liegt zwischen 3,8 mol/mol (Sortiment 26) und 66,6 mol/mol (Sortiment 28) und korreliert weder mit dem Aschegehalt noch mit dem Gehalt aerosolbildender Elemente.

Tabelle 17: Brennstoffindizes und berechnete Größen nach Unterkapitel 3.2, 3.3 und 3.4 (wasserfreie Bezugsbasis)

Nr.	N	Σ (K, Na, Pb, Zn)	Si/K ¹	Cl/Si ¹	(Si + P + K)/ (Ca + Mg) ¹	K/Na ¹	Kaolinzu- gabe berechnet ¹	Aschege- halt additiviert ¹
	m-%	mg/kg	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol	m-%	m-%
1	0,06	436	0,3	0,40	0,6	27,9	0,13	0,40
2	0,13	483	0,3	0,40	0,7	30,8	0,15	0,44
3	0,11	455	0,3	0,40	0,6	11,3	0,15	0,44
4	< 0,05	467	0,3	0,40	0,7	16,2	0,15	0,45
5	0,08	457	0,3	0,40	0,6	29,2	0,14	0,45
6	0,09	466	0,5	0,27	0,8	26,3	0,15	0,51
7	0,11	471	0,3	0,35	0,6	30,2	0,15	0,45
8	0,13	420	0,3	0,40	0,6	26,7	0,13	0,45
9	0,07	496	0,3	0,40	0,7	31,9	0,15	0,47
10	0,10	456	1,3	0,10	1,0	14,9	0,14	0,46
11	< 0,05	427	0,3	0,40	0,6	27,4	0,13	0,46
12	0,10	573	0,3	0,31	0,8	18,9	0,18	0,51
13	0,08	435	0,5	0,36	0,6	13,3	0,14	0,47
14	0,10	427	0,3	0,40	0,6	27,3	0,13	0,48
15	< 0,05	449	0,3	0,40	0,6	20,9	0,14	0,50
16	0,07	415	0,8	0,16	0,9	15,4	0,13	0,43
17	0,11	621	0,2	0,40	0,7	32,0	0,19	0,55
18	0,12	457	0,4	0,41	0,6	29,3	0,14	0,51
19	< 0,05	481	0,3	0,40	0,6	10,9	0,15	0,54
20	0,21	507	0,4	0,30	0,7	32,7	0,16	0,56
21	< 0,05	516	0,7	0,15	0,8	26,4	0,16	0,60
22	0,20	707	0,7	0,14	1,0	22,1	0,22	0,69
23	0,09	383	1,6	0,09	0,8	24,3	0,12	0,61
24	0,12	723	0,7	0,11	1,0	13,8	0,23	0,77
25	0,12	483	1,5	0,08	0,9	22,6	0,15	0,76
26	0,17	711	0,9	0,16	0,6	3,8	0,24	0,91

Nr.	N	Σ (K, Na, Pb, Zn)	Si/K ¹	Cl/Si ¹	(Si + P + K)/ (Ca + Mg) ¹	K/Na ¹	Kaolinzu- gabe berechnet ¹	Aschege- halt additiviert ¹
	m-%	mg/kg	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol	m-%	m-%
27	0,08	507	2,4	0,05	1,3	6,2	0,17	0,85
28	0,13	1.036	0,2	0,25	0,6	66,6	0,32	1,10

¹ Bei der Berechnung der Brennstoffindizes und der Kaolinmenge wurde bei Sortimenten mit Elementgehalten unterhalb der Bestimmungsgrenze (siehe Abschnitt 4.3.1, Tabelle 13) der Wert der Bestimmungsgrenze entsprechend gesetzt. Die zur Berechnung der Indizes verwendeten Elementgehalte finden sich im Anhang 1 in Tabelle 76 und Tabelle 77.

Für alle untersuchten Sortimente wurde, wie in Unterkapitel 3.4 beschrieben, die nötige Kaolinzugabe berechnet (siehe Tabelle 17). Aus der berechneten Kaolinzugabe und dem Aschegehalt des Kaolins sowie der jeweiligen Pelletprobe wurde der theoretische Aschegehalt der additivierten Probe berechnet. Von den 28 untersuchten Sortimenten im Pelletscreening hätte man demnach 23 Sortimente mit der berechneten notwendigen Kaolinmenge additivieren können, ohne den Aschegrenzwert von 0,7 m-% zu überschreiten.

Laubholz-/Nadelholzanteil. Abbildung 44 zeigt die aus der NIR-Analyse ermittelten Hart- und Nadelholzanteile der untersuchten Sortimente im Pelletscreening. Die meisten Sortimente scheinen nach dieser Analyse einen Nadelholzanteil von 100 m-% aufzuweisen. Die Sortimente 22 und 24 enthalten demnach ca. 5 m-% Laubholz. Für Sortiment 20 wurde ein Laubholzanteil von 20 m-% gemessen, dieses Sortiment besteht auch laut Verpackung aus einer Mischung aus 30 m-% Laubholz und 70 m-% Nadelholz. Bei Sortiment 26 handelt es sich, wie bereits erwähnt, um Tropenholzpellets und es sollte eigentlich zu 100 m-% aus Laubholz bestehen. Hier ergibt die NIR-Analyse allerdings einen Laubholzanteil von lediglich 25 m-%. Dies liegt vermutlich daran, dass für die Entwicklung des mathematischen Modells zur Auswertung der NIR-Spektren nur die Holzarten Buche, Tanne, Kiefer und Traubeneiche verwendet wurden [41] [64]. Um den Laubholzanteil auch bei exotischeren Holzarten hinreichend genau bestimmen zu können, müsste das Modell mit weiteren Holzarten validiert und weiterentwickelt werden. Sortiment 28 sollte laut Verpackung aus 100 m-% Fichtenholz ohne Rinde bestehen, hat aber nach NIR-Analyse einen Laubholzanteil von ca. 45 m-%. Bei reinem Nadelholz ohne Rinde sollte der Kaliumgehalt im Brennstoff typischerweise 200–500 mg/kg betragen, bei Laubholz ohne Rinde 500–1.500 mg/kg [13]. Der Kaliumgehalt von Sortiment 28 (siehe Abbildung 43 und Anhang, Tabelle 77) liegt bei 1.020 mg/kg und bestätigt damit das Ergebnis der NIR-Analyse.

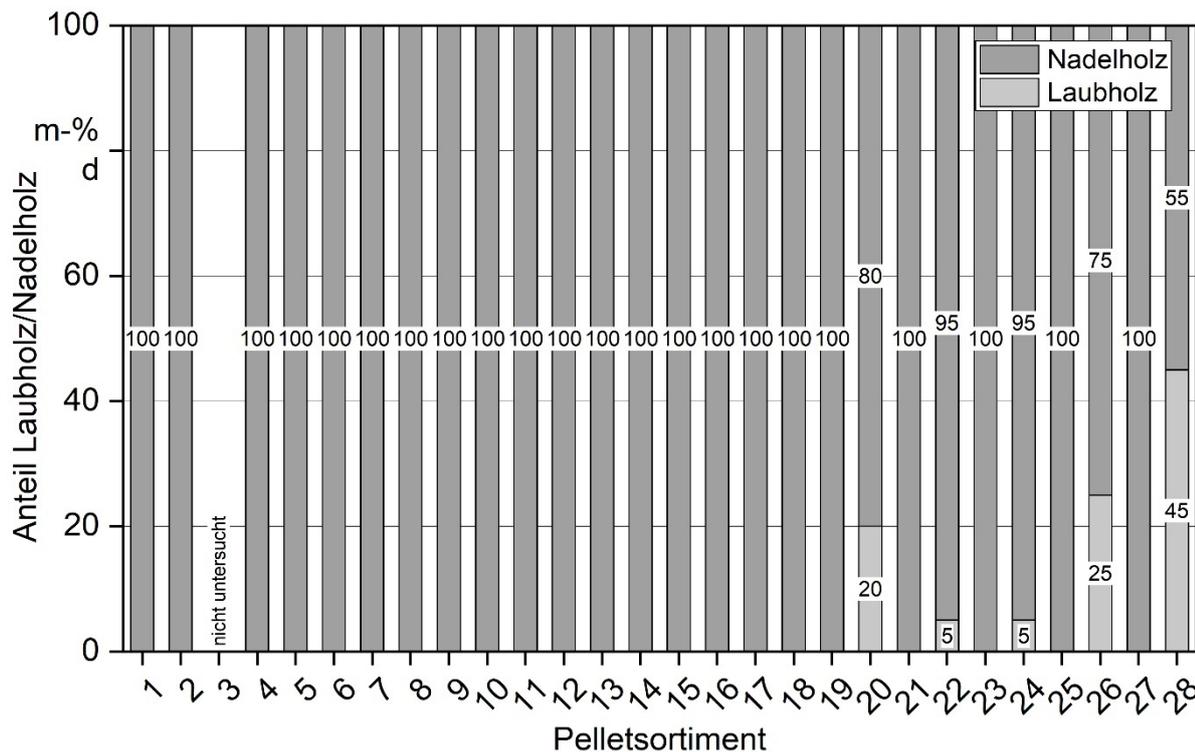


Abbildung 44: Laub- und Nadelholzanteil der Pelletsortimente im Pelletscreening nach NIR-Analyse

Den Karbonatanteil der Brennstoffaschen (Abbildung 45) wurde im Anschluss an die Aschegehaltsbestimmung an den bei 550 °C erzeugten Aschen mit dem LECO-RC-612-Kohlenstoffanalysator bestimmt. Für den Großteil der untersuchten marktverfügbaren Holzpellets liegt der Karbonatanteil zwischen 0,06 m-% und 0,11 m-%. Die Sortimente 26 (0,18 m-%) und 28 (0,22 m-%) weisen im Vergleich zu den restlichen Pellets einen etwa doppelt so hohen Karbonatanteil in der Brennstoffasche auf. Die Regressionsanalyse in Abbildung 46 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Karbonatanteil in der Brennstoffasche und dem Calciumgehalt im Brennstoff; der Calciumgehalt hat einen signifikanten Einfluss auf die Karbonatbildung während des Veraschens bei 550 °C ($R^2 = 0,92$).

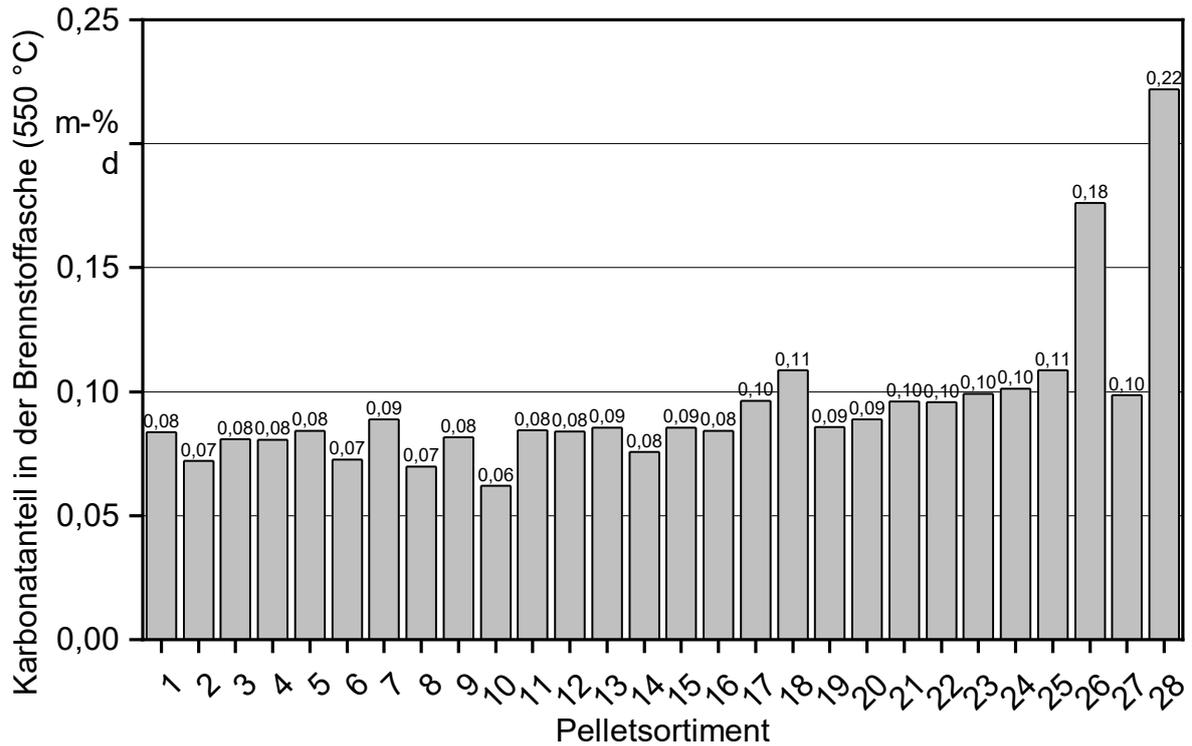


Abbildung 45: Karbonatanteil in der Brennstoffasche (bei 550 °C), bezogen auf trockenen Brennstoff

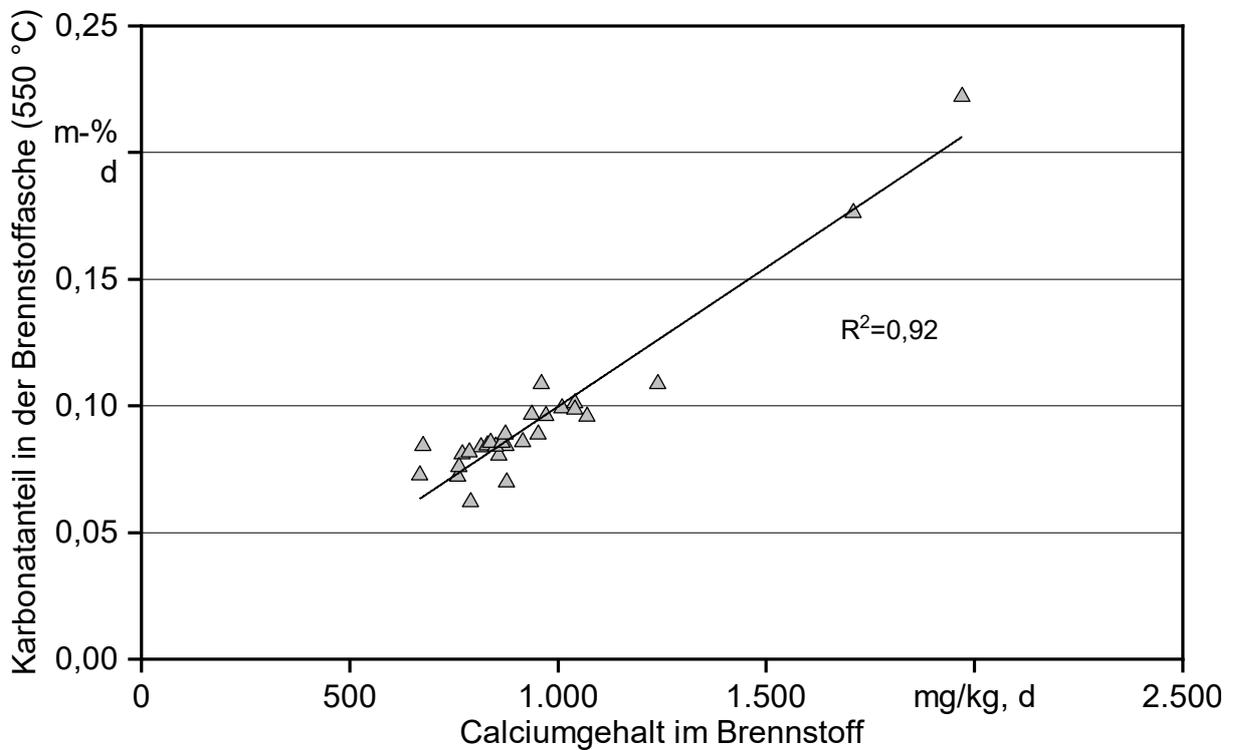


Abbildung 46: Lineare Regressionsanalyse zum Karbonatanteil in der Brennstoffasche in Abhängigkeit vom Calciumgehalt des Brennstoffs

5.1.3 Bewertung der untersuchten Schnellbestimmungsmethoden

Die Bewertung der Schnellbestimmungsmethoden erfolgte an den Pellets aus dem Pelletscreening. Auf eine Überprüfung mit den selbst hergestellten Pelletsortimenten wurde verzichtet.

Pelletlänge. Bei dem getesteten System pelletVISION zur Schnellbestimmung der Pelletlänge wurden nicht alle Pellets gemessen. Während der Messungen kam es häufiger zu dem Problem nicht messbarer Pellets. Dieses Problem trat vor allem bei Pellets mit einer tatsächlichen Länge unter 4 mm oder bei Pellets in den Randbereichen der Pelletschublade auf. Bei Wiederholung von Fehlmessungen konnte festgestellt werden, dass bei erneuter Längenbestimmung derselben Pellets teilweise abweichende Messergebnisse ausgegeben wurden. Zudem konnte eine Veränderung der Messwerte beobachtet werden, wenn es zu einer Rotation der Pellets um die Zylinderachse kam. Dies ist durch die Orientierung der ungleichmäßigen Bruchkanten der Pellets zu erklären. Deren Ausrichtung zur Kamera beeinflusst das Messergebnis (Abbildung 47). Bei Ausrichtung der Bruchflächen parallel zur Kameraebene würde die Länge des Bereichs wahrscheinlich zur Erfassung der mittleren Pelletlänge beitragen, obwohl es sich dabei tatsächlich um die maximale Länge handelt. Um einen exakten Wert der mittleren Pelletlänge zu erhalten, müssten somit alle Pellets in der Schublade mit der Bruchfläche um 90° versetzt zur Kameraebene angeordnet werden (Abbildung 47, oberste Position und dritte Position von oben).

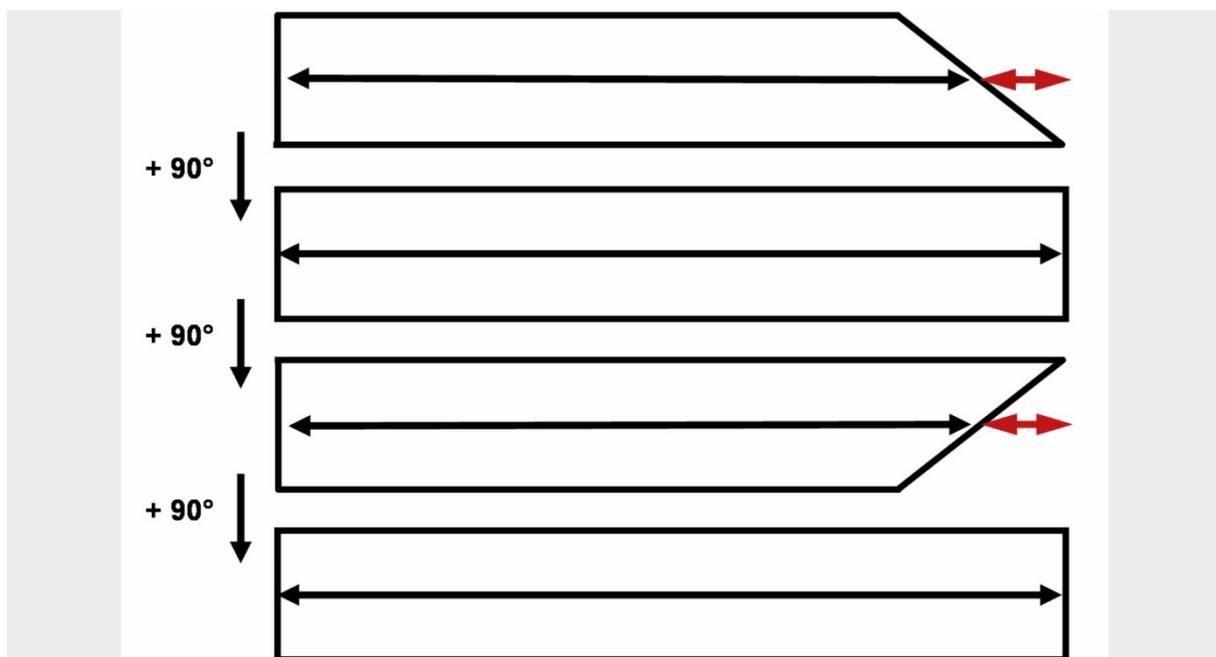


Abbildung 47: Einfluss der Rotation von Pellets um die Zylinderachse auf das System pelletVISION, Draufsicht aus der Perspektive der Kamera. Gemessene Länge (schwarze Pfeile), Überschätzung der mittleren Länge (rote Pfeile). Das Pellet wurde jeweils um 90° „gedreht“ entlang der Längsachse.

Abbildung 47 zeigt die mögliche Ursache für die Überschätzung der Pellets aus der Perspektive der Kamera beziehungsweise des Messbilds. Die zweite Position von oben sowie die unterste Position zeigen die Orientierung, die vermutlich zu der Überschätzung der mittleren Pelletlänge führt. Die Positionen ganz oben sowie die dritte Position von oben zeigen hingegen die Orientierung, bei der die tatsächliche mittlere Pelletlänge gemessen werden kann. Die roten Pfeile geben dabei den Bereich der Überschätzung der Länge bei ungünstiger Pelletausrichtung an.

Die von pelletVISION ausgegebenen mittleren Pelletlängen sind immer signifikant größer als die des Messschiebers. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung um 0,36 mm beziehungsweise 2,80 % (Abbildung 48). Auswertungen der einzelnen Pelletlängen zeigen, dass die Abweichung des pelletVISION bei sehr kurzen Pellets zunimmt. Bei Messungen mit Normprüfkörpern mit gerader Schnittkante zeigte das pelletVISION dagegen im Vergleich zum Messschieber eine leichte Unterschätzung von durchschnittlich -0,9 mm. Dies verdeutlicht nochmals den starken Einfluss der Bewertung der Bruchkanten.

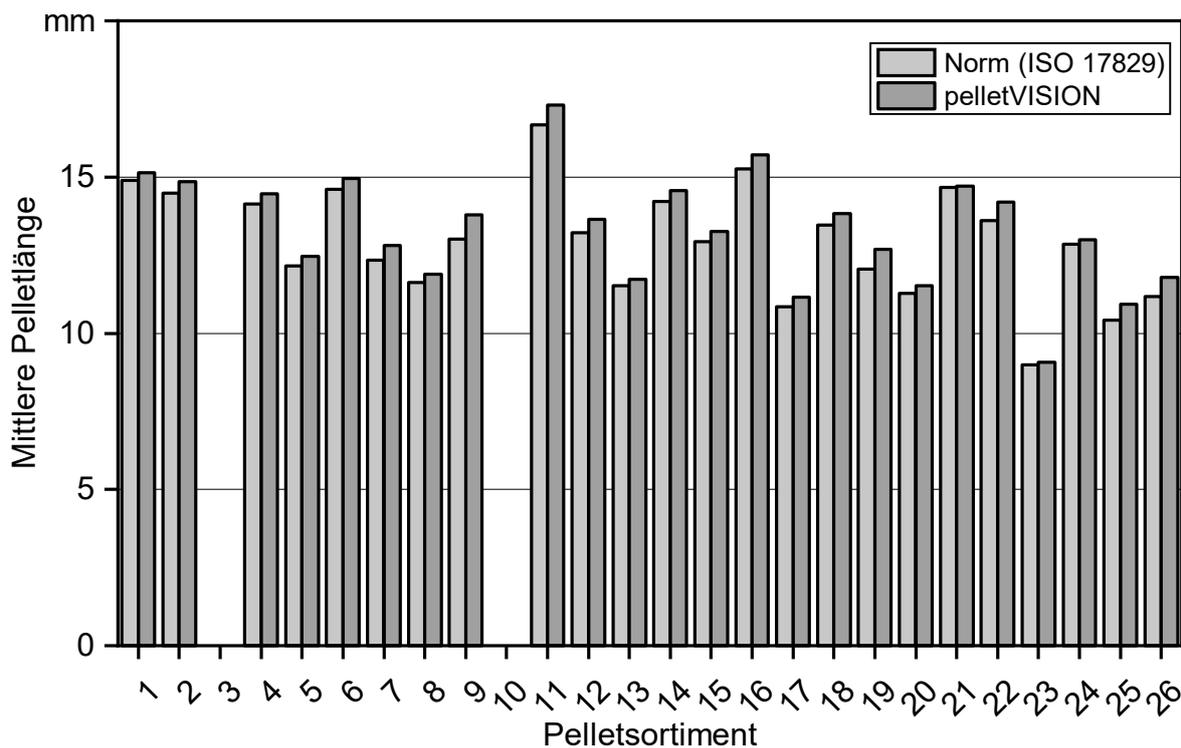


Abbildung 48: Mittleren Pelletlänge gemessen mit pelletVISION im Vergleich zur mittleren Pelletlänge nach Norm

Auch die Messung nach Norm kann durch nicht einheitliches Anlegen des Messschiebers an die Bruchkante (Einfluss des Messenden) zu gewissen Abweichungen führen. Im Zuge der Untersuchung wurde außerdem festgestellt, dass die Norm selbst unzulänglich ist, da sich die textliche Messbeschreibung und die bildliche Darstellung des Messvorgangs durch einen uneinheitlichen Messschieber-Ansatzpunkt widersprechen und eine Definition

der Pelletlänge in der Norm gänzlich fehlt. Daher wurden von den Projektteilnehmern eine Überarbeitung und eine klare Längendefinition beim Normungsgremium angeregt. Als Definition der Pelletlänge wurde Folgendes vorgeschlagen: „Distance from midpoint to midpoint along the pellet axis“. Missverständnisse, dass es sich auch um die maximal mögliche Pellet-Ausdehnung handeln kann, würden dadurch ausgeräumt.

Mit Blick auf die aktuell noch bestehenden Unschärfen bei dem Referenzprüfverfahren sind die hier ermittelten Abweichungen als relativ gering einzustufen. Das pelletVISION-Verfahren kann somit als Schnellbestimmungsmethode zur Bestimmung der Pelletlänge nach vorliegender Datenlage empfohlen werden.

Die Ergebnisse mit der in Abschnitt 4.3.3 von BIOS entwickelten, jedoch nicht kommerziell verfügbaren und nur für Forschungszwecke eingesetzten fotometrischen Methode zeigten im Vergleich mit der manuellen Vermessung mittels Schieblehre eine gute Übereinstimmung. So lagen die mittleren Längen eines vermessenen Kollektivs mit der von BIOS entwickelten Methode bei 21,4 mm (Standardabweichung; 4,9 mm), mit der Schieblehre bei 21,5 mm (Standardabweichung: 4,9 mm) und mit pelletVision bei 20,2 mm (Standardabweichung: 4,8 mm).

Mechanische Festigkeit (Durability DU). Bei dem Vergleich zwischen der standardisierten Methode und dem Ligno-Tester zeigte sich, dass der sogenannte Ligno-Wert im Vergleich zur mechanischen Festigkeit immer höhere Werte lieferte (Abbildung 49). Allgemein ist zu erkennen, dass bei Proben mit geringer mechanischer Festigkeit die Abweichungen zwischen den Resultaten der verschiedenen Methoden größer werden (Abbildung 49). Die unterschiedlich starke Beanspruchung durch die Methoden zeigt sich dabei deutlicher als bei Proben mit hoher mechanischer Festigkeit. Im Mittel zeigt der Ligno-Wert eine Abweichung von den Norm-Werten um +0,7 m-% ($\pm 0,4$ m-%). Vergleichsmessungen nach der Umrüstung des Siebeinsatzes mit dem Upgrade Kit der Firma TEKPRO auf eine Lochweite von 3,15 mm brachten hier keine wesentliche Verbesserung (Abschnitt 4.3.3). Da hier aber offenbar eine systematische Messabweichung eintritt, könnte die Anwendung eines pauschalen Korrekturfaktors (z. B. DU minus 0,7) in der Praxis die Möglichkeit eröffnen, das Ligno-Tester-Verfahren für die rasche Vor-Ort-Überprüfung einer Produktcharge einzusetzen, da die Zeitersparnis erheblich ist. Gegebenenfalls ließe sich der Korrekturfaktor verbessern, indem die aufgezeigte Abhängigkeit vom absoluten Niveau des Referenzwerts rechnerisch in die Korrekturformel einbezogen wird.

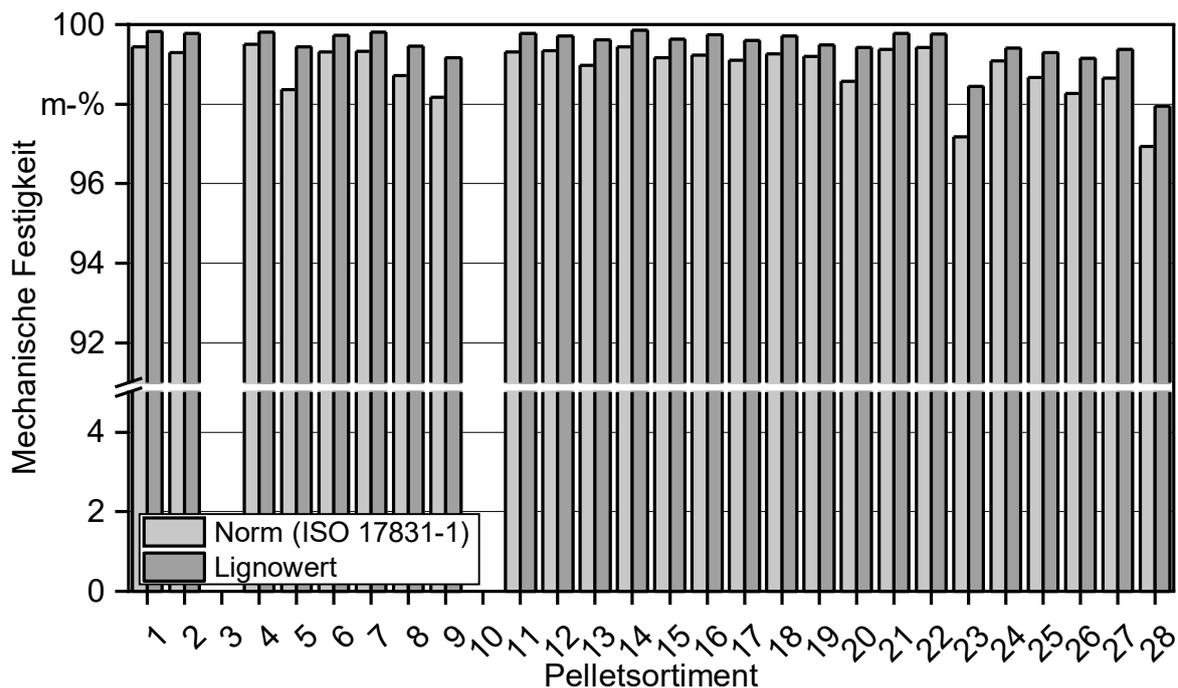


Abbildung 49: Vergleich der mechanischen Festigkeit, gemessen nach Norm und mit dem Ligno-Abriebtester

Partikeldichte. Für 26 untersuchte Sortimente (außer Sortiment 3 und 10) ergibt die berechnete Partikeldichte die geringsten Werte im Vergleich zur Partikeldichte nach Norm (Abbildung 50). Auch mit dem Messzylinder bestimmte Partikeldichten ergeben durchgehend geringere Messwerte als die Norm-Methode. Für die stereometrisch bestimmte Partikeldichte ergibt sich im Durchschnitt eine Abweichung um $-9,6\%$ zu den Norm-Werten ($\pm 2,8\%$). Dies ist wahrscheinlich auf eine deutliche Überschätzung des Pelletvolumens zurückzuführen. Diese fehlerhafte Einschätzung entsteht möglicherweise durch die Verwendung der mittleren Pelletlänge und die Annahme der Form als idealer Zylinder bei der Berechnung des Volumens. Die Ergebnisse der Partikeldichtebestimmung mit dem Messzylinder weichen im Mittel über alle Proben um $-2,6\%$ von den Norm-Werten ab.

Die geringeren Werte mit dem Messzylinder (Flüssigkeitsverdrängung) sind im Vergleich zur Norm-Methode eventuell dadurch bedingt, dass die große Menge an Pellets die Aufnahme der Flüssigkeit verlangsamt. Durch die hohe Anzahl an Holzpellets auf geringer Fläche werden diese übereinandergeschichtet und bieten verglichen mit der Norm-Methode weniger Oberfläche für die Absorption der Flüssigkeit. Dadurch wird auch mit dieser Methode das Volumen überschätzt, da nach einer Dauer von drei Sekunden weniger Flüssigkeit absorbiert wurde.

Um dies zu überprüfen, wurden an sieben weiteren Proben Versuche zum Einfluss des Ablesezeitpunkts auf das Messergebnis der Norm-Methode (siehe Abbildung 51) und der Bestimmung mit Messzylinder (siehe Abbildung 52) untersucht. Dabei wurde zudem ein Messzylinder mit einer genaueren Volumenskala verwendet. Die Untersuchungen zeigen, dass es sowohl bei der Bestimmung der Partikeldichte nach Norm als auch mit dem Mess-

zylinder einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss des Ablesezeitpunkts der Pellets in der Tauchlösung auf das Messergebnis gibt. Bei der Methode nach Norm führt eine Verlängerung der Verweildauer von drei auf fünf Sekunden zu einer Zunahme der Pelletdichte zwischen 0,1 und 0,5 % und von drei auf acht Sekunden um 0,5 bis 1,6 %. Bei der Bestimmung mit dem Messzylinder nimmt die Partikeldichte nur bei einer Erhöhung der Verweildauer von drei auf fünf Sekunden um 3,1 bis 3,3 % zu. Eine weitere Verlängerung der Verweildauer der Pellets in der Tauchlösung führt aber nicht zu einer weiteren Erhöhung des Messwerts. Bei einer Verweilzeit von fünf Sekunden beträgt die Abweichung zwischen Partikeldichte nach Norm und im Messzylinder maximal 0,5 % und bei einer Verweildauer von acht Sekunden maximal 1,6 %. Die Ergebnisse zeigen eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Methoden, wenn ein ausreichend genauer Messzylinder (Teilung von 10 ml) verwendet wird. Außerdem scheint die Methode mit Messzylinder bei ausreichender Verweildauer weniger fehleranfällig zu sein, da ab fünf Sekunden keine Änderung des Messwerts mehr stattfindet.

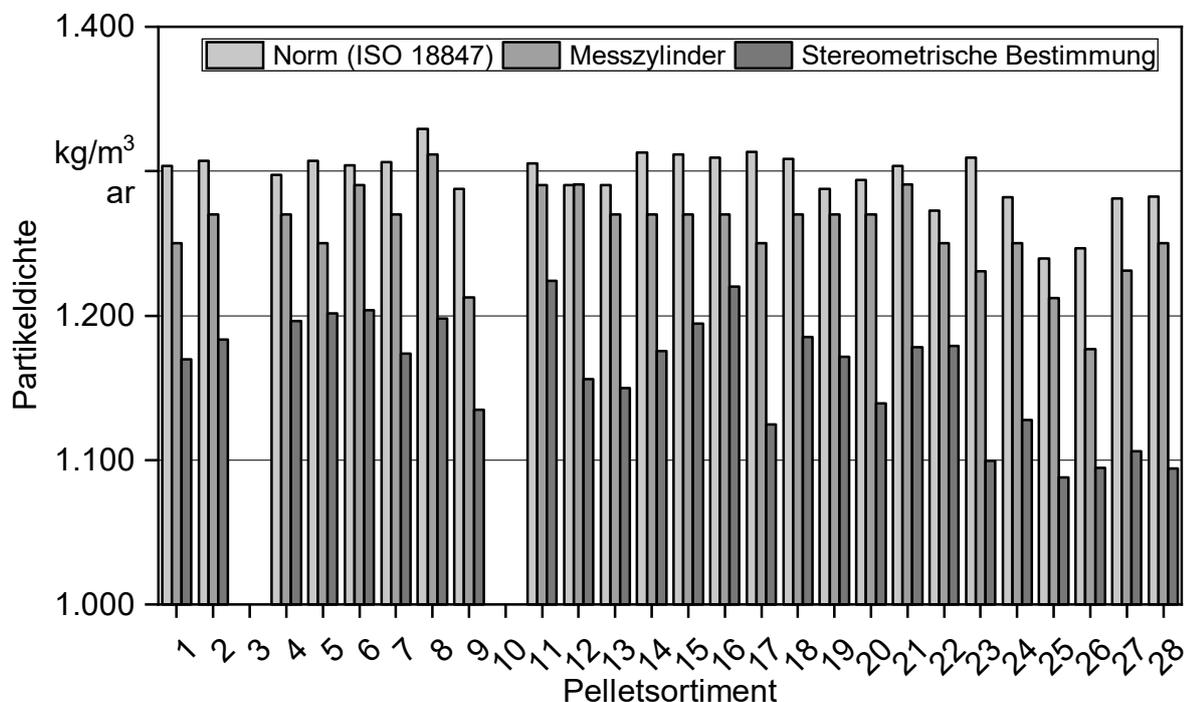


Abbildung 50: Vergleich der Partikeldichten nach Norm, im Messzylinder und nach der stereometrischen Methode

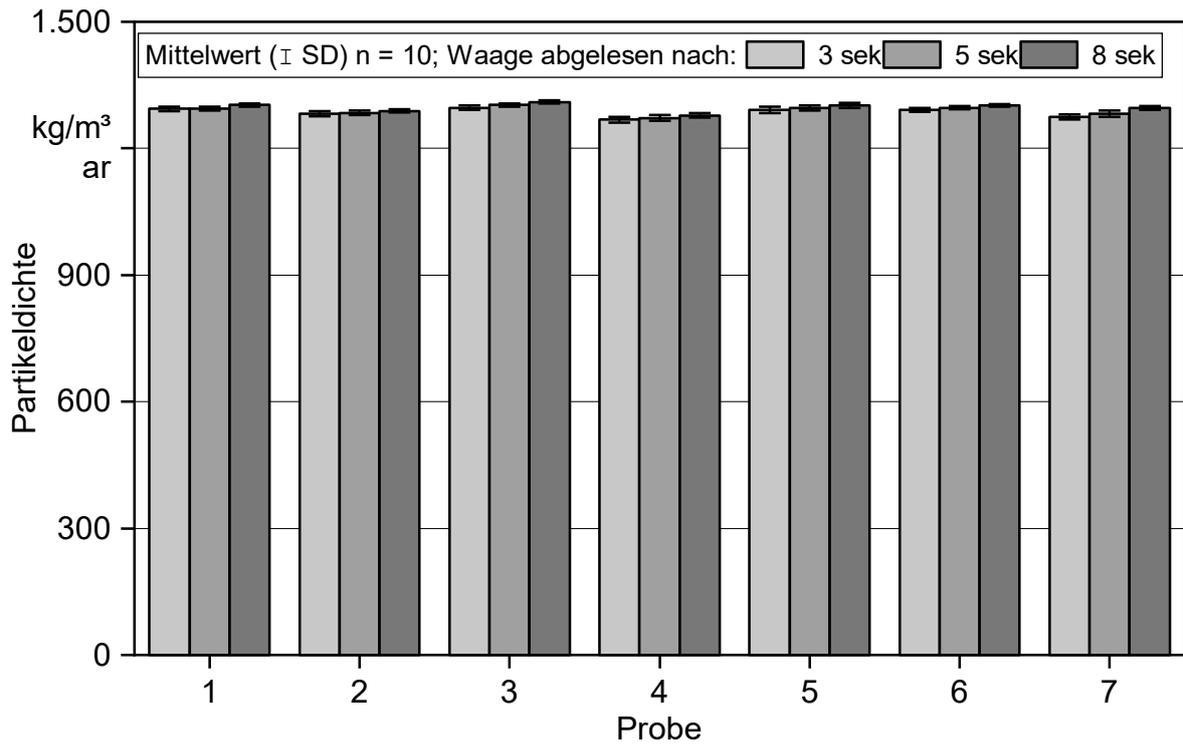


Abbildung 51: Abhängigkeit der Partikeldichte ausgewählter Proben nach Norm in Abhängigkeit von der Verweildauer der Pellets in der Tauchlösung

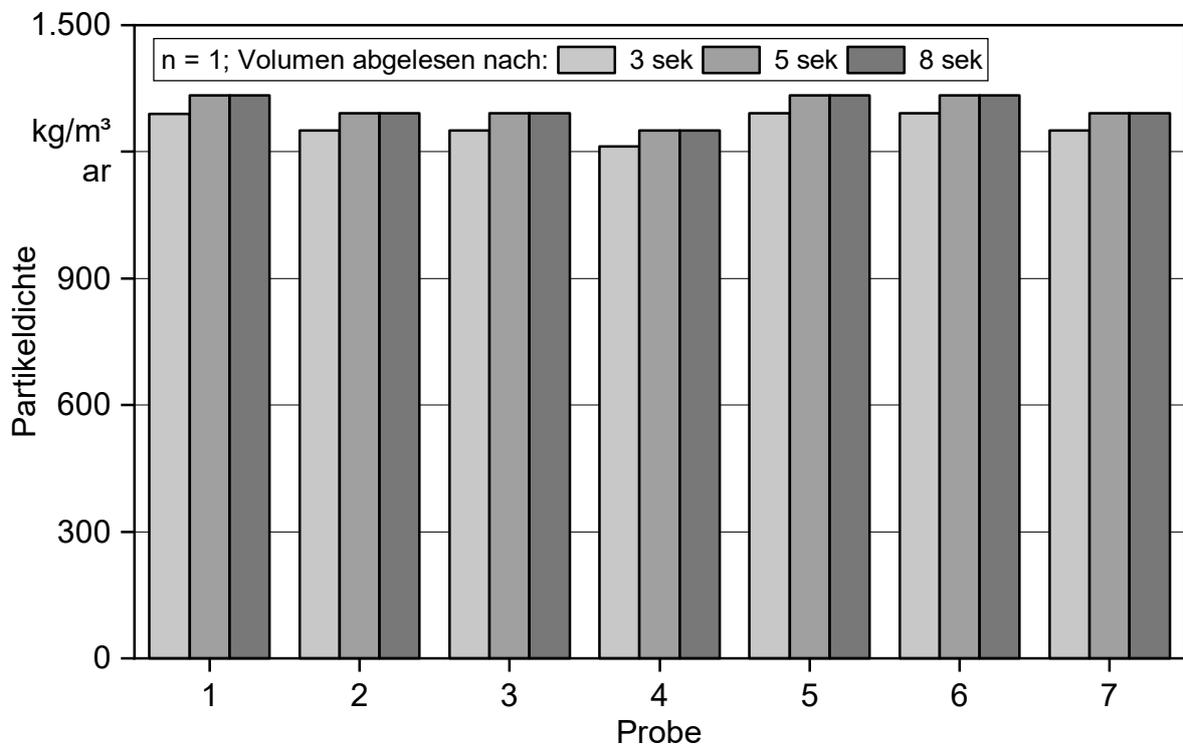


Abbildung 52: Abhängigkeit der Partikeldichte ausgewählter Proben bei Bestimmung mit dem Messzylinder in Abhängigkeit von der Verweildauer der Pellets in der Tauchlösung

5.2 Versuchspellets mit definierten Eigenschaften und Ausgangsmaterialien

Im folgenden Unterkapitel werden die Analyseergebnisse der 31 untersuchten Pelletsortimente dargestellt (siehe Abschnitt 4.2.3). Die Ergebnisse werden dabei in Brennstoffvariationen mit Fichte (Abschnitt 5.2.1) und Variation der Holzart (Abschnitt 5.2.2) gegliedert. Die Sortimente 2–5 (siehe Abschnitt 4.2.3, Tabelle 9), bei denen z. B. nur gezielt der Wassergehalt oder der Feinanteil manipuliert wurde, werden hier nicht gesondert behandelt, da die Eigenschaften im Wesentlichen dem ersten Fichtensortiment entsprechen. Die kompletten Analyseergebnisse der Versuchspellets finden sich im Anhang 2 (Tabelle 78 bis Tabelle 87).

5.2.1 Brennstoffvariationen mit Fichte

Unter den Brennstoffvariationen mit Fichtenholz werden hier alle Pelletsortimente aufgeführt, die aus den vom DEPI zur Verfügung gestellten Ausgangsmaterialien (Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermühle und TMP-Hackgut („Thermo-Mechanical-Pulping“ für Papierindustrie) die aus reiner Fichte ohne Rinde aus einer Charge bestanden, hergestellt wurden (siehe Abschnitt 4.2.1).

5.2.1.1 Physikalische Brennstoffqualität

Pelletlänge. Bei der Betrachtung der Längenverteilung der untersuchten Fichtenvariationen in Abbildung 53 fällt auf, dass sich die mittleren Längen der vom Projektpartner bereitgestellten Längenabstufungen der Längenverteilung lang (17,0 mm), normal (15,3 mm) und mittel (15,5 mm) nur geringfügig unterscheiden (Anhang 2, Tabelle 81). Bei der Pelletlänge „mittel“ wurden Anteile kurzer Pellets über eine Siebung nach der Pelletierung entfernt, sodass das Längenband schmaler ist. Die kurzen Pellets liegen dagegen bei einer mittleren Länge von nur 10,3 mm. Im Pelletscreening lagen die längsten Pellets im Vergleich dazu bei einer mittleren Länge von 18,1 mm (siehe Abbildung 27) und die kürzesten bei einer mittleren Länge von 8,7 mm und decken sich damit näherungsweise gut mit den langen und kurzen Pellets, die für die Untersuchungen hergestellt wurden. Bildet man den Median über alle mittleren Pelletlängen aus dem Pelletscreening läge dieser bei 12,9 mm. Damit wäre das untersuchte mittlere Sortiment etwas zu lang im Vergleich zur Praxis. Die Spreizung zwischen minimaler und maximaler Länge nimmt von den langen über die normalen zu den mittleren Pellets ab, wobei bei „normal“ und „mittel“ der Maximalwert fast vergleichbar ist. Bei den kurzen Pellets liegt die minimale Länge vergleichbar mit den langen Pellets, aber die maximale Länge deutlich unter derjenigen der mittleren Pellets. Die meisten der am TFZ mit der Flachmatrizenpresse produzierten Pellets aus Fichte liegen mit mittleren Längen zwischen 17 mm und 23 mm, verglichen mit dem Pelletscreening, im höheren Bereich. Abweichend von diesem Trend zeigen sich nur die Pellets, bei denen versucht wurde, eine niedrige Partikeldichte zu erzeugen (Fichte < PD), und die aus mit der Kollermühle zerkleinerten Fichtenhackschnitzel produzierten Pellets. Beim Einsatz von Bindemitteln kam es sowohl zu einer Erhöhung (Weizenstärke und Kartoffelstärke abfallender Qualität) als auch zu einer Senkung der mittleren Länge (Kartoffelstärke nativ), allerdings wurden hier teilweise die Matrize und damit der Pressweg ver-

ändert (Abschnitt 4.2.3). Alle Fichtenvariationen lagen hinsichtlich der Längenverteilung innerhalb der A1-Spezifikationen nach DIN EN ISO 17225, ENplus und DINplus.

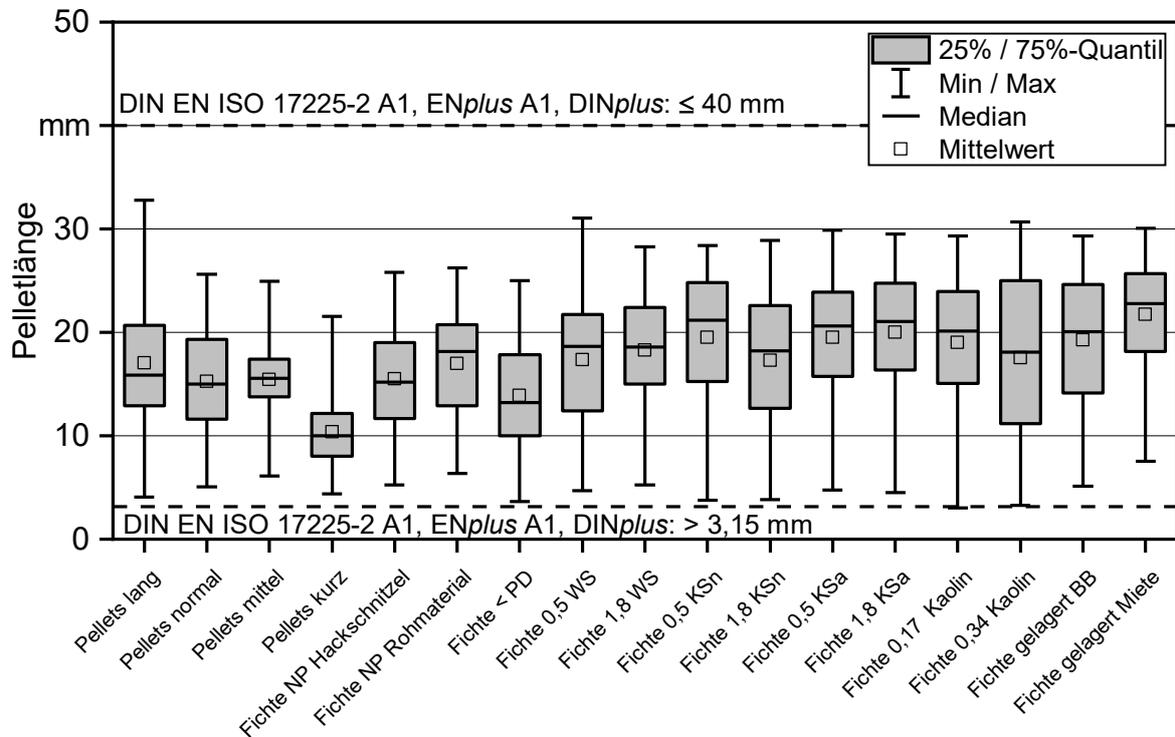


Abbildung 53: Längenverteilung der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

Wassergehalt. Der Wassergehalt (Abbildung 54) der untersuchten Fichtenvariante lag zwischen 5,9 m-% (Fichte NP Hackschnitzel) und 8,6 m-% (Fichte 1,8 KSa). Damit liegen alle produzierten Sortimente innerhalb der Spezifikationen nach DIN EN ISO 17225-2, ENplus und DINplus. Im Vergleich zu den marktverfügbaren Pellets aus dem Pelletscreening lag der Wassergehalt der produzierten Fichtenvarianten im Schnitt ca. 1–2 m-% höher (Abschnitt 5.1.1, Abbildung 29).

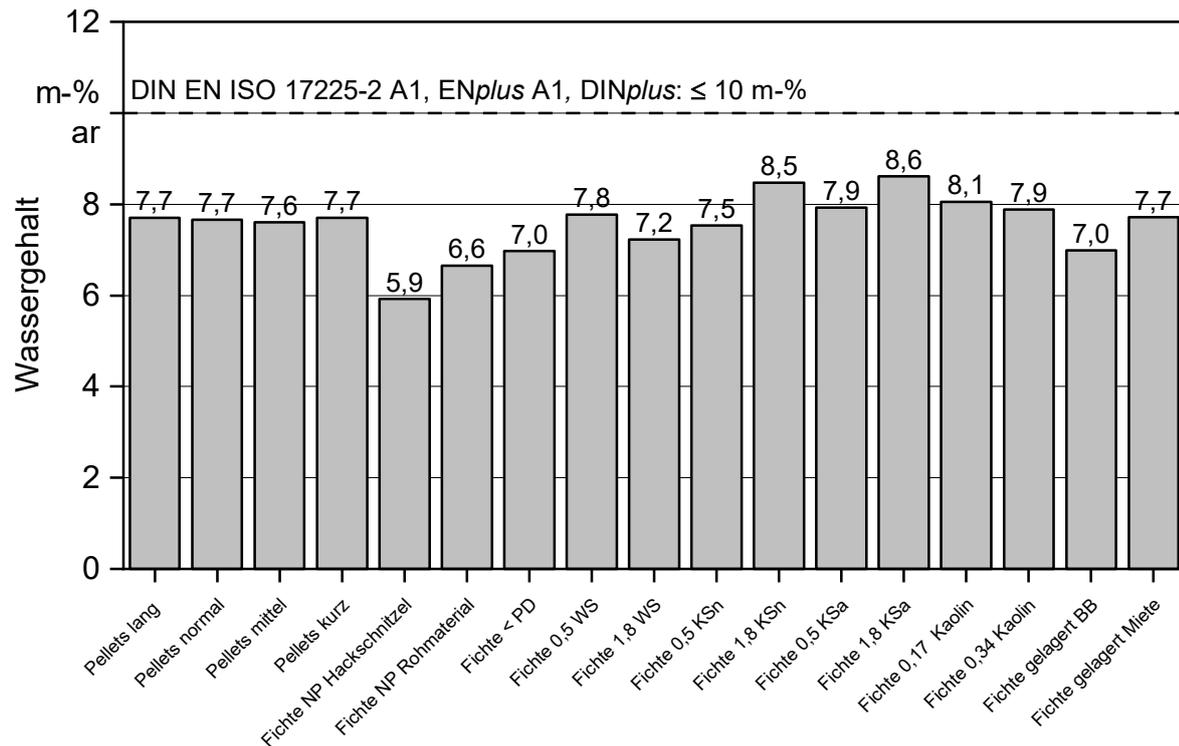


Abbildung 54: Wassergehalt der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

Aschegehalt. Abbildung 55 zeigt den Aschegehalt der Fichtensortimente. Alle Pellets der Fichtenvariation sollten aus einer Brennstoffcharge hergestellt werden. Auffallend ist der Unterschied im Aschegehalt zwischen den angelieferten Pellets „lang“ (0,38 m-%), „normal“ (0,37 m-%) und „mittel“ (0,46 m-%) sowie „kurz“ (0,46 m-%). Dies deutet auf Rohstoffschwankungen während der Produktion beim Projektpartner hin. Da bei diesen Pellets Weizenmehl als Bindemittel eingesetzt wurde, könnte die Ursache auch eine inhomogene Verteilung des Bindemittels sein (Abbildung 57). Auch die Pellets aus Hackgut sollten das Rohmaterial betreffend einheitlich mit den restlichen Sortimenten sein. Die natürlichen Schwankungen des Aschegehalts innerhalb der Rohstoffcharge, unabhängig von Additiven und Bindemitteln, lagen demzufolge zwischen 0,33 m-% (Nullprobe aus Hackschitzeln) und 0,44 m-% (Fichte < PD). Bei dem ausschließlich als gemahlener Pelletierrohstoff in acht Bigbags gelieferten Material (siehe Abbildung 56) liegt der Aschegehalt zwischen 0,35 m-% und 0,43 m-%. Die Probenahme der Aschegehaltproben aus den Bigbags erfolgte dabei mittels einer Probennahmelanze, die über die gesamte Höhe des Bigbags verteilt eine repräsentative Probe entnimmt.

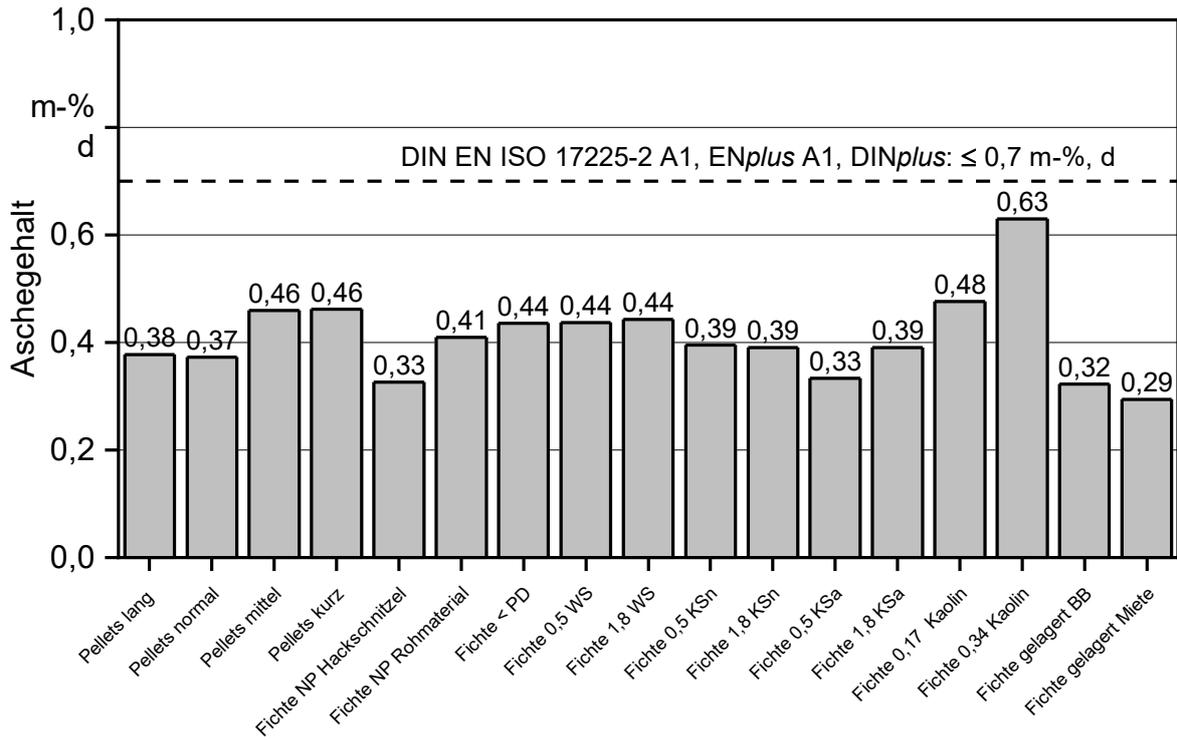


Abbildung 55: Aschegehalt der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen, bezogen auf die Trockenmasse

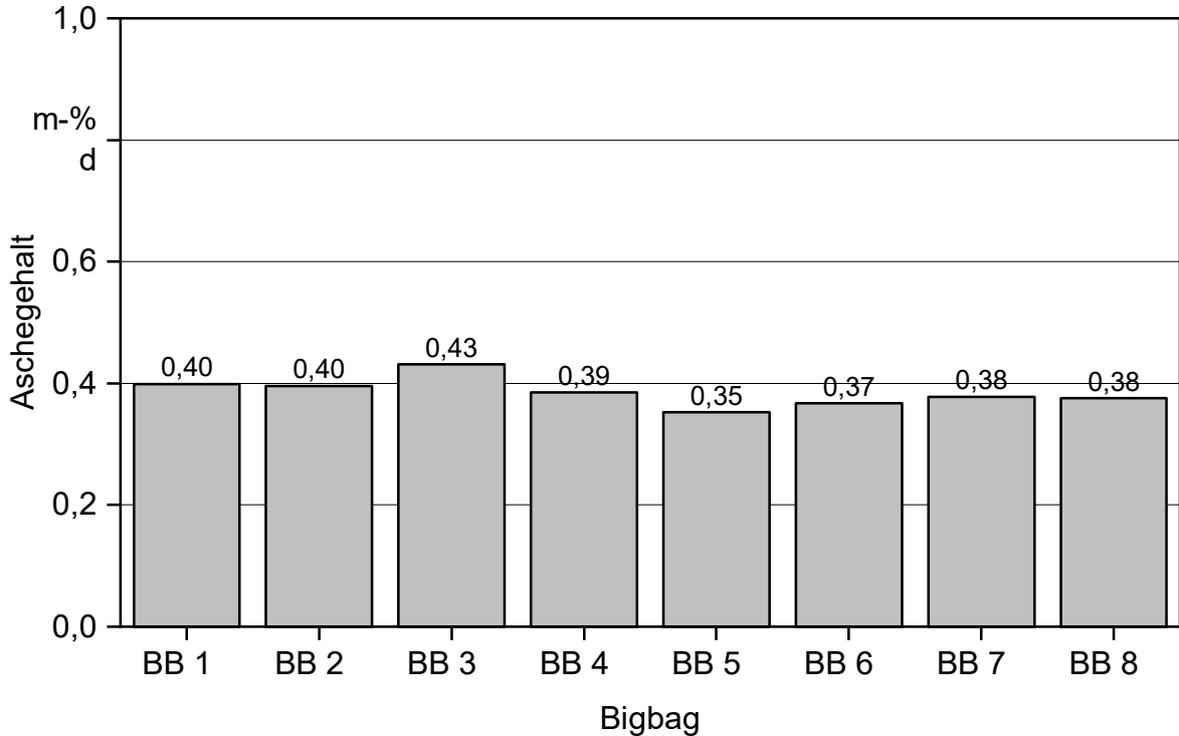


Abbildung 56: Aschegehalt des Rohmaterials bei Anlieferung je Bigbag (BB), bezogen auf die Trockenmasse

Bei der Zugabe von Bindemittel blieb der Aschegehalt bei Zugabe von 0,5 m-% Weizenstärke (Fichte 0,5 WS) und 1,8 m-% Weizenstärke auf gleichem Niveau, während er bei der Zugabe von 0,5 m-% bzw. 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität etwas von 0,33 m-% auf 0,39 m-% anstieg. Bei nativer Kartoffelstärke lag der Aschegehalt des reinen Bindemittels niedriger als bei dem verwendeten Rohmaterial (Abbildung 57), wodurch der Gesamtaschegehalt von 0,5 m-% auf 1,8 m-% native Kartoffelstärke auch leicht abnahm. Bei der Zugabe von Kaolin stieg der Aschegehalt auf 0,48 m-% bei 0,17 m-% Kaolinzugabe bzw. 0,68 m-% bei 0,34 m-% Kaolinzugabe an. Diese Werte liegen leicht unter dem vorab berechneten Aschegehalt.

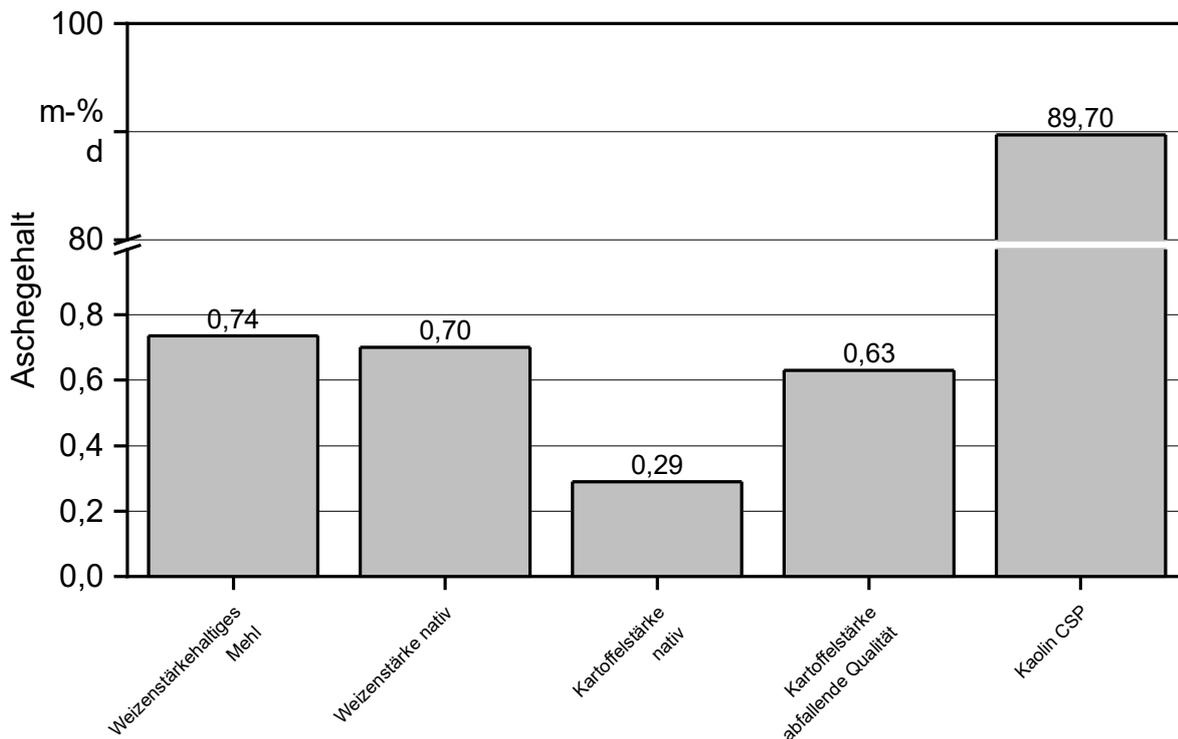


Abbildung 57: Aschegehalt der verwendeten Bindemittel und Additive, bezogen auf die Trockenmasse

Karbonatgehalt der Brennstoffasche. Betrachtet man den Karbonatanteil in der Brennstoffasche (550 °C) in Abbildung 58, so fällt auf, dass die aus demselben Rohmaterial hergestellten Pellets alle einen Karbonatanteil zwischen 0,08 m-% und 0,09 m-%, bezogen auf den trockenen Brennstoff aufweisen. Die Pellets aus gelagerten Sägespänen liegen dagegen mit 0,07 m-% bis 0,08 m-% auf einem vergleichbaren Niveau. Davon weichen die Pellets aus Hackschnitzeln (0,05 m-%) und die Pellets mit Kaolin (0,05 m-%) ab.

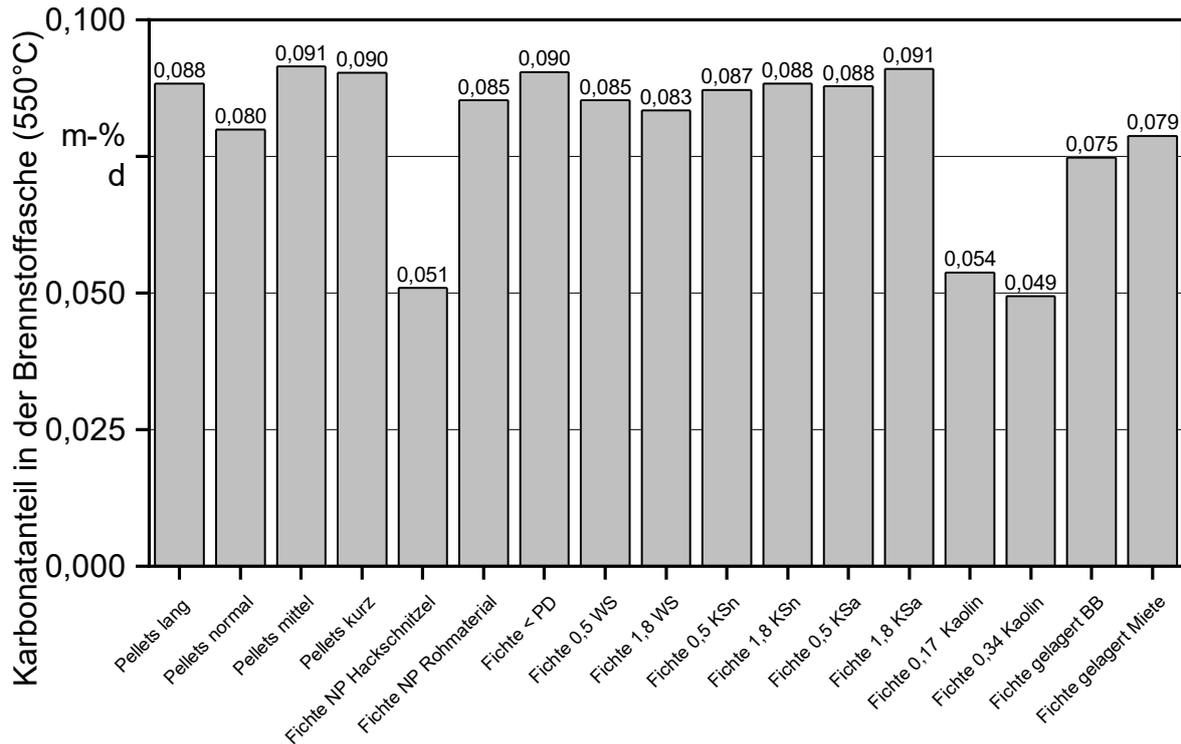


Abbildung 58: Karbonatanteil in der Brennstoffasche (550 °C) der Fichten-Brennstoffvariationen, bezogen auf trockenen Brennstoff

Abbildung 59 zeigt eine signifikante Abhängigkeit des Karbonatanteils vom Calciumgehalt im Brennstoff, wenn man die mit Kaolin additvierten Pellets aus der Regression herausnimmt ($R^2 = 0,80$). Die Abweichung bei den mit Kaolin additvierten Pellets liegt vermutlich an der durch das Kaolin begünstigten Bildung von Kalium- und Calciumsilicaten anstatt von Karbonaten. Da der Aschegehalt bei 550 °C bestimmt wird und hier die Karbonate einen gewissen Anteil am Aschegehalt haben, könnte durch diesen Effekt auch etwas mehr Kaolin zugegeben werden bzw. besteht ein gewisser Puffer, ohne den Grenzwert für den Aschegehalt zu überschreiten.

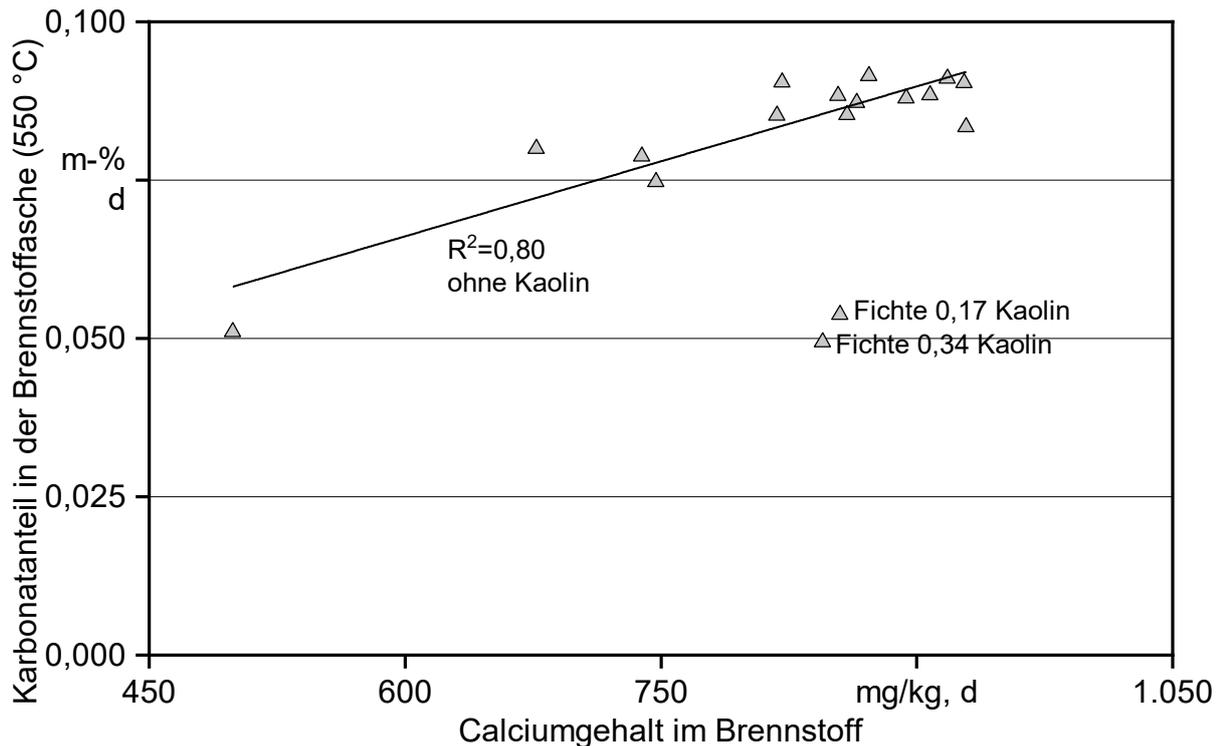


Abbildung 59: Abhängigkeit des Karbonatanteils der Brennstoffasche (550 °C) vom Calciumgehalt im Brennstoff

Mechanische Festigkeit. Hinsichtlich der mechanischen Festigkeit (siehe Abbildung 60) wurde der Grenzwert von 97,5 m-% nach DIN EN ISO 17225-2 A1 und DINplus sowie 98 m-% gemäß ENplus A1 von den meisten Sortimenten eingehalten. Bei dem Versuch, durch den Pelletiervorgang eine niedrigere Partikeldichte zu erzeugen („Fichte < PD“), wurde die mechanische Festigkeit mit 94,1 m-% deutlich unterschritten. Die Sortimente Fichte 0,5 KSn, Fichte 0,5 KSa, Fichte mit Kaolin und die Pellets aus in der Miete gelagerten Sägespänen lagen ebenfalls knapp unter 97,5 m-%. Hier fehlten teilweise Matrizen mit Presskanallängen zwischen 18 und 24 mm sowie 24 und 30 mm. Vor allem die Pelletierung der im Bigbag gelagerten Sägespäne gestaltete sich schwierig, sodass die mechanische Festigkeit lediglich 93,9 m-% beträgt.

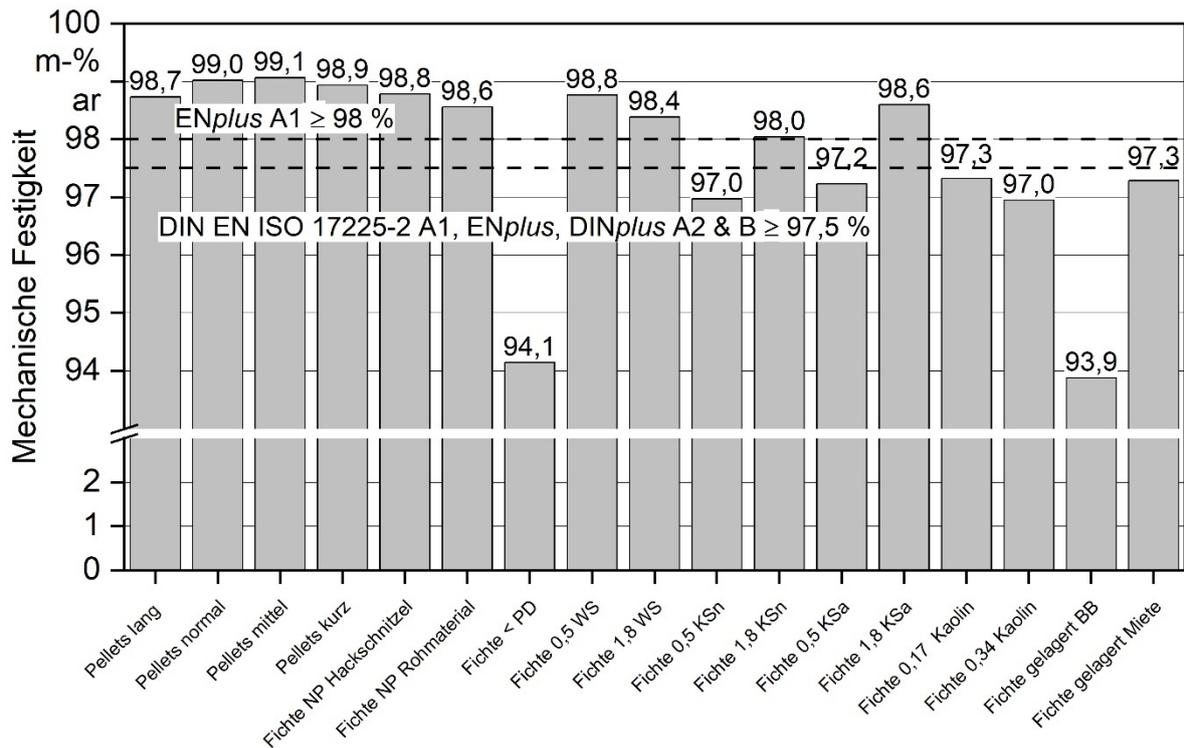


Abbildung 60: Mechanische Festigkeit der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

Feinanteil. Beim Feinanteil (siehe Abbildung 61) lagen alle produzierten Fichtensortimente unter dem Grenzwert für Schüttgüter von 1,0 m-% nach DIN EN ISO 17225-2 und alle Sortimente bis auf „Fichte mit niedriger Partikeldichte“ unter dem Grenzwert für Sackware nach ENplus von 0,5 m-%. Alle Pellets außer Pellets „lang“, „normal“, „mittel“ und „kurz“ wurden direkt nach der Produktion und anschließender Abkühlung ohne weitere Transportschritte beprobt.

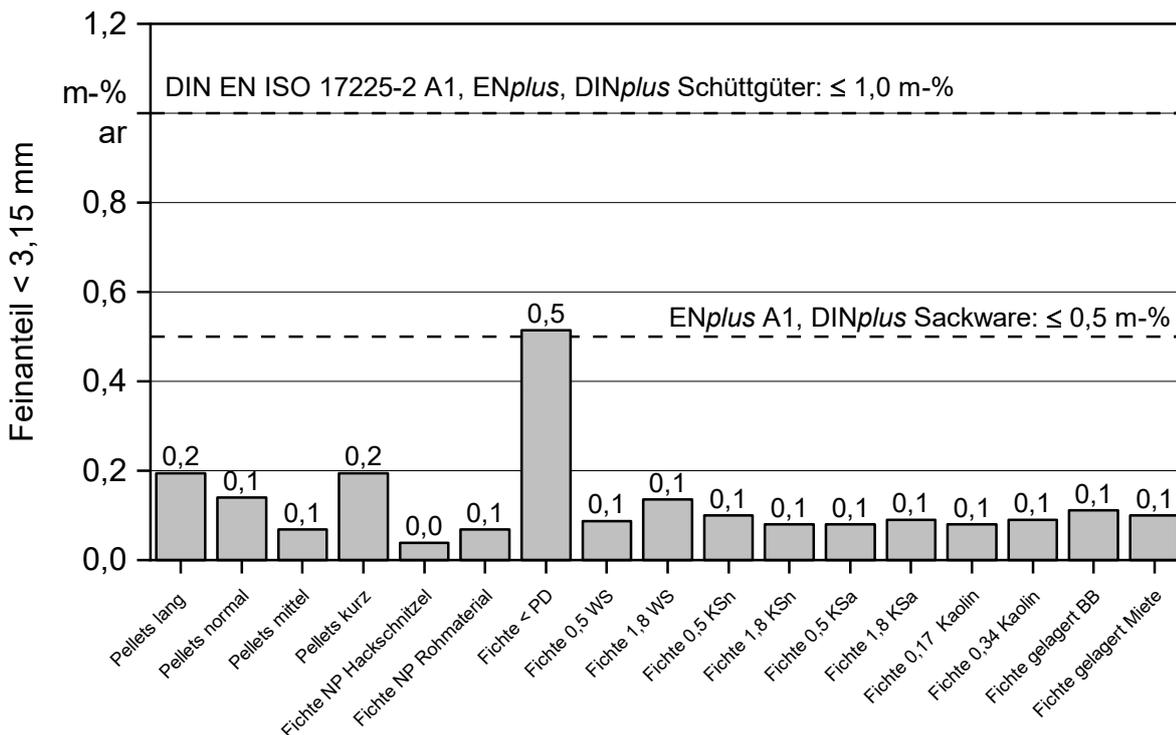


Abbildung 61: Feinanteil der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

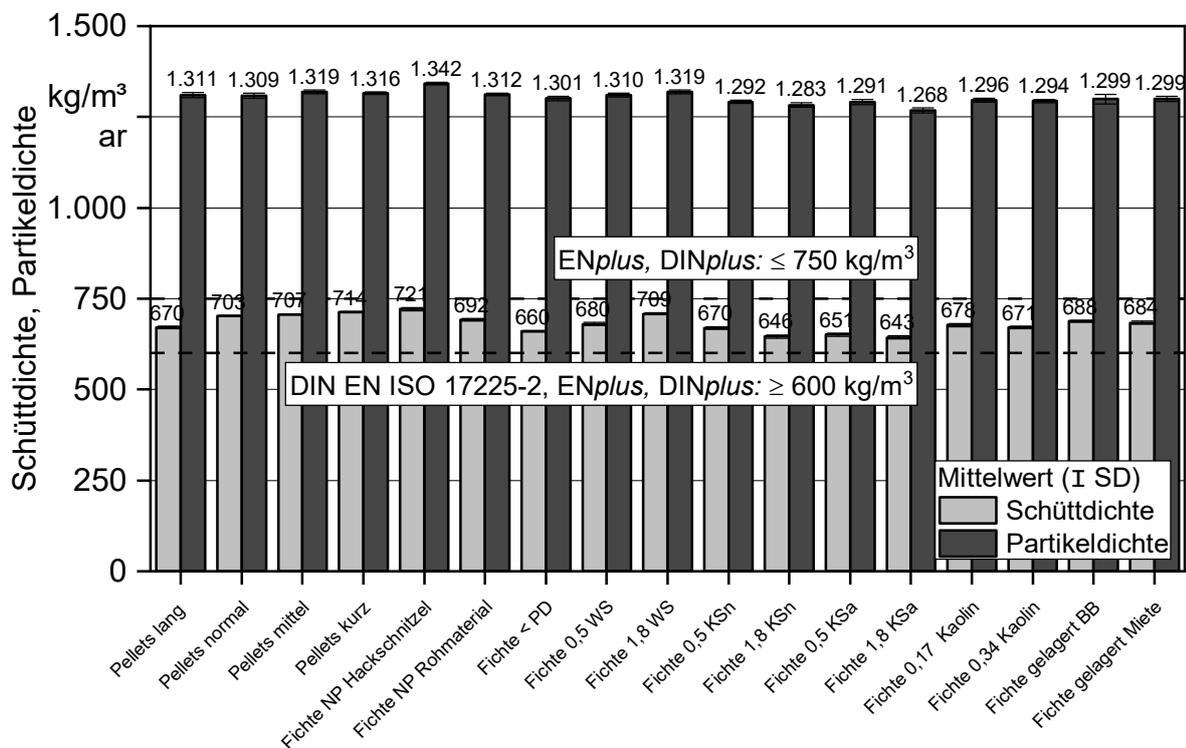


Abbildung 62: Schüttdichte ($n = 3$) und Partikeldichte ($n = 10$) der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

Schüttdichte und Partikeldichte. Abbildung 62 zeigt die Schüttdichte und die Partikeldichte der untersuchten Fichtensortimente im Anlieferungszustand. Die Schüttdichte liegt

dabei zwischen 643 kg/m^3 (Fichte 1,8 KSa) und 721 kg/m^3 (Fichte NP Hackschnitzel) und damit innerhalb der nach Norm und nach Zertifikatsanforderung gültigen Grenzen (siehe Abbildung 62). Die ermittelten Partikeldichten liegen zwischen 1.268 kg/m^3 (Fichte 1,8 KSa) und 1.342 kg/m^3 (Fichte NP Hackschnitzel). Damit stellen sich die Minimal- und Maximalwerte für die Schüttdichte bei denselben Fichtenvarianten ein wie bei der Partikeldichte. Die Schüttdichte korreliert signifikant ($p < 0,05$) und positiv (Pearson's $R = 0,89$) mit der Partikeldichte und ist signifikant, aber negativ korreliert zur mittleren Pelletlänge (Pearson's $R = -0,64$) (siehe Abbildung 63 und Tabelle 18). Die ermittelten Schüttdichten und Partikeldichten liegen, verglichen mit den Pellets aus dem Pelletscreening, in vergleichbaren Bandbreiten vor. Vergleicht man die Partikeldichte der Nullprobe (Fichte NP Rohmaterial) von 1.312 kg/m^3 mit dem Versuch, durch Verwendung anderer Anlageneinstellungen (Matrize, Wassergehalt) eine niedrigere Partikeldichte von 1.301 kg/m^3 zu erreichen (Fichte < PD), so wird deutlich, dass sich die Partikeldichte nur marginal durch das Pelletieren selbst beeinflussen lässt. Dies wird vor allem dann schwierig, wenn zugleich die Anforderungen an die mechanische Festigkeit einzuhalten sind, da diese von Fichte < PD bereits deutlich unterschritten wurde, obwohl sich die Partikeldichte nur um 11 kg/m^3 unterscheidet.

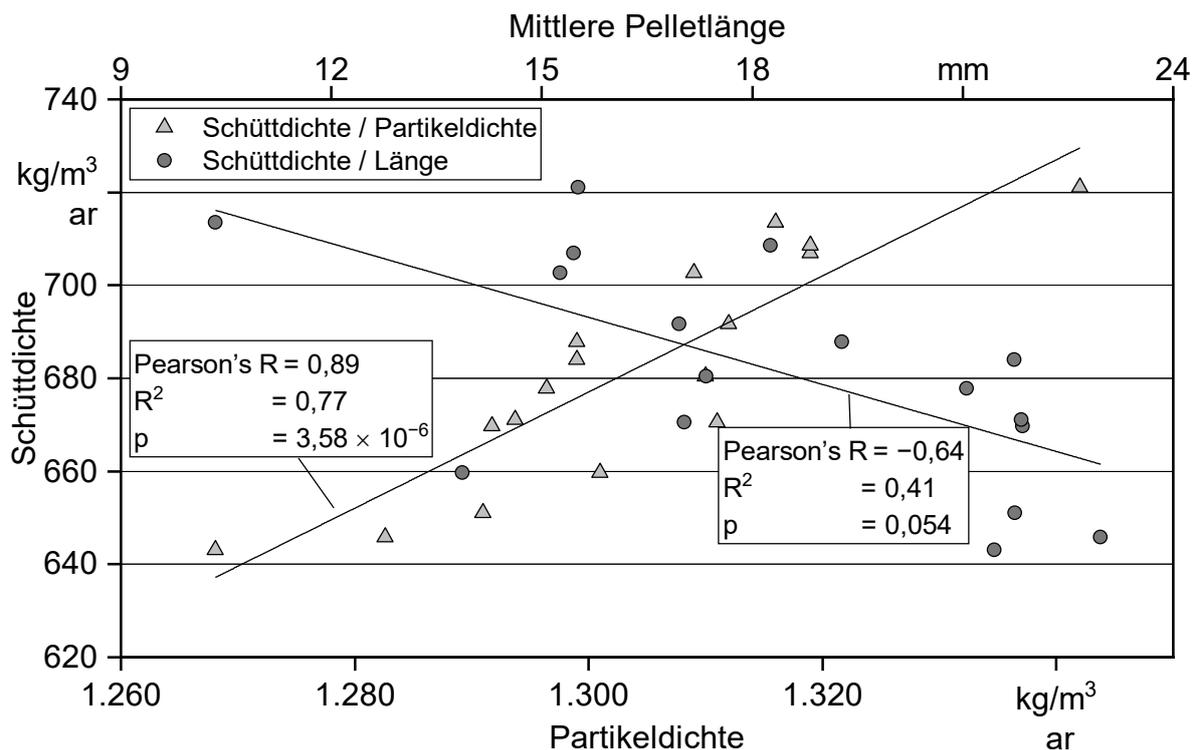


Abbildung 63: Abhängigkeit der Schüttdichte von der Partikeldichte und der Pelletlänge der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

Pellethärte. Die Pellethärte (Abbildung 64) der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen liegt zwischen 36 kg (Fichte NP Rohmaterial) und 54 kg (Pellets „normal“) mit Ausnahme des Sonderfalls „Fichte < PD“, wo die Härte durch die niedrige Verdichtung des Rohmaterials lediglich bei 21 kg liegt. Hier („Fichte < PD“) liegt die Härte signifikant nied-

riger als bei den anderen untersuchten Fichtensortimenten. Die Längenverteilungen (lang, normal, mittel und kurz) wurden alle an derselben Pelletieranlage mit einer Ringmatrize hergestellt. Diese vier Sortimente weisen die größten Unterschiede hinsichtlich der Härte von 41 bis 54 kg auf, allerdings sind diese Unterschiede nicht signifikant. Die restlichen mit der Flachmatrizenpresse hergestellten Fichtensortimente (Abschnitt 4.2.3, Tabelle 9) liegen zwischen 35 kg (Fichte gelagert Miete) und 44 kg (Fichte 1,8 KSn) in einem engen Bereich.

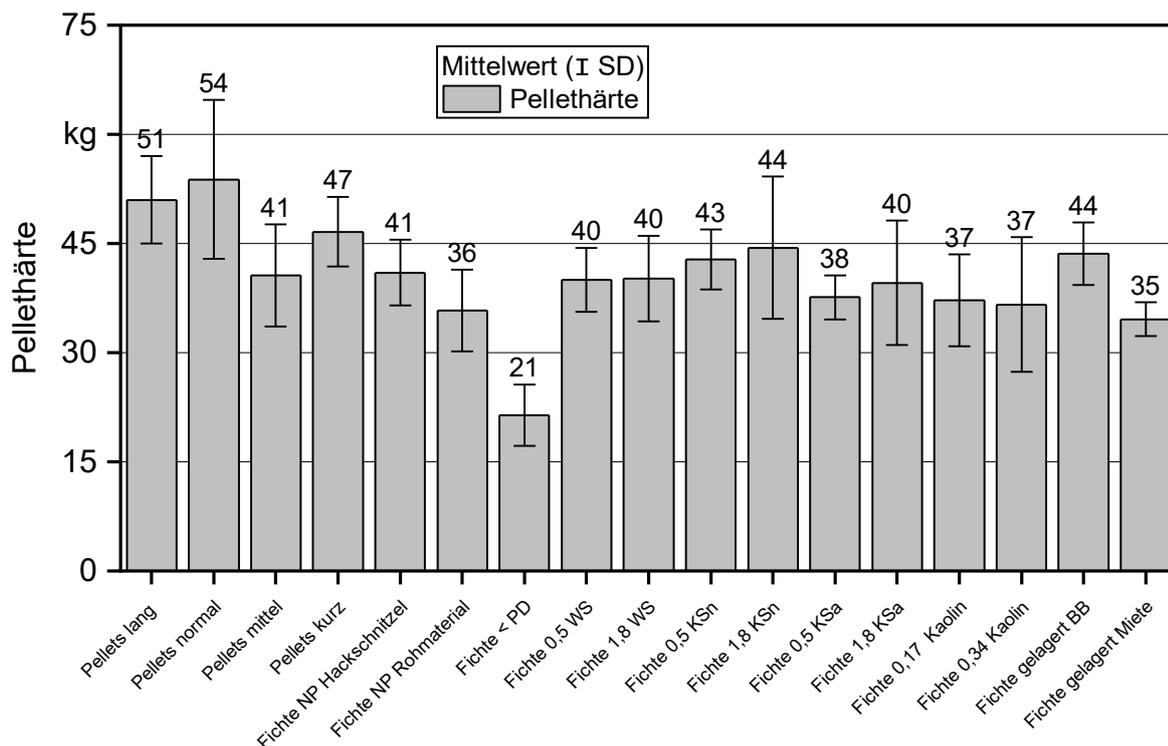


Abbildung 64: Pellethärte der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung bei n = 5 an.

Korrelationen mechanischer Parameter. Tabelle 18 zeigt die Korrelationen der diskutierten mechanischen Parameter nach Pearson. Im Unterschied zu den untersuchten Pellets im Pelletscreening (siehe Abschnitt 5.1.1, Tabelle 16) korreliert hier die Pelletlänge negativ mit der Schüttdichte, aber gleichzeitig auch mit der Partikeldichte (Pearson's R = -0,69). Dies deutet darauf hin, dass bei gleichem Ausgangsmaterial für die Pelletieranordnung sowie vergleichbarer Pelletiereinstellung die Partikeldichte bei längeren Pellets signifikant niedriger ist. Wie auch beim Pelletscreening korreliert der Feinanteil negativ mit der mechanischen Festigkeit (Pearson's R = -0,50) und die mechanische Festigkeit korreliert zusätzlich mit der Pellethärte (Pearson's R = 0,53).

Tabelle 18: Korrelation nach Pearson der mechanischen Parameter der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen

	Schüttdichte	Partikel- dichte	Fein- anteil	Mechanische Festigkeit	Mittlere Länge	Pellethärte
Schüttdichte	1	0,88*	-0,16	0,33	-0,64*	0,28
Partikeldichte	0,88*	1	-0,01	0,31	-0,69*	0,15
Feinanteil	-0,16	-0,01	1	-0,50*	-0,46	-0,45
Mechanische Festigkeit	0,33	0,31	-0,50*	1	-0,19	0,53*
Mittlere Länge	-0,64*	-0,69*	-0,46	-0,19	1	-0,10
Pellethärte	0,28	0,15	-0,45	0,53*	-0,10	1

* (fett): Der p-Wert der Pearson-Korrelation liegt unter 0,05, d. h., die Steigung der Korrelation unterscheidet sich signifikant von null; Datenbasis sind Werte im Anlieferungszustand (ar).

Partikelgrößenverteilung des Pelleta Ausgangsmaterials. Abbildung 65 zeigt die Partikelgrößenverteilung des Pelleta Ausgangsmaterials der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen. Alle hier dargestellten Brennstoffe bis auf Fichte NP Hackschnitzel, Fichte gelagert BB und Fichte gelagert Miete wurden mit dem gleichen Rohmaterial hergestellt, das mit einer Trockenhammermühle zerkleinert wurde. Daher weisen diese Sortimente nur geringe Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung des Pelleta Ausgangsmaterials auf. Bei dem Sortiment Fichte NP wurde das Rohmaterial mit einer Kollermühle zerkleinert (Abschnitt 4.2.3, Tabelle 9) und weist deutlich höhere Anteile an Partikeln < 3,15 mm bis 2,0 mm auf im Vergleich zu den Sortimenten, bei denen das Rohmaterial mit der Hammermühle zerkleinert wurde. Bei den Sortimenten zur Untersuchung des Einflusses der Lagerung von Rohmaterial (Fichte gelagert BB und Fichte gelagert Miete) wurde das Rohmaterial in Form von feuchtem Sägespan angeliefert, der nicht weiter zerkleinert wurde. In beiden Fällen wurde das Rohmaterial nach der Lagerung getrocknet und mit der Kollermühle zerkleinert. Im direkten Vergleich zeigt das im Bigbag gelagerte Rohmaterial einen etwas höheren Anteil an groben Partikeln (< 3,15 mm bis 2,0 mm) als das in der Miete gelagerte Material. In beiden Fällen ist der Anteil jedoch deutlich niedriger als bei der Zerkleinerung der Hackschnitzel mit der Kollermühle. Teilt man die hier untersuchten Sortimente nach DIN EN ISO 17225-2 in die Klassen für Industriepellets ein (siehe Anhang 2, Tabelle 83), so lassen sich alle Sortimente außer Fichte NP Hackschnitzel und Fichte gelagert BB einer der drei Klassen zuordnen. Alle Sortimente, bei denen das Rohmaterial mit der Hammermühle zerkleinert wurde, fallen dabei unter I1 oder I2, das Sortiment Fichte gelagert Miete (Sägespan zerkleinert mit Kollermühle) fällt unter I3.

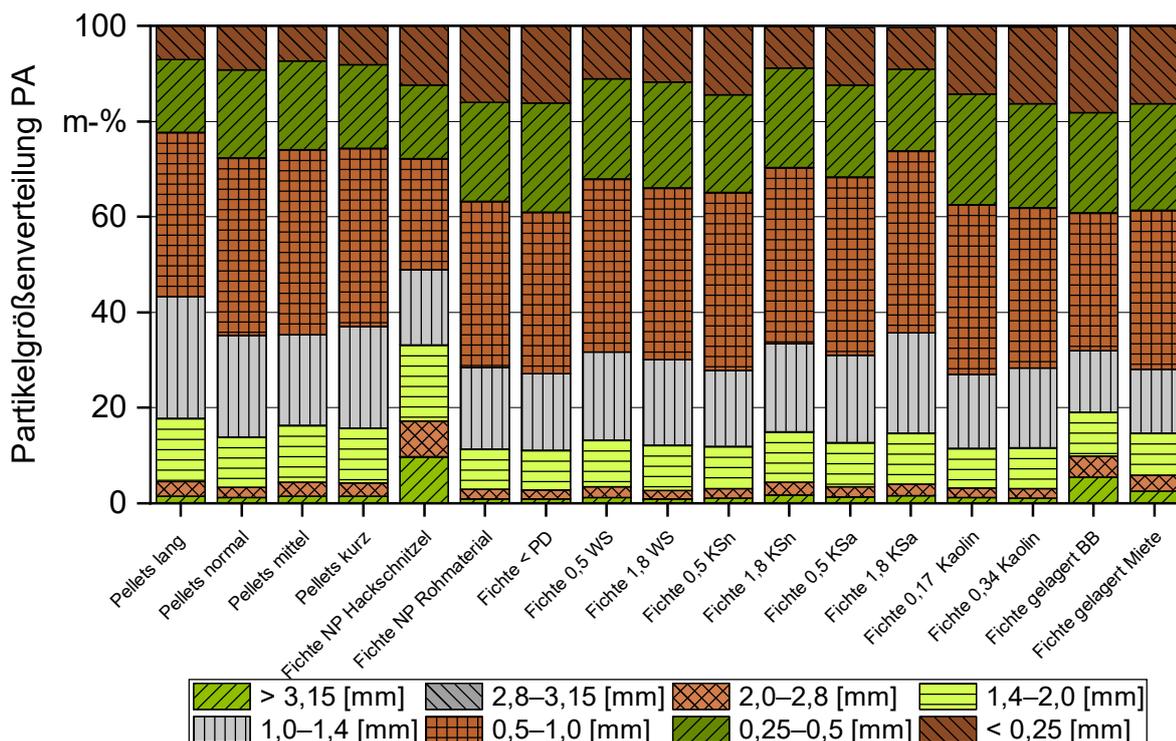


Abbildung 65: *Partikelgrößenverteilung des Pelletaustangsmaterials der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen*

5.2.1.2 Inhaltsstoffliche Brennstoffqualität

Summe der Aerosolbildner (K, Na, Zn, Pb). Abbildung 66 zeigt die Summe der Aerosolbildner für die untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen und Abbildung 67 die Summe der Aerosolbildner der untersuchten Bindemittel. Die Sortimente zur Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge weisen Unterschiede bei den Aerosolbildnern auf. Hier unterscheiden sich vor allem die Sortimente „lang“ (481 mg/kg) und „normal“ (415 mg/kg) von den Sortimenten „mittel“ (599 mg/kg) und „kurz“ (529 mg/kg), wobei immer ein möglicher Analysenfehler von ca. 15 % berücksichtigt werden muss (siehe Abbildung 66). Die am TFZ hergestellten Sortimente weisen bis auf die gelagerten Rohstoffe vergleichbare Werte (491–578 mg/kg) unter Berücksichtigung der Analysengenauigkeit auf. Das Sortiment aus den in der Miete gelagerten Sägespänen weist mit 431 mg/kg im Vergleich zu dem Sortiment aus den im Bigbag gelagerten Sägespänen mit 351 mg/kg einen tendenziell niedrigeren Gehalt an Aerosolbildnern auf. Da es sich um eine kleine Miete handelte, ist zu vermuten, dass es hier zu einer Auswaschung von Kalium gekommen ist.

Die Gehalte aerosolbildender Elemente liegen für die untersuchten Bindemittel (Abbildung 67) zwischen 646 mg/kg (Kartoffelstärke nativ) und 2.361 mg/kg (Weizenstärke nativ) und für Kaolin bei 13.000 mg/kg. Auffallend ist bei der Kartoffelstärke mit der abfallenden Qualität der sehr hohe Natriumgehalt bei einem gleichzeitig vergleichsweise sehr niedrigen Kaliumgehalt. Bei der Zugabe von Bindemittel kam es in allen untersuchten Fällen zu einer Zunahme der aerosolbildenden Elemente bei einer Erhöhung von 0,5 m-% auf 1,8 m-% Bindemittel. Bei der Kartoffelstärke mit abfallender Qualität (höherer Anteil modifizierter Stärken) lässt sich auch der hohe Natriumgehalt des Bindemittels in den untersuchten

Pelletproben (Fichte 1,8 KSa) wiederfinden. Bei Kaolinabstufungen kam es durch die sehr geringe Dosierung nur zu einem minimalen Anstieg der Aerosolbildner im Vergleich zwischen 0,17 und 0,34 m-% Kaolinzugabe.

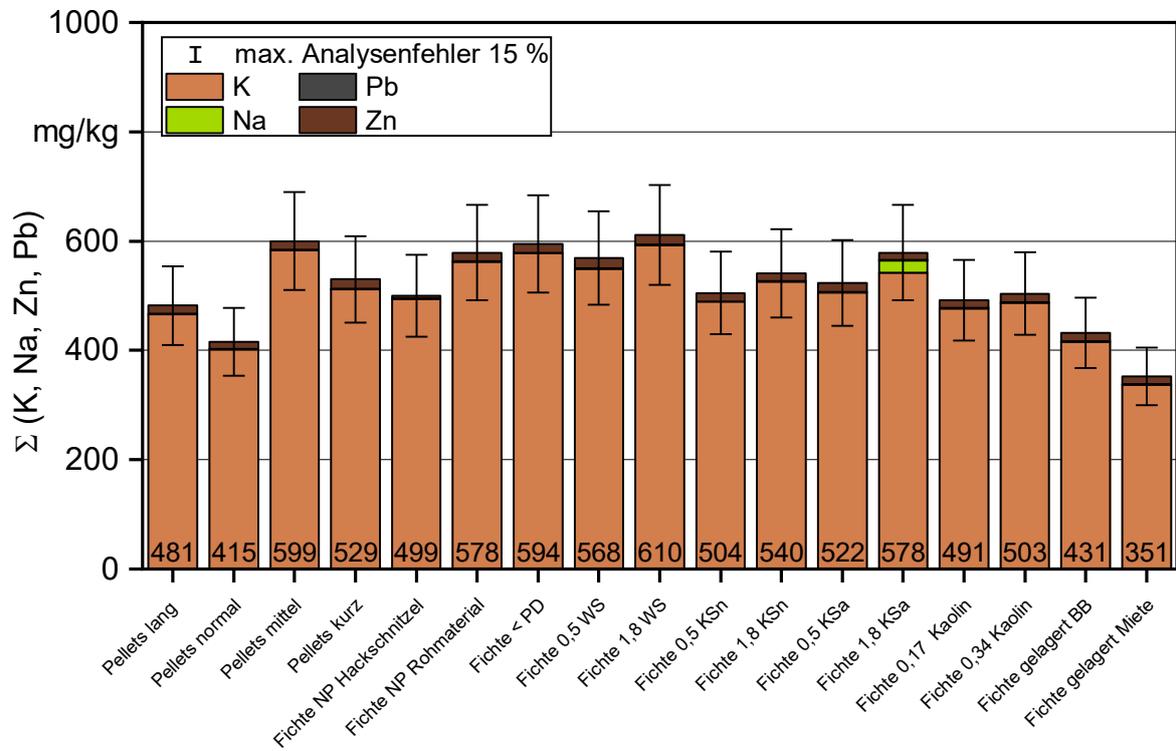


Abbildung 66: Summe des Gehalts an Aerosolbildnern (K, Na, Zn, Pb) der untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen, bezogen auf die Trockenmasse

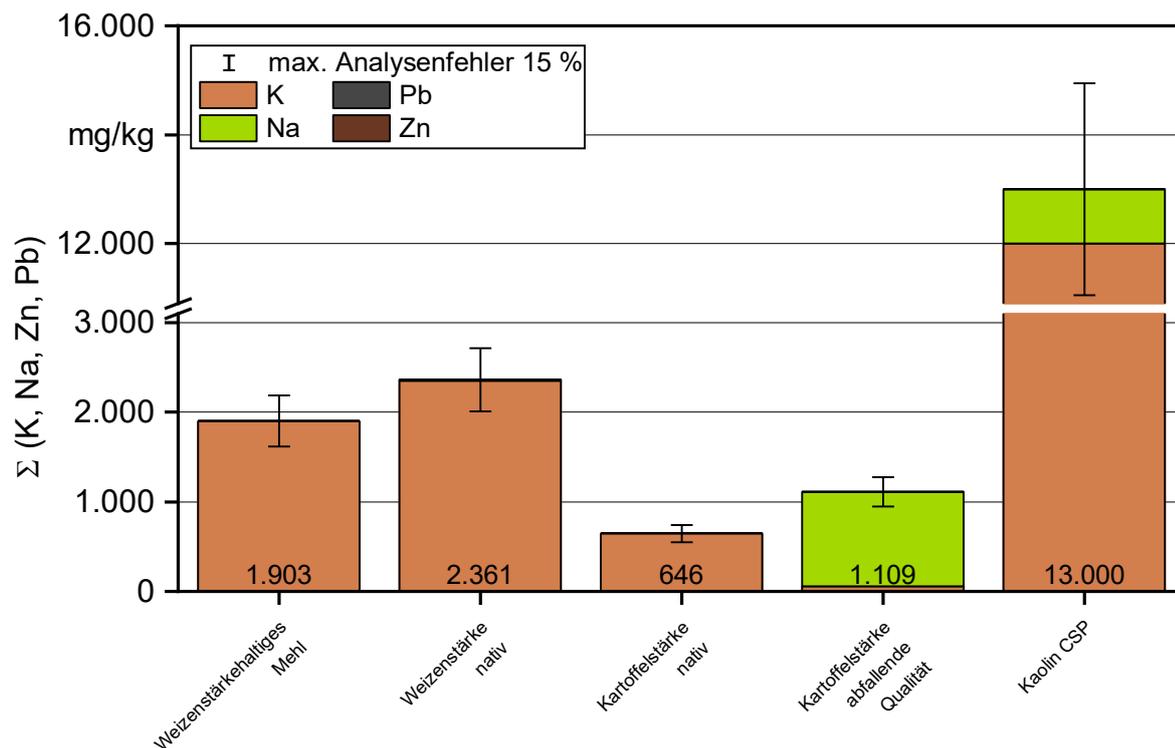


Abbildung 67: Summe des Gehalts an Aerosolbildnern (K, Na, Zn, Pb) der untersuchten Additive, bezogen auf die Trockenmasse

Brennstoffindizes. In Tabelle 19 sind die wichtigsten Brennstoffindizes für die untersuchten Fichten-Brennstoffvariationen aufgeführt. Die Sortimente weisen hinsichtlich der Brennstoffindizes keine großen Unterschiede auf. Bei den Längenvariationen fällt das Sortiment Pellets „normal“ hinsichtlich des Si/K- und Cl/Si-Verhältnisses etwas aus der Reihe. Auch bei den Pellets mit 0,34 m-% Kaolin liegen das Si/K- und das Cl/Si-Verhältnis etwas niedriger bzw. höher als bei den restlichen Sortimenten.

Tabelle 19: Brennstoffindizes für die Fichten-Brennstoffvariationen nach Unterkapitel 3.2 und 3.3, bezogen auf die Trockenmasse

Probenbezeichnung	N m-%	Σ (K, Na, Pb, Zn) mg/kg	Si/K ¹ mol/mol	Cl/Si ¹ mol/mol	(Si + P + K)/ (Ca + Mg + Al) ¹ mol/mol	K/Na ¹ mol/mol
Pellets lang	0,09	481	0,30	0,40	0,60	27,4
Pellets normal	0,07	415	0,85	0,16	0,91	23,6
Pellets mittel	0,08	599	0,24	0,40	0,72	34,3
Pellets kurz	0,09	529	0,27	0,48	0,63	30,1
Fichte NP Hack- schnittzel	0,06	499	0,28	0,40	1,03	29,0

Fichte NP Rohmaterial	0,10	578	0,29	0,34	0,73	33,0
Fichte < PD	0,09	594	0,24	0,40	0,74	34,0
Fichte 0,5 WS	0,10	568	0,25	0,40	0,73	32,3
Fichte 1,8 WS	0,12	610	0,26	0,36	0,73	34,9
Fichte 0,5 KSn	0,16	504	0,28	0,40	0,63	28,8
Fichte 1,8 KSn	0,15	540	0,26	0,40	0,69	30,9
Fichte 0,5 KSa	0,14	522	0,28	0,40	0,62	29,8
Fichte 1,8 KSa	0,15	578	0,26	0,55	0,67	14,5
Fichte 0,17 Kaolin	0,14	491	0,44	0,26	0,49	28,0
Fichte 0,34 Kaolin	0,14	503	1,15	0,10	0,56	28,6
Fichte gelagert BB	0,10	431	0,33	0,40	0,61	24,5
Fichte gelagert Miete	0,10	351	0,41	0,40	0,51	19,8

¹ Bei der Berechnung der Brennstoffindizes und der Kaolinmenge wurde bei Sortimenten mit Elementgehalten unter der Bestimmungsgrenze (siehe Abschnitt 4.3.1, Tabelle 13) der Wert entsprechend der Bestimmungsgrenze angenommen. Die zur Berechnung der Indizes verwendeten Elementgehalte finden sich im Anhang 2, Tabelle 84 und Tabelle 85.

5.2.2 Variation der Holzart

Bei der Variation der Holzarten wurden insgesamt elf Sortimente aus acht Holzarten untersucht. Bei den Nadelhölzern wurden zwei Sortimente Fichte und je ein Sortiment Kiefer, Lärche und Douglasie untersucht. Bei den Laubhölzern kamen je zweimal Buche und Eiche, einmal Tropenholz sowie einmal Apfelbaum zum Einsatz.

5.2.2.1 Physikalische Brennstoffqualität

Pelletlänge. Abbildung 68 zeigt die Längenverteilung der Pellets aus den untersuchten Holzarten. Fichte hatte eine mittlere Länge von 15,0 bis 17,0 mm. Kiefer lieferte im Mittel die kürzesten (11,3 mm) und Lärche die längsten (18,8 mm) Pellets unter den Nadelhölzern. Die Douglasienpellets hatten eine mit den Lärchenpellets vergleichbare Länge (18,7 mm). Bei den Laubhölzern lag die mittlere Pelletlänge für Tropenholz mit 11,2 mm am niedrigsten, jedoch bei einer hohen Bandbreite mit Pellets zwischen 3 und 33 mm Länge, gefolgt von Buche (16,5–16,9 mm). Die längsten Pellets entstanden bei der Verwendung von Eichenholz mit einer mittleren Pelletlänge von 21,0 bzw. 21,8 mm. Bei den Buchenpellets handelt es sich einmal um zugekaufte Pellets (Buche 1) und einmal um Pellets aus Produktion am TFZ (Buche 2), beide Sortimente wiesen eine vergleichbare mittlere Pelletlänge auf. Verglichen mit den mittleren Längen aus dem Pelletscreening (8,7–18,1 mm) waren, wie auch schon bei den Fichten-Brennstoffvariationen (Abschnitt 5.2.1), die Pellets aus eigener Produktion etwas länger als die marktverfügbaren Pellets.

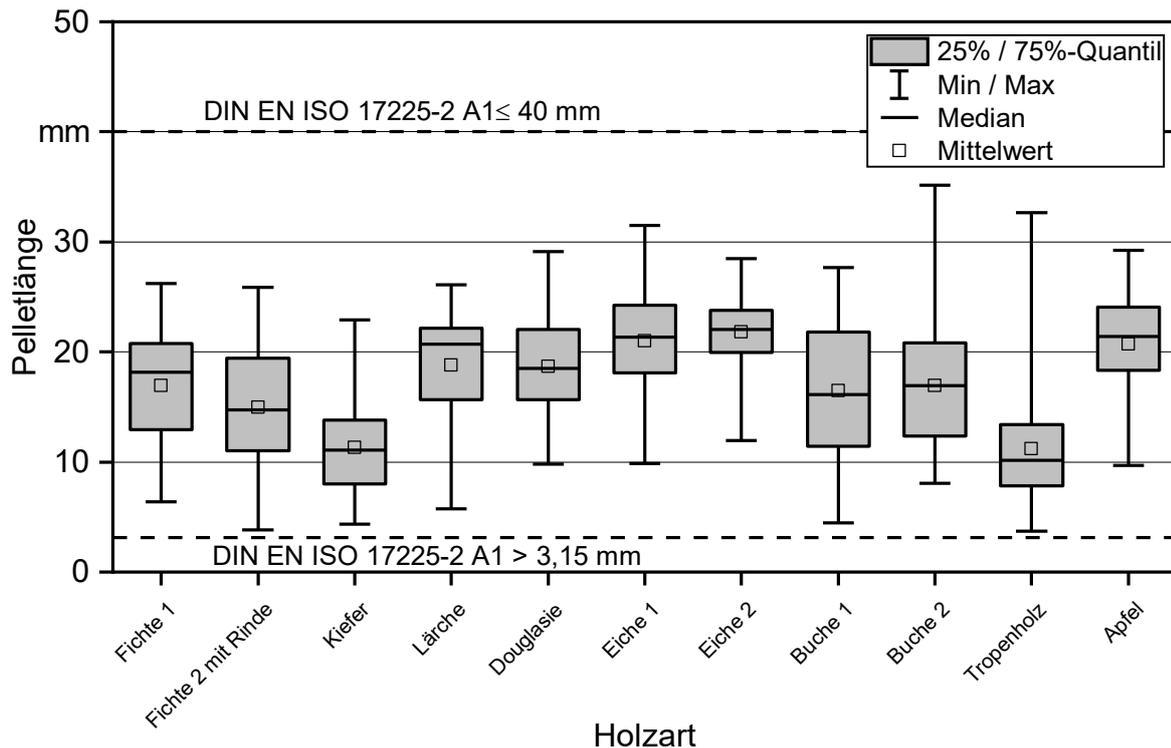


Abbildung 68: Längenverteilung der Pellets aus verschiedenen Holzarten

Wassergehalt. Alle Sortimente aus den untersuchten Holzarten lagen unter dem Grenzwert für den Wassergehalt von 10 m-% (siehe Abbildung 69). Bei den Nadelhölzern lag der Wassergehalt zwischen 6,6 m-% (Fichte 1) und 9,7 m-% (Lärche); bei den Laubhölzern zwischen 6,2 m-% (Buche 1) und 8,0 m-% (Eiche 2). Damit liegen die Wassergehalte der Pellets aus eigener Herstellung auf einem vergleichbaren Niveau wie die marktverfügbaren zertifizierten Holzpellets (siehe Abschnitt 5.1.1).

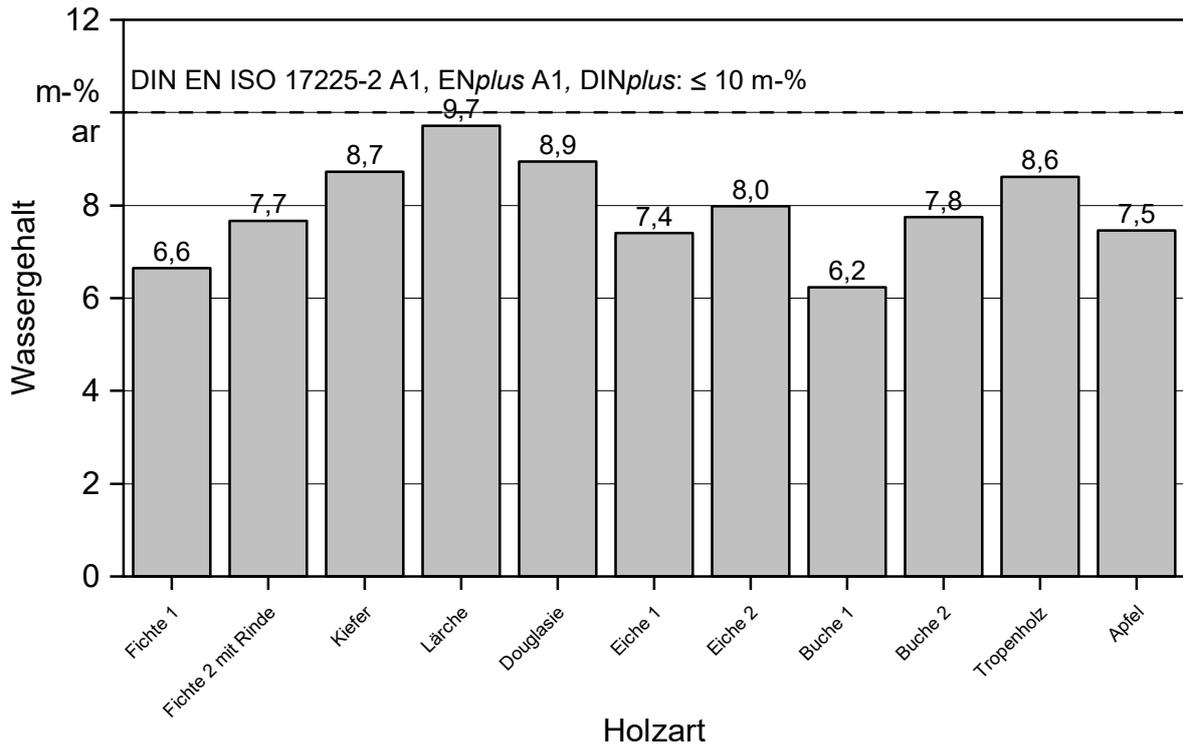


Abbildung 69: Wassergehalt der selbst hergestellten Pellets aus verschiedenen Holzarten

Aschegehalt. Der Aschegehalt der Pellets aus den verschiedenen Holzarten ist in Abbildung 70 dargestellt. Für Fichtenpellets aus Rohmaterial ohne Rinde liegt der Aschegehalt bei 0,41 m-% (Fichte 1). Im Vergleich dazu liegt der Aschegehalt bei den Fichtenpellets mit Rinde mit 0,81 m-% doppelt so hoch. Damit fallen die Fichtenpellets mit Rinde nicht in die Qualität A1 nach Norm bzw. den Zertifizierungsprogrammen. Lärche und Douglasie liegen mit 0,39 m-% Aschegehalt auf einem Niveau mit Fichte ohne Rinde. Die Kiefenpellets weisen mit 0,61 m-% einen etwas höheren Aschegehalt auf. Bei den Laubhölzern weisen die beiden Eichensortimente mit 0,27 und 0,36 m-% die niedrigsten Aschegehalte aller untersuchten Holzarten auf. Die beiden Buchenholz-Sortimente liegen mit 0,56–0,63 m-% relativ hoch, sind aber vergleichbar. Für die Apfelpellets wurde der höchste Aschegehalt (Apfelplantage) mit 2,39 m-% ermittelt, hier handelte es sich um Ausgangsmaterial mit Rinde. Eine weitere Probe eines älteren Apfelbaums (keine Apfelplantage) wies lediglich einen Aschegehalt von 0,49 m-% auf. Der hohe Aschegehalt ist wahrscheinlich mit dem Einsatz von Düngemitteln bei den eher jungen Plantagenbäumen zu erklären. Dieses Sortiment fällt somit aus der Auswahl pelletierbarer Holzarten heraus und sollte auch nicht anteilig anderen Rohstoffen zugemischt werden. Die Tropenholzpellets erfüllen gerade noch die Anforderungen an A1, da der Aschegehalt bei 0,70 m-% liegt.

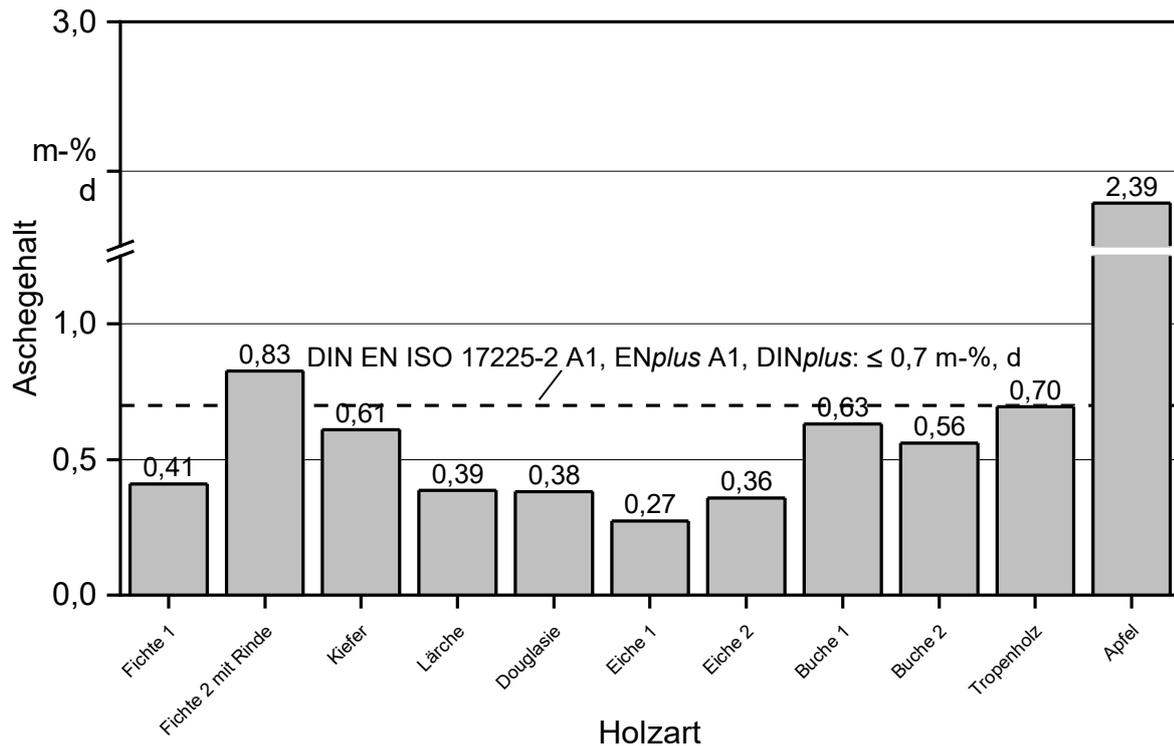


Abbildung 70: Aschegehalt der Pellets aus verschiedenen Holzarten

Karbonatgehalt der Brennstoffasche. Die Karbonatanteile liegen für Fichte, Lärche und Eiche mit 0,07 m-% bis 0,10 m% auf einem ähnlichen Niveau wie bei der Mehrheit der marktverfügbaren Holzpellets (Abschnitt 5.1.2, Abbildung 45). Kiefer (0,05 m-%) und Douglasie (0,03 m%) liegen dagegen auf einem niedrigen Niveau vergleichbar mit den mit Kaolin additivierten Fichtenpellets (Abschnitt 5.2.1, Abbildung 58). Eine Ursache könnte der vergleichsweise hohe Siliziumgehalt (siehe Anhang 2, Tabelle 85) dieser zwei Brennstoffe sein, wodurch die Bildung von Silikaten anstatt Karbonaten begünstigt wird [54] [52]. Fichte mit Rinde (0,24 m-%) weist im Vergleich zur Fichte ohne Rinde einen ca. 2,7-fachen Karbonatanteil in der Asche auf. Der Calciumgehalt von Rinde ist typischerweise um ein Vielfaches höher als von reinem Stammholz [13], wodurch sich der höhere Karbonatanteil erklären lässt. Der Karbonatanteil an der Brennstoffasche liegt für beide Buchensortimente (0,15 m-%) und das Tropenholzmischung (0,18 m-%) ca. doppelt so hoch wie die typischen Werte der marktverfügbaren Holzpellets, jedoch innerhalb des für marktverfügbare Pellets ermittelten Wertebereichs von 0,06 m-% bis 0,22 m-% (Abschnitt 5.1.2, Abbildung 45). Dieser Unterschied ist ebenfalls im höheren Calciumgehalt bei Laubhölzern begründet [13]. Die beiden Eichensortimente unterscheiden sich hinsichtlich ihres Ca-Gehalts allerdings nicht wesentlich von den hier untersuchten Nadelhölzern (siehe auch Tabelle 84, Tabelle 85). Auch für die Holzarten weist der Karbonatanteil einen signifikanten linearen Zusammenhang ($R^2 = 0,96$) mit dem Calciumgehalt im Brennstoff auf (siehe Abbildung 72).

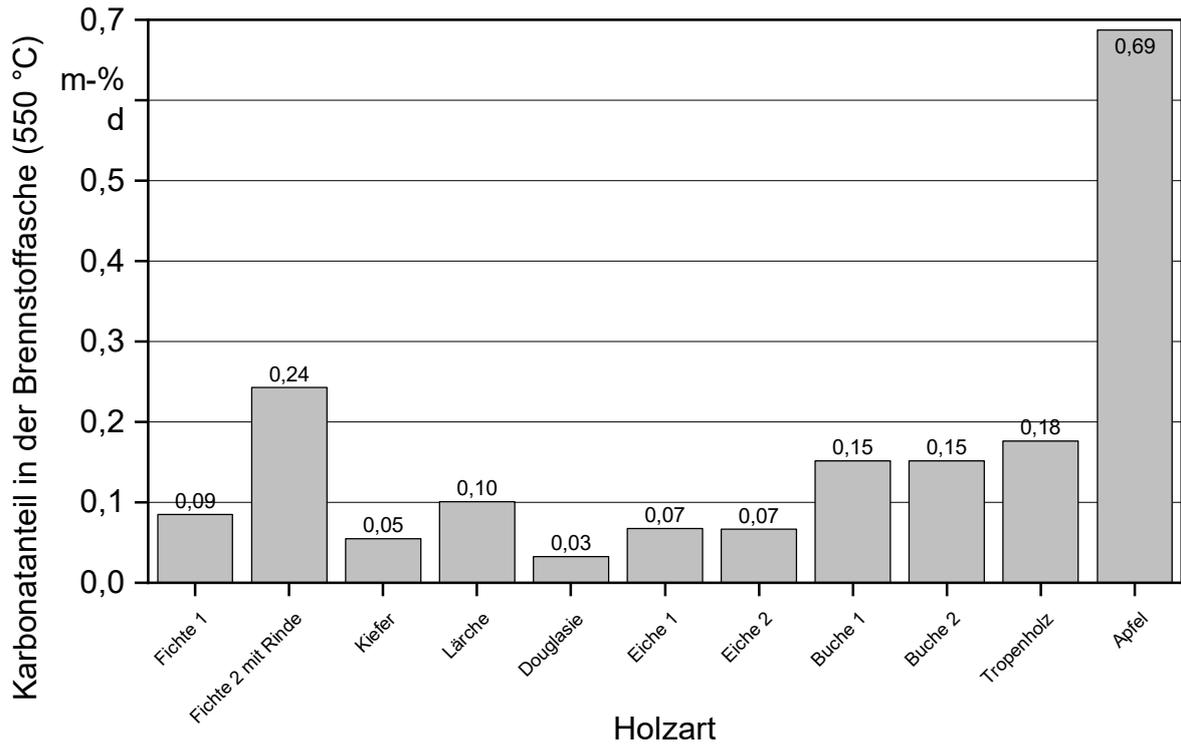


Abbildung 71: Karbonatanteil in der Brennstoffasche (550 °C) der verschiedenen Holzarten

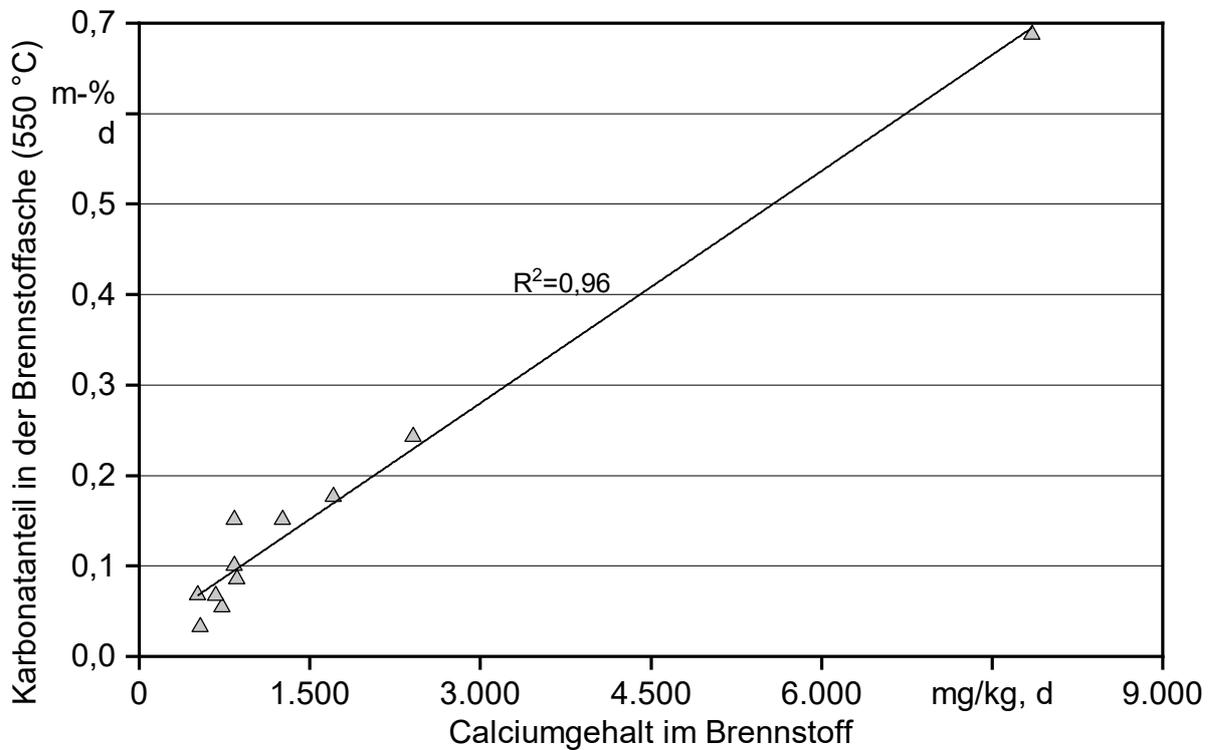


Abbildung 72: Abhängigkeit des Karbonatanteils in der Brennstoffasche (550 °C) vom Calciumgehalt im Brennstoff

Mechanische Festigkeit. Bei den untersuchten Nadelholzsortimenten liegen die Pellets aus Fichte mit Rinde mit einer mechanischen Festigkeit von 96,6 m-% unter dem Grenzwert von 97,5 m-% nach DIN EN ISO 17225-2 und DINplus (Abbildung 73). Bei Fichte ohne Rinde liegt die mechanische Festigkeit dagegen bei 98,6 m-%. Die Douglasienpellets erfüllen mit 97,6 m-% zwar den Grenzwert nach DIN EN ISO 17225-2 und DINplus, liegen aber knapp unter dem Grenzwert für A1-Pellets nach ENplus von 98 m-%. Die höchste mechanische Festigkeit bei den Nadelhölzern ergibt sich bei der Pelletierung von Lärche mit 99,5 m-%. Bei den Laubhölzern erfüllen alle untersuchten Sortimente den ENplus-A1-Grenzwert von 98 m-%, sie liegen zwischen 98,2 m-% (Buche 2) und 99,5 m-% (Apfelholz).

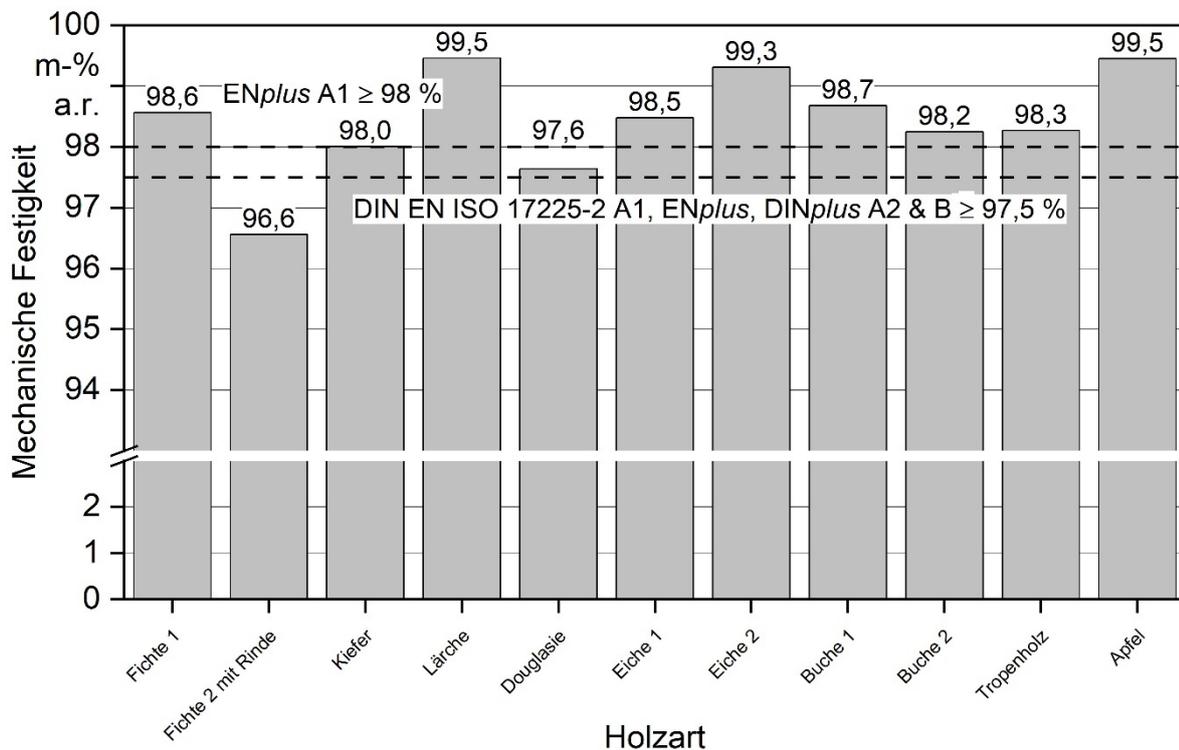


Abbildung 73: Mechanische Festigkeit der Pellets aus verschiedenen Holzarten

Feinanteil. Die Feinanteile liegen zwischen 0 und 0,3 m-% (Kiefer) und damit sämtlich unterhalb des Grenzwerts, sowohl für Schüttgüter von 1,0 m-% als auch für Sackware von 0,5 m-% (siehe Abbildung 61).

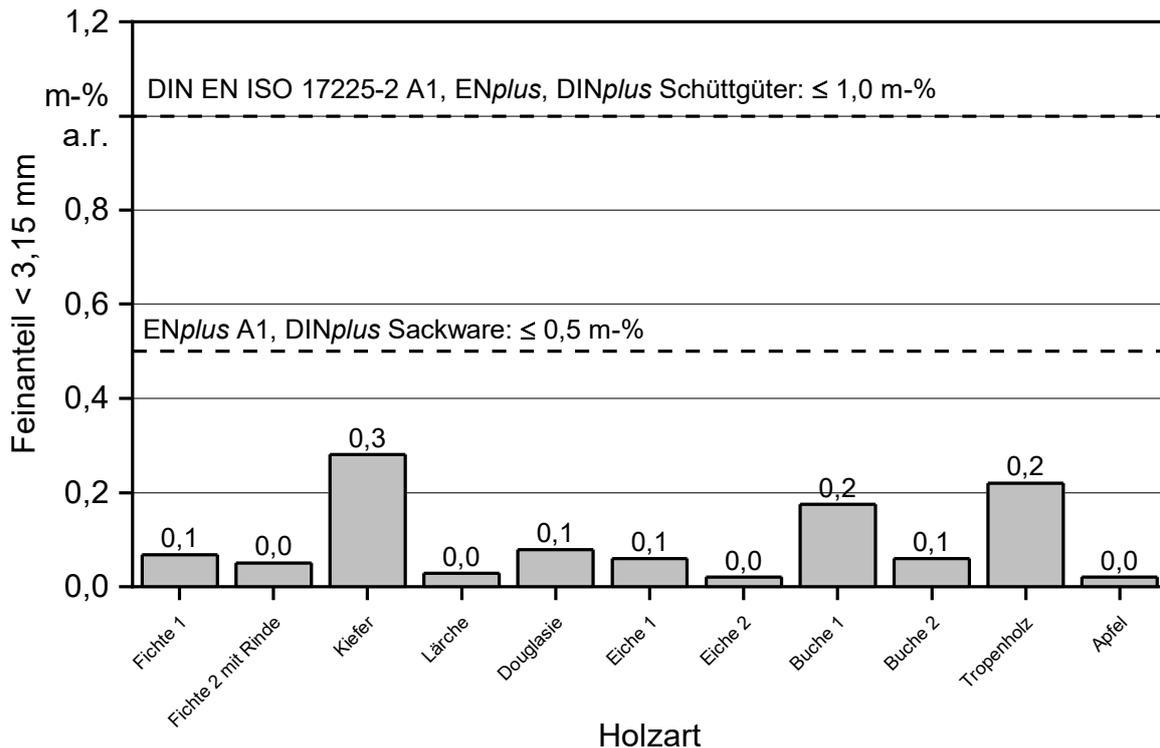


Abbildung 74: Feinanteil der Pellets der verschiedenen Holzarten

Schüttdichte und Partikeldichte. Die Schüttdichten der Pellets aus den untersuchten Holzarten (siehe Abbildung 75) liegen bei den verwendeten Nadelhölzern zwischen 671 kg/m^3 (Kiefer) und 720 kg/m^3 (Fichte mit Rinde) und für die Laubhölzer zwischen 650 kg/m^3 (Tropenholz) und 691 kg/m^3 (Buche 2). Im Mittel wurden also etwas höhere Schüttdichten für die Pellets aus Nadelholz erreicht als für die Pellets aus Laubholz. Die Partikeldichte der Nadelholzpellets liegt zwischen 1.287 kg/m^3 (Kiefer) und 1.341 kg/m^3 (Douglasie) für die Laubholzpellets zwischen 1.247 kg/m^3 (Tropenholz) und 1.310 kg/m^3 (Buche). Die Partikeldichte der Laubholzpellets liegt im Vergleich zu den Nadelholzpellets ebenfalls etwas niedriger. Wie auch bei den Fichten-Brennstoffvariationen korreliert die Schüttdichte signifikant positiv mit der Partikeldichte (Tabelle 20, Pearson's $R = 0,78$), allerdings nicht ganz so deutlich. Im Gegensatz zu den Fichten-Brennstoffvariationen findet man hier jedoch keine signifikante Korrelation mit der mittleren Pelletlänge.

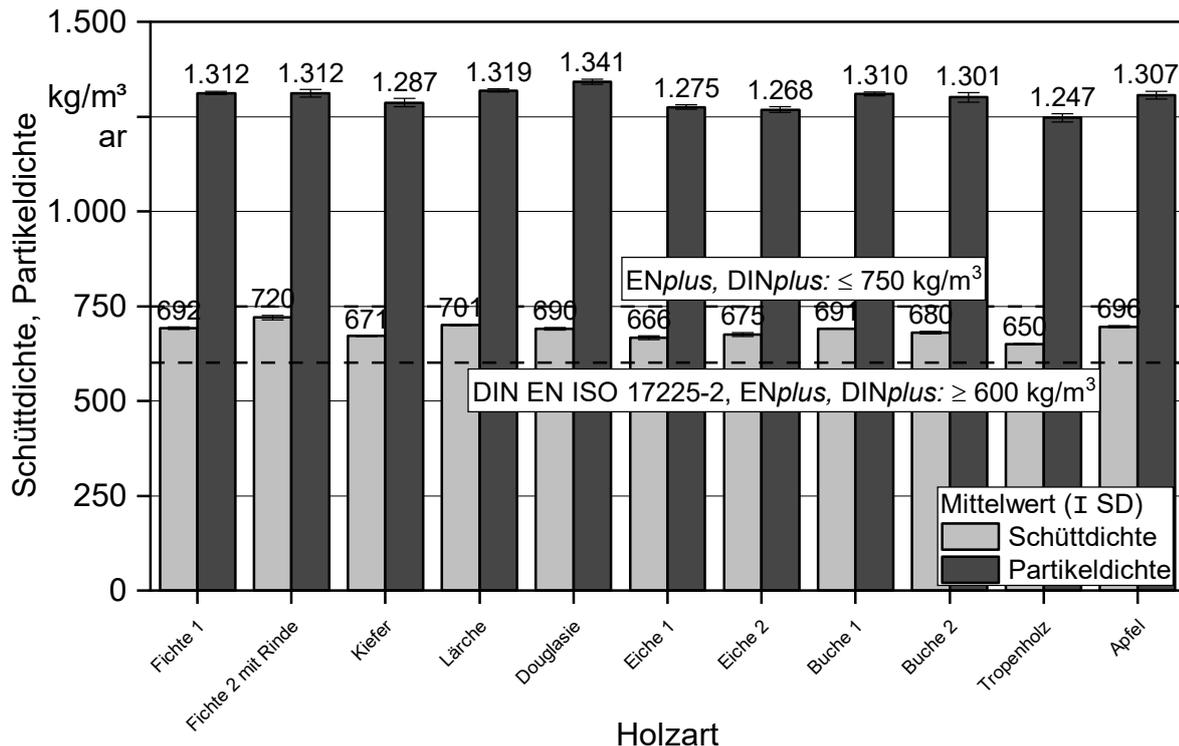


Abbildung 75: Schüttdichte ($n = 3$) sowie Partikeldichte ($n = 10$) der Pellets der verschiedenen Holzarten. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen

Pellethärte. Hinsichtlich der Pellethärte (siehe Abbildung 76) liegen die Nadelholzpellets zwischen 23 kg (Douglasie) und 66 kg (Lärche) und die Laubholzpellets zwischen 24 kg (Tropenholz) und 67 kg (Apfel). Die Lärchen- und Apfelpellets hatten eine sehr glatte und glänzende Oberfläche. Bei den marktverfügbaren Pellets war eine Pellethärte von über 60 kg nur für ein Sortiment festgestellt worden. Bei der Verwendung von Laubhölzern lassen sich etwas härtere Pellets herstellen als mit Nadelholz, was sich allerdings zwischen den einzelnen Holzarten innerhalb dieser Gruppen nochmals beträchtlich unterscheiden kann. Innerhalb der Pelletsortimente aus den untersuchten Holzarten konnte keine signifikante Korrelation mit einem anderen mechanischen Brennstoffparameter festgestellt werden (siehe Tabelle 20).

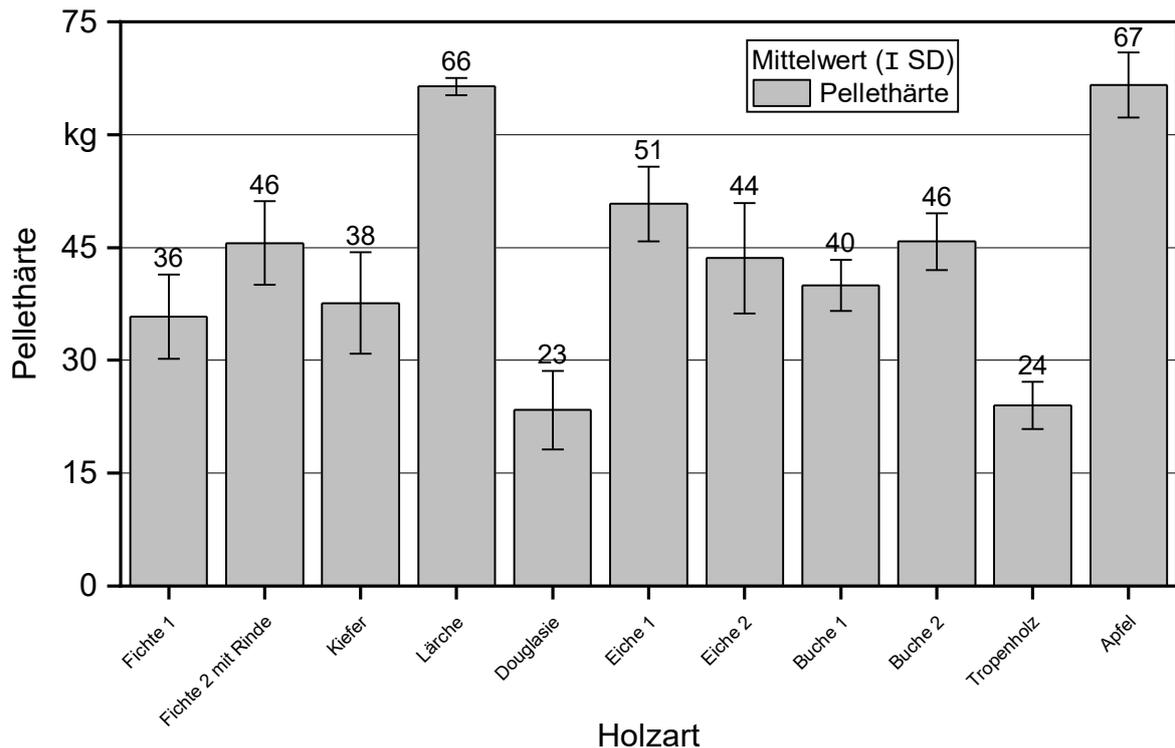


Abbildung 76: Pellethärte der Pellets der verschiedenen Holzarten (n = 5)

Zusätzlich zu den bereits genannten Korrelationen der mechanischen Parameter wurde bei den Pellets aus den untersuchten Holzarten auch ein signifikanter Zusammenhang zwischen der mittleren Pelletlänge und dem Feinanteil (Pearson's $R = -0,71$) und mit der mechanischen Festigkeit (Pearson's $R = 0,67$) festgestellt, ähnlich wie bei den marktverfügbaren Pellets (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Korrelation nach Pearson der mechanischen Parameter der Pellets der verschiedenen Holzarten

	Schüttdichte	Partikeldichte	Feinanteil	Mechanische Festigkeit	Mittlere Länge	Pellethärte
Schüttdichte	1	0,78*	-0,58	-0,23	0,05	0,42
Partikeldichte	0,78*	1	-0,35	-0,17	0,17	0,16
Feinanteil	-0,52	-0,35	1	-0,25	-0,71*	-0,56
Mechanische Festigkeit	-0,23	-0,17	-0,25	1	0,67*	0,52
Mittlere Länge	0,05	-0,17	-0,71*	0,66*	1	0,46
Pellethärte	0,42	0,16	-0,55	0,52	0,46	1

* (fett): Der p-Wert der Pearson-Korrelation liegt unter 0,05, d. h., die Steigung der Korrelation unterscheidet sich signifikant von null; Datenbasis sind Werte im Anlieferungszustand (ar).

Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials. Hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials (Abbildung 77) zeigen sich bei den Pellets aus den untersuchten Holzarten deutliche Unterschiede. So weisen die Sortimente aus Fichte mit Rinde, Kiefer, Lärche, Douglasie und Eiche deutlich höhere Anteile an groben Partikeln ($> 3,15$ – $1,4$ mm) auf. Diese Sortimente sowie Buche 2 wurden aus gehacktem Holz, das mit einer Kollermühle zerkleinert worden war, hergestellt. Damit bestätigt sich die Beobachtung bei den Fichten-Brennstoffvariationen (Abschnitt 5.2.1), dass eine Zerkleinerung mit der Kollermühle zu einem höheren Anteil an groben Partikeln führt als die Zerkleinerung mit der Hammermühle. Bei der Zerkleinerung von Buche scheinen, unabhängig von der verwendeten Zerkleinerungstechnik, eher feinere Partikel zu entstehen, was sich im Vergleich der beiden Buchensortimente untereinander zeigt, aber auch im Vergleich von Buche 2 mit den restlichen mit der Kollermühle zerkleinerten Sortimenten. Dies kann vermutlich mit der kürzeren Faserstruktur von Buche erklärt werden. Der Unterschied der Zerkleinerungstechnik wird auch im Vergleich Fichte 1 (Hammermühle) mit Fichte mit Rinde (Kollermühle) deutlich. Douglasie unterscheidet sich leicht von den restlichen Nadelhölzern, die mit der Kollermühle zerkleinert wurden. Hier liegt der Anteil an Partikeln der Fraktionen 2 – $2,8$ mm und $1,4$ – $2,0$ mm deutlich niedriger als bei Fichte mit Rinde, Kiefer und Lärche. Bei Eiche 2 wurden im Gegensatz zu Eiche 1 keine Hackschnitzel, sondern Sägespan mit der Kollermühle zerkleinert, wobei offensichtlich auch weniger grobe Partikel im Pelletaushangsmaterial entstehen als bei Hackschnitzeln.

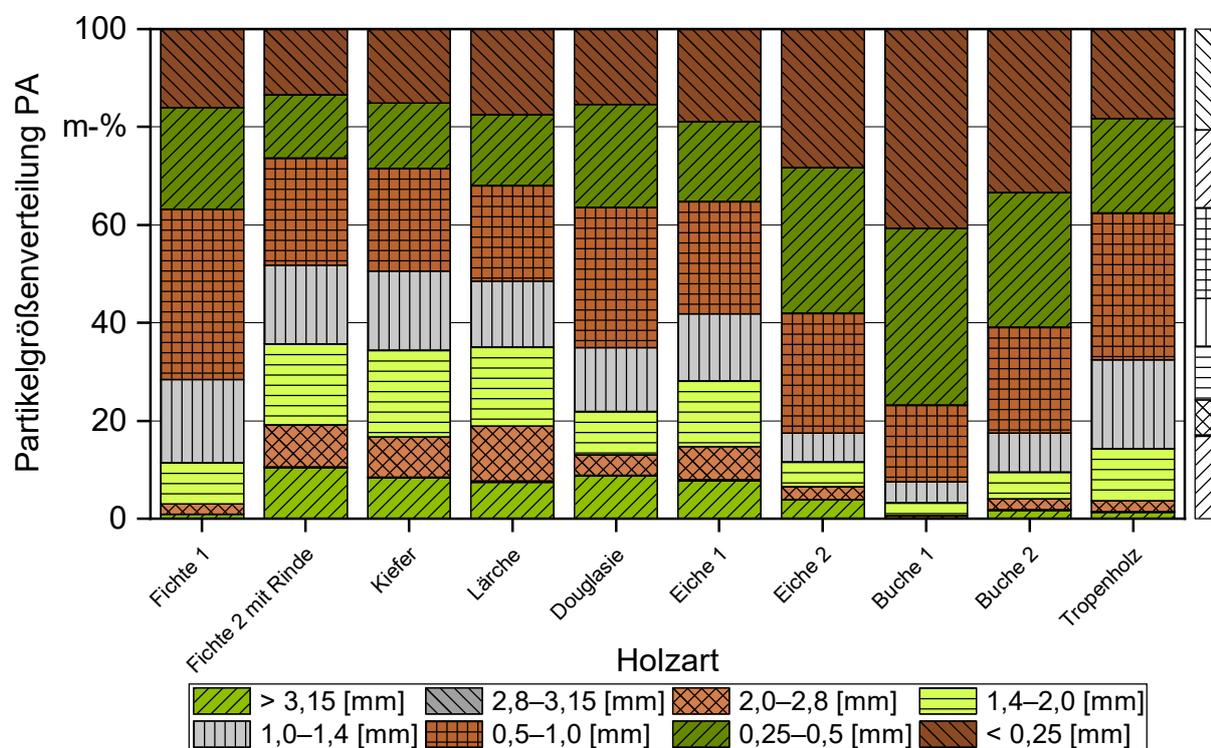


Abbildung 77: Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials der Pellets der untersuchten Holzarten

5.2.2.2 Inhaltstoffliche Brennstoffqualität

Aerosolbildner. Betrachtet man die Summe der aerosolbildenden Elemente in Abbildung 78, zeigt sich bei den Nadelholzsortimenten ein Unterschied zwischen den Fichtenpellets ohne und mit Rinde von ca. 165 mg/kg. Allerdings liegt bei den Fichtenpellets mit Rinde der Aschegehalt auch oberhalb des Grenzwerts von 0,7 m-%. Vergleicht man die restlichen Nadelholzsortimente mit niedrigem bis keinem Rindenanteil, so liegen die Gehalte aerosolbildender Elemente zwischen 438 mg/kg (Douglasie) und 578 mg/kg (Fichte ohne Rinde) vor. Dieser Bereich wurde auch für den überwiegenden Teil der marktverfügbaren Pellets (Abschnitt 5.1.2) nachgewiesen. Bei den Laubholzsortimenten wird der höchste Gehalt aerosolbildender Elemente für die Apfelholzpellets mit 4323 mg/kg bestimmt, die einen Aschegehalt von 2,39 m-% hatten. Die restlichen Laubholzsortimente erfüllen den Aschegehaltsgrenzwert und die Gehalte aerosolbildender Elemente liegen zwischen 630 mg/kg (Eiche 1) und 1.493 mg/kg (Buche 2). Damit liegen z. B. bei Buche 1 ca. dreimal und bei Eiche 2 ca. doppelt so hohe Gehalte an Aerosolbildnern vor wie bei den Nadelhölzern ohne Rinde. Daher ist bei Laubhölzern mit höheren Staubemissionen zu rechnen als bei den Nadelholzsortimenten, dies gilt vor allem für die Sortimente Buche und Apfel. Auch zwischen den Sortimenten Eiche 1 (630 mg/kg) und Eiche 2 (847 mg/kg) bzw. Buche 1 (1.137 mg/kg) und Buche 2 (1.493 mg/kg) liegen Unterschiede von 217–356 mg/kg innerhalb der gleichen Holzart. Diese Unterschiede können durch den Standort des Baums sowie den vorliegenden Rindenanteil oder eventuelle Verunreinigungen des Ausgangsmaterials verursacht sein. Kiefer, Douglasie, Eiche 1, Buche 2, Tropenholzgemisch und Apfelbaum weisen messbare Natriumgehalte auf, diese liegen in einem ähnlichen Wertebereich wie bei den marktverfügbaren Holzpellets. Da die Rohstoffe ohne Presshilfsmittelbeimischung bereitgestellt wurden, können auch Verunreinigungen oder Beimengung von beispielsweise Spanplattenresten als Quelle für Natrium ausgeschlossen werden.

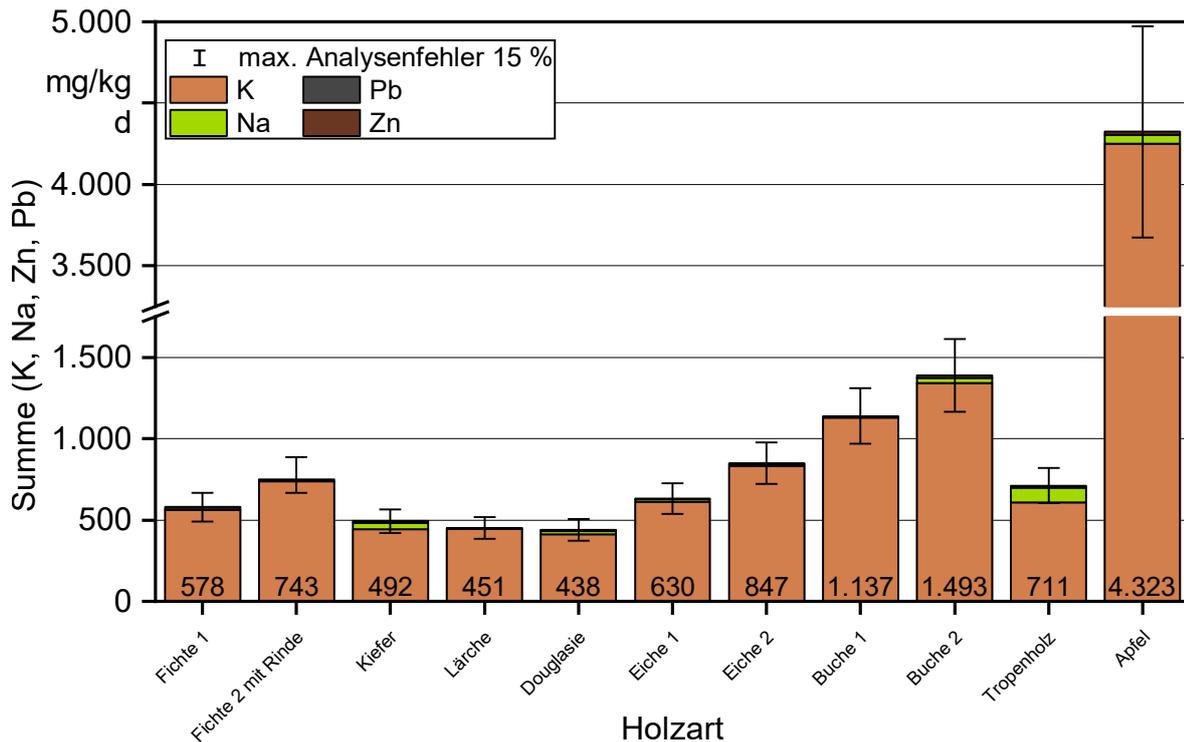


Abbildung 78: Summe der aerosolbildenden Elemente der Pellets aus den untersuchten Holzarten, bezogen auf die Trockenmasse

Brennstoffindizes. Tabelle 21 zeigt die aus den Elementanalysen berechneten Brennstoffindizes. Im Vergleich zu den Nadelhölzern zeigen Eiche, Tropenholzgemisch und Apfelholz etwas höhere Stickstoffgehalte, was zu etwas höheren NO_x -Emissionen führen kann. Stickstoffgehalte bis 0,21 m-% wurden auch bei den marktverfügbaren Holzpellets festgestellt. Kiefer und Douglasie weisen ein deutlich höheres Si/K-Verhältnis von über 2,0 auf als die restlichen Sortimenten. Hier kann von einer erhöhten Einbindung von Kalium in die Asche und damit von weniger Freisetzung von Kalium in die Gasphase ausgegangen werden. Bei Kiefer und Douglasie ist auch das Cl/Si-Verhältnis sehr niedrig. Dies gilt nicht für Apfelholz, da hier sehr viel Kalium im Brennstoff ist (kaliumhaltiger Dünger), aber gleichzeitig wenig Chlor. So scheint hier das Cl/Si-Verhältnis mit 0,03 wahrscheinlich nicht geeignet, um eine Vorhersage zur Kaliumfreisetzung zu treffen. Das K/Na-Verhältnis ist sehr niedrig für Kiefer, Douglasie und Tropenholz, während K/Na-Verhältnisse von bis zu 66,4 für Buche 1 nachgewiesen wurden. Hohe K/Na-Verhältnisse sollen nach WARMING-JESPERSEN ET AL. zu erhöhten CO- und Gesamtstaubemissionen führen [94].

Tabelle 21: Brennstoffindizes der Pellets aus den untersuchten Holzarten, bezogen auf die Trockenmasse

Probenbezeichnung	N	Σ (K, Na, Pb, Zn)	Si/K ¹	Cl/Si ¹	(Si + P + K)/ (Ca + Mg + Al) ¹	K/Na ¹
	m-%	mg/kg	mol/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol
Fichte 1	0,10	578	0,29	0,34	0,73	33,0
Fiche mit Rinde	0,12	743	1,05	0,13	0,54	32,6
Kiefer	0,08	492	2,61	0,05	1,33	6,8
Lärche	< 0,05	451	0,51	0,24	0,60	26,3
Douglasie	0,09	438	2,05	0,07	1,71	11,0
Eiche 1	0,14	630	0,23	0,40	1,22	22,5
Eiche 2	0,15	847	0,47	0,14	1,64	40,8
Buche 1	0,10	1.137	0,19	0,26	0,78	66,4
Buche 2	0,11	1.494	0,50	0,15	1,48	26,0
Tropenholz	0,17	711	0,92	0,16	0,57	3,8
Apfel	0,19	4.323	0,51	0,03	0,75	44,6

¹ Bei der Berechnung der Brennstoffindizes und der Kaolinmenge wurde bei Sortimenten mit Elementgehalten unter der Bestimmungsgrenze (siehe Abschnitt 4.3.1, Tabelle 13) der Wert der Bestimmungsgrenze entsprechend angenommen. Die zur Berechnung der Indizes verwendeten Elementgehalte finden sich im Anhang 2, Tabelle 84 und Tabelle 85.

5.3 Ergebnisse der TGA-Analysen

Alle marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimente, die im Projekt untersucht wurden, sowie ausgewählte Chargen der eigens produzierten Versuchspellets, in Summe 38 Proben, wurden mittels thermogravimetrischer Analysen (TGA) entsprechend der in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Methodik untersucht. In Abbildung 79 sind die DTG-Kurven der untersuchten Pelletsortimente im Vergleich dargestellt.

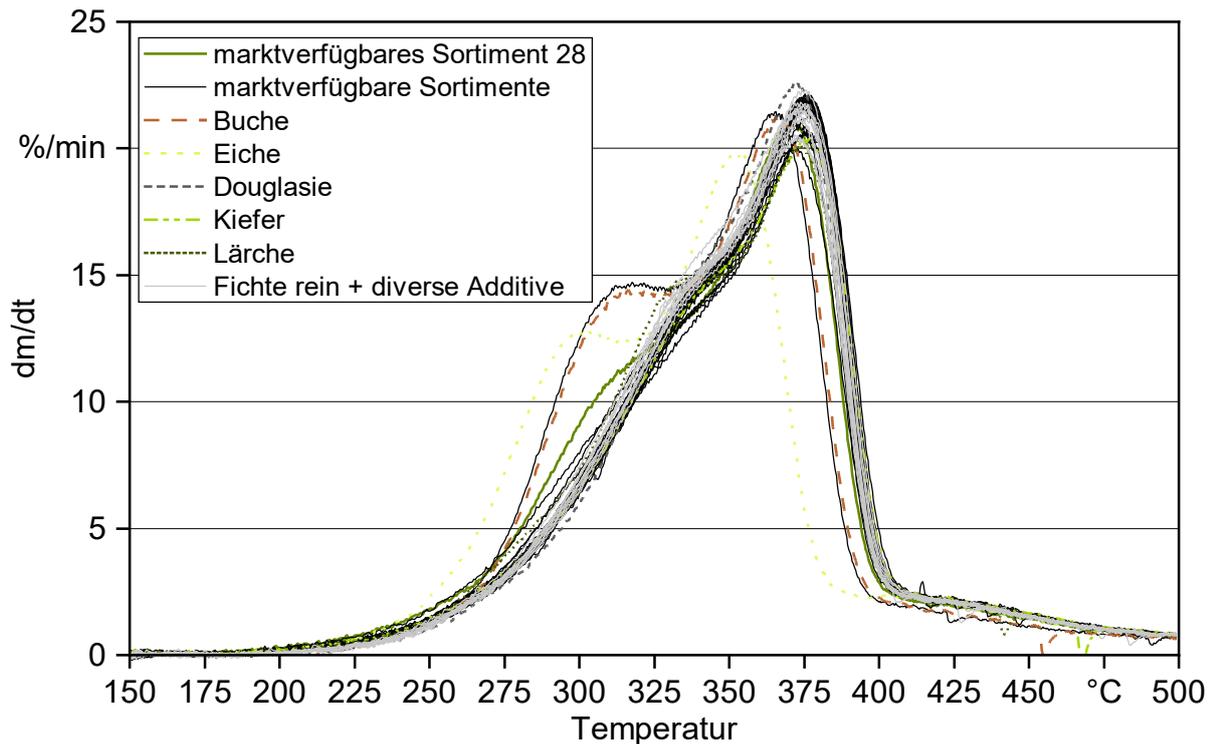


Abbildung 79: DTG-Kurven untersuchter Pelletsortimente

Die Kategorie „marktverfügbare Sortimente“ beinhaltet alle im Zuge des Pelletscreenings untersuchten Pelletsortimente mit Ausnahme des Sortiments 28 (siehe Tabelle 3), das aufgrund seiner von den anderen Sortimenten abweichenden thermischen Zersetzungscharakteristik getrennt dargestellt ist. Die Kategorie „Fichte rein + diverse Additive“ beinhaltet Proben von Fichtenpellets mit unterschiedlichen Additivierungen. Des Weiteren sind Versuchspellets aus unterschiedlichen Holzarten getrennt angeführt.

Mit Ausnahme des marktverfügbaren Sortiments 28 folgen alle anderen marktverfügbaren Sortimente dem für Nadelholz (also auch Fichte) typischen Verlauf mit einer schwach ausgeprägten Schulter im Bereich der Hemicellulose-Zersetzung. Aus dem Verlauf der gelben Linien lässt sich auch schließen, dass Additive keinen wesentlichen Einfluss auf das thermische Zersetzungsverhalten der Pellets haben, da keine dieser Linien signifikant vom allgemeinen Trend abweicht. Pellets aus Kiefer und Douglasie ordnen sich auch in diesen Trend ein. Lärchenpellets zeigen eine etwas deutlicher ausgeprägte Schulter und Pellets aus Laubholz (Eiche, Buche) eine stark ausgeprägte Schulter. Entsprechend der NIR-Analysen weist das Sortiment 28 mit 45 % den höchsten Laubholzanteil aller marktüblichen Sortimente auf (siehe Abbildung 44), was die im Vergleich zu den klar nadelholzdominierten Sortimenten stärker ausgeprägte Schulter im Bereich der Hemicellulose-Zersetzung erklärt.

Die DTG-Verläufe spiegeln sich in den charakteristischen Temperaturen des Zersetzungsprozesses wider (siehe Tabelle 22). Sie zeigen für alle charakteristischen Temperaturen für Eiche und Buche, also Laubholz, etwa 10 bis 20 °C niedrigere Werte. So liegt T_{Onset} für Pellets aus vorwiegend Nadelholz bei 272 °C (Sortimente aus dem Pelletscreening) bzw.

275 °C (Fichte rein + diverse Additive) während die beiden Laubhölzer Buche und Eiche Werte um 265 °C bzw. 253 °C zeigen. Kiefer (275 °C), Lärche (277 °C) und Douglasie (283 °C) ordnen sich bei den Nadelholzsortimenten bzw. etwas darüber (Douglasie) ein. Dieser Trend setzt sich bei T_{Schulter} (301 bis 314 °C bei den Laubhölzern im Vergleich zu Temperaturen über 330 °C), T_{Peak} (ca. 353 °C bzw. 267 °C im Vergleich zu mehr als 374 °C) und T_{Offset} (ca. 381 °C bzw. 393 °C im Vergleich zu mehr als 400 °C) fort. Mit Ausnahme von Pellets aus ausschließlich Laubholz wird die vollständige Freisetzung der flüchtigen Komponenten in einem engen Temperaturfenster von 400 bis 403 °C erreicht. Insgesamt liegen die charakteristischen Temperaturen der Proben aus dem Pelletscreening erwartungsgemäß tendenziell nahe denen der untersuchten Nadelhölzer.

Tabelle 22: Zusammenstellung der aus den DTG-Verläufen ermittelten charakteristischen Temperaturen (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung)

		Pelletscreening		Buche	Eiche	Douglasie	Kiefer	Lärche	Fichte rein + div. Additive	
		MW	SD						MW	SD
T Onset	[°C]	271,8	6,1	265,6	253,2	283,2	274,8	276,5	275,2	2,5
T Schulter	[°C]	330,7	5,1	313,9	300,8	329,3	332,2	329,2	332,0	3,1
T Peak	[°C]	374,7	2,1	366,7	352,6	373,6	376,6	373,5	374,2	1,3
T Offset	[°C]	400,8	1,7	393,4	381,0	399,7	403,1	399,6	400,8	0,7

Der Holzkohlegehalt (aschefrei) variierte zwischen 25,7 (Buche) und 30,3 m-% (Eiche) und ist unabhängig von der Holzart (Laubholz, Nadelholz) und unabhängig von der Zugabe unterschiedlicher Bindemittel oder anorganischer Zusatzstoffe (Kaolin) (siehe Tabelle 23).

Es wurden jedoch deutliche Unterschiede bei den Gehalten an Hemicellulose und Cellulose der Gruppen Laubholzpellets (Buche, Eiche) und Nadelholzpellets (Kiefer, Lärche, Fichte) festgestellt. Da diese Daten anhand der Auswertung der TGA-Kurven erstellt werden und speziell für die untersuchten Fichtensortimente sehr einheitliche Trends zeigen, streuen die resultierenden Daten zu den Gehalten der Pseudokomponenten in dieser Gruppe auch nur geringfügig. Laubholz (Buche und Eiche) enthält laut den durchgeführten Auswertungen mit im Durchschnitt ca. 30 bis 35 m-% geringfügig mehr Cellulose als Nadelholz (30–31 m-%), aber weniger Hemicellulose (24–27 m-% im Vergleich zu mehr als 30 m-% bei den reinen Nadelholzsortimenten). Die Lignin-Gehalte liegen für Laubholz mit 12 bis 16 m-% ebenfalls über den Werten für Kiefer, Lärche und Fichte. Douglasie zeigt, obwohl diese Baumart eher den Nadelhölzern zugeordnet wird, die niedrigsten Gehalte an Hemicellulose, aber die höchsten an Cellulose und Lignin. Die Proben aus dem Pelletscreening zeigen erwartungsgemäß mit den Nadelhölzern gut vergleichbare Pseudokomponentengehalte. Es muss dazu allerdings angemerkt werden, dass signifikante Unterschiede zwischen den aus den TGA-Daten abgeleiteten Gehalten der einzelnen Pseudokomponenten und Datenbankwerten von BIOS, insbesondere für Nadelholz-Sortimente auftraten. Gleiches gilt für den Vergleich mit Literaturdaten zu nasschemischen Biomasseanalysen [90]. Da aus Ringversuchen [11] bekannt ist, dass die Ergebnisse von TGA-Ver-

suchen auch vom eingesetzten Gerät abhängen, dürfen lediglich die Trends direkt mit denen aus anderen Studien verglichen werden. Von einem direkten Vergleich der absoluten Werte mit denen aus anderen Studien ist eher abzuraten.

Tabelle 23: Aus den DTG-Verläufen abgeleitete Gehalte an flüchtigen Komponenten, Holzkohle, Hemicellulose, Cellulose und Lignin (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung)

		Pellet-screening		Buche	Eiche	Douglasie	Kiefer	Lärche	Fichte rein + div. Additive	
		MW	SD						MW	SD
Flüchtige	[m-% TS af]	76,1	2,7	74,3	69,7	77,1	72,7	73,4	73,2	0,6
Holzkohle	[m-% TS af]	23,9	2,7	25,7	30,3	22,9	27,3	26,6	26,8	0,6
Hemicellulose	[m-% TS af]	24,2	4,9	26,8	23,8	19,2	30,6	33,2	30,9	3,0
Cellulose	[m-% TS af]	30,3	2,5	35,3	30,4	35,3	30,1	29,1	31,0	2,9
Lignin	[m-% TS af]	21,6	8,6	12,2	15,5	22,7	12,0	11,1	11,3	1,2

In Bezug auf die Aktivierungsenergie und den präexponentiellen Faktor (siehe Tabelle 24) konnten auch signifikante Unterschiede zwischen Laubholz und Nadelholz festgestellt werden. So liegt die Aktivierungsenergie für Hemicellulose bei den Laubhölzern Buche und Eiche mit 120 bzw. 117 kJ/mol deutlich über dem Wert für die reinen Nadelhölzer Kiefer, Lärche und Fichte (ca. 105 bis 106 kJ/mol). Bezüglich Cellulose liegt die Aktivierungsenergie bei den untersuchten Laubhölzern mit durchschnittlich 203 kJ/mol wiederum unter derjenigen der Nadelholzsortimente (ca. 230 kJ/mol). Auch bei Lignin liegt die Aktivierungsenergie bei den untersuchten Laubhölzern mit durchschnittlich 113 kJ/mol unter derjenigen von Nadelholz (ca. 126 kJ/mol). Auffallend ist hier, dass die Aktivierungsenergie für Hemicellulose und Cellulose der Proben aus dem Pelletscreening tendenziell gut mit denen der Nadelholzsortimente übereinstimmen, bei Lignin aber deutlich geringere Werte und eine signifikant höhere Standardabweichung auftreten. Des Weiteren ist auch bezüglich dieser Parameter Douglasie nicht eindeutig einer der beiden Hauptgruppen zuzuordnen. Der Präexponentialfaktor ist bei Hemicellulose für Laubholz höher als für Nadelholz (21 s^{-1} im Vergleich zu 17 s^{-1}) und bei Cellulose für Laubholz niedriger als für Nadelholz (ca. 35 s^{-1} im Vergleich zu ca. 40 s^{-1}). Bei Lignin ist kein eindeutiger Trend erkennbar (Werte zwischen 5 und 25 s^{-1}). Auch bezüglich dieser Parameter lassen sich Proben aus dem Pelletscreening wieder der Gruppe der Nadelhölzer zuordnen, während Douglasie tendenziell näher an den Laubhölzern liegt.

Tabelle 24: Aus den DTG-Verläufen abgeleitete kinetische Parameter für die Zersetzung von Hemicellulose, Cellulose und Lignin (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung)

		Pelletscreening		Buche	Eiche	Douglasie	Kiefer	Lärche	Fichte rein + div. Additive	
		MW	SD						MW	SD
Aktivierungsenergie										
Hemicellulose	[kJ/mol]	112,9	11,6	120,3	117,1	127,8	104,5	105,5	106,0	3,7
Cellulose	[kJ/mol]	232,2	14,0	201,9	204,1	210,0	227,6	237,0	229,5	15,9
Lignin	[kJ/mol]	90,5	28,9	112,9	116,6	76,1	131,6	154,5	130,8	28,1
Präexponentieller Faktor										
Hemicellulose	[s ⁻¹]	18,3	2,3	20,7	20,6	21,5	16,5	16,9	16,9	0,9
Cellulose	[s ⁻¹]	39,4	2,5	34,2	35,6	35,3	38,4	40,3	38,9	2,9
Lignin	[s ⁻¹]	11,7	4,8	15,8	16,8	9,0	18,4	22,5	18,2	5,1

Die Ergebnisse für Hemicellulose und Cellulose stimmen akzeptabel mit den BIOS-Datenbankwerten überein. Insbesondere bei Laubholzproben wurden aber signifikante Unterschiede zu den BIOS-Datenbankwerten für Lignin festgestellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass TGA-Messungen sehr hilfreich sind, um Nadelhölzer und Laubhölzer zu unterscheiden und bezüglich ihres thermischen Zeretzungsverhaltens zu charakterisieren. Die TGA-Daten geben aber nicht die gesamten Gehalte an Hemicellulose, Cellulose und Lignin wieder, da der bei der thermischen Umwandlung sich bildende Verkokungsanteil (Umwandlung in Holzkohle) nicht individuell den einzelnen Pseudokomponenten zugeordnet werden kann. Die Daten aus der TGA-Analyse können somit nicht mit Daten aus nasschemischen Bestimmungen von Hemicellulose, Cellulose und Lignin verglichen werden. Die aus den TGA-Daten abgeleiteten kinetischen Parameter hingegen bilden einen wichtigen Bestandteil für die Modellierung der Biomassezersetzung und finden im Schüttungsmodell (siehe Berichtsteil II) Berücksichtigung.

6 Ergebnisse der fördermechanischen Versuche am kalten Pelletofen

Für die Förderversuche wurden die Sortimente 16, 23 und 28 der marktverfügbaren Pellets ausgewählt, da diese die Bandbreite der mechanischen Festigkeiten und Feinanteile gut abdecken. Aufgrund der Schneckenförderung ist mit einem Brechen der Pellets und somit einer verringerten Pelletlänge, einem erhöhten Feinanteil, aber auch einer Veränderung der Schüttdichte zu rechnen.

Pelletlänge. Die Veränderung der Längenverteilungen durch die Förderversuche wurden mittels Bildanalysesystem (Haver CPA 4 Conveyor) bestimmt. Bei der Auswertung wurden zunächst alle Fehlmessungen, durch die Siebung nicht vollständig abgetrennter Feinanteil sowie Pellet-Bruch aus den Wertepaaren eliminiert. Dafür wurden zu Beginn alle Partikel mit Länge und minimalem Feret-Durchmesser $< 3,15$ mm entfernt. Im Anschluss wurden alle Wertepaare eliminiert, die keinen realistischen Durchmesser aufwiesen. Für alle sechs Proben ist zu beobachten, dass die Länge der Pellets nach dem Förderversuch geringer ist (siehe Tabelle 25). Die größte Veränderung der durchschnittlichen Länge um $-22,7$ % ist für den Versuchsbrennstoff Fichte lang (die längsten Pellets in dieser Untersuchung) erreicht, am geringsten war die Abnahme für Sortiment 23 (die kürzesten Pellets in dieser Untersuchung) mit $-1,7$ %.

Für alle getesteten Sortimente ist eine Zunahme der Pelletanzahl in der Prüfmenge durch die Förderung in der kalten Feuerung zu beobachten. Die maximale Zunahme ist mit $33,9$ % für Fichte lang und die minimale Zunahme mit $2,3$ % für Sortiment 28 zu beobachten.

Tabelle 25: Veränderungen der mittleren Pelletlänge und der Pelletanzahl durch Förderversuche im kalten Pelletofen 2

Brennstoff	Länge vor Förderung	Länge nach Förderung	Veränderung	Anzahl vor Förderung	Anzahl nach Förderung	Veränderung
-	mm	mm	%	-	-	%
16	17,1	14,7	-14,1	8.560	10.601	+23,8
23	9,2	9,1	-1,7	16.913	17.311	+2,4
28	10,7	10,5	-2,1	16.599	16.976	+2,3
Fichte lang	21,5	16,6	-22,7	5.671	7.596	+33,9
Fichte mittel	18,0	15,4	-14,3	7.329	8.831	+20,5
Fichte kurz	12,9	12,0	-6,9	11.794	13.072	+10,8

Wie in Abbildung 80 dargestellt ist, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Länge der Pellets vor dem Förderversuch und der Veränderung der Pelletlänge durch das Fördern ($R^2 = 0,98$) sowie der Änderung der Anzahl der Pellets ($R^2 = 0,97$). Dies deckt sich mit den Beobachtungen beim Feinanteil.

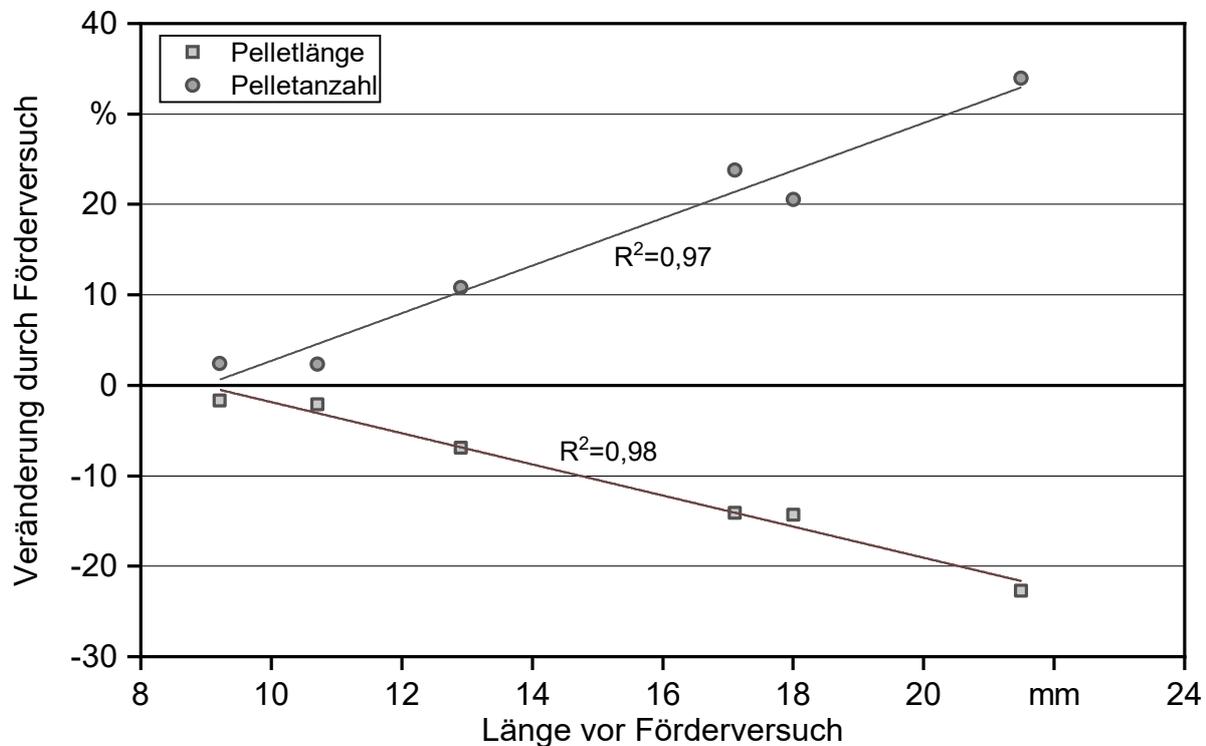


Abbildung 80: Abhängigkeit der Veränderung der Pelletlänge und der Pelletanzahl durch die Förderversuche im kalten Pelletofen 2 von der durchschnittlichen Pelletlänge der Proben vor dem Förderversuch

Schüttdichte. Um einen Einfluss geringfügiger Wassergehaltsänderung der Schüttdichtebestimmungen vor und nach den Förderversuchen auszuschließen, werden die Ergebnisse auf wasserfreier Basis verglichen (Abbildung 81).

Die höchste Zunahme der Schüttdichte ist für das Sortiment 23 mit 4,0 % im Vergleich zum Ausgangswert zu verzeichnen, gefolgt von Sortiment 28. Bei diesen Sortimenten liegt die mechanische Festigkeit unter 98 m-%. Sortiment 16 zeigt als einzige Probe eine gleichbleibende Schüttdichte bei einer mechanischen Festigkeit von 99,0 m-%. Für die Fichtenpellets mit abgestuften Längerverteilungen zeigt sich eine Abhängigkeit der Schüttdichteänderung von der Pelletlänge. Längere Pellets führen zu einer größeren Zunahme der Schüttdichte als kurze Pellets, bezogen auf den Ausgangswert. Die Abnahme bei den kurzen Pellets liegt im Rahmen der Messungenauigkeit der Schüttdichtebestimmung.

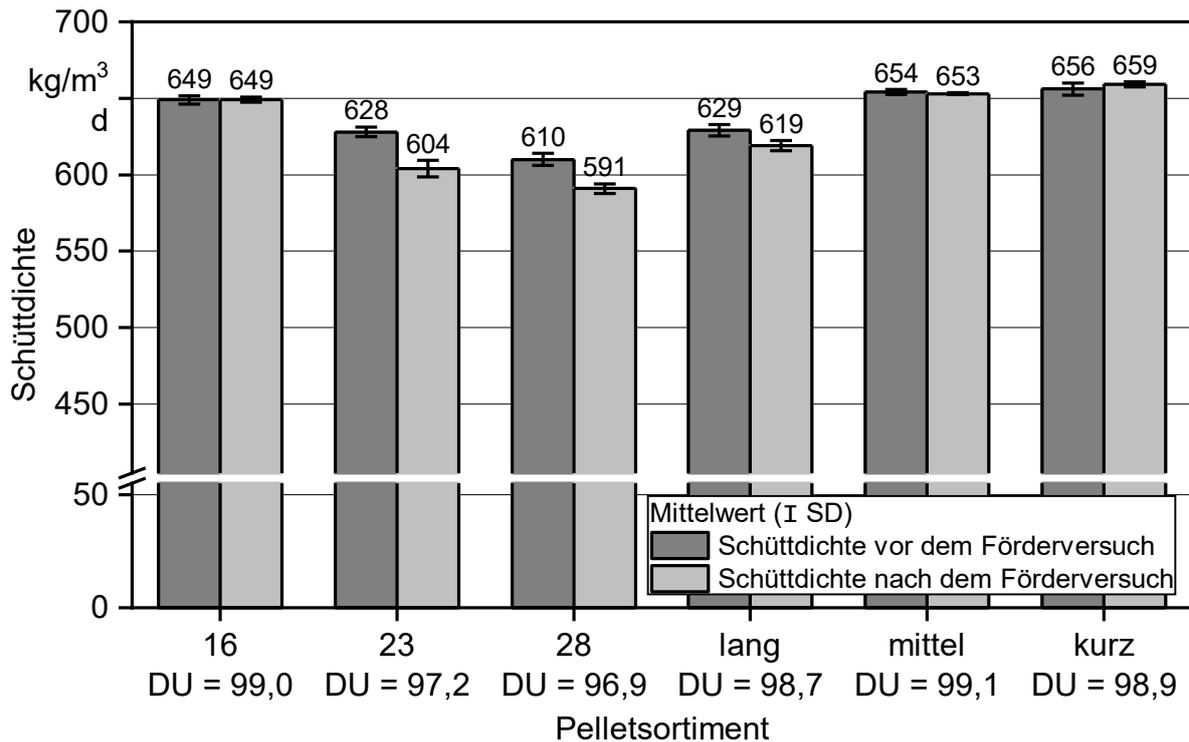


Abbildung 81: Vergleich der Schüttdichte vor und nach dem Förderversuch im kalten Pelletofen 2

Feinanteil. Der Feinanteil wurde vor dem Förderversuch bestimmt und abgetrennt, um im Folgenden auch den durch die Förderung neu entstandenen Feinanteil gesondert betrachten zu können. Der minimale Feinanteil vor dem Förderversuch beträgt 0,04 m-% für Sortiment 16, während der maximale Feinanteil bei Sortiment 28 schon 0,99 m-% beträgt (Abbildung 82).

Für fünf der verwendeten Sortimente war nach der Förderung ein deutlich höherer Feinanteil im Vergleich zum Ausgangswert zu verzeichnen. Eine Ausnahme stellt dabei das Sortiment 28 dar, bei dem der Feinanteil vorher um 0,01 m-% höher ist als der neu entstandene Feinanteil. Der nur durch die Förderung entstandene Feinanteil liegt zwischen 0,86 m-% (Sortiment 23) und 1,29 m-% (Fichte lang). Somit steigt der gesamte Feinanteil der Pellets, der im Brennerraum tatsächlich ankommt, auf 1,04 m-% (Sortiment 16) bis 1,95 m-% (Sortiment 28) an.

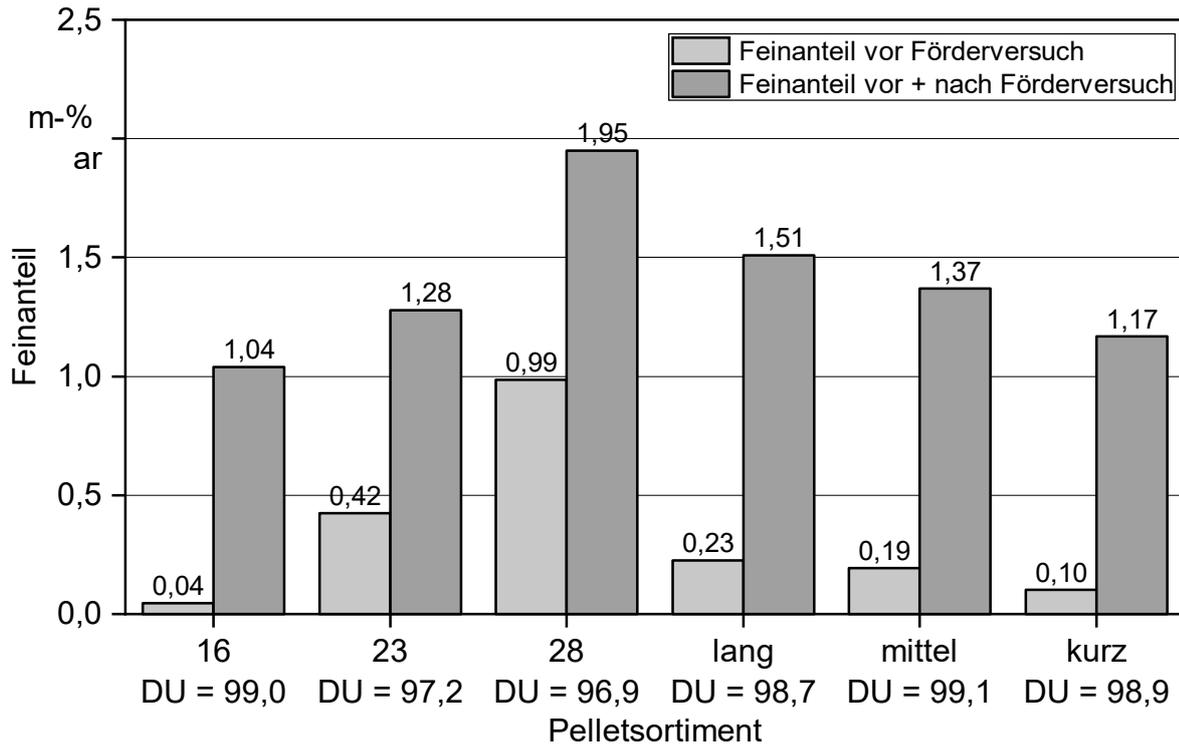


Abbildung 82: Vergleich des Feinanteils vor und nach dem Förderversuch und deren Summe

Der durch die Förderung in der Schnecke zusätzlich entstandene Feinanteil ist dabei signifikant abhängig von der Pelletlänge ($R^2 = 0,61$) (siehe Abbildung 83) und der mechanischen Festigkeit der verwendeten Pellets ($R^2 = 0,43$) (siehe Abbildung 84).

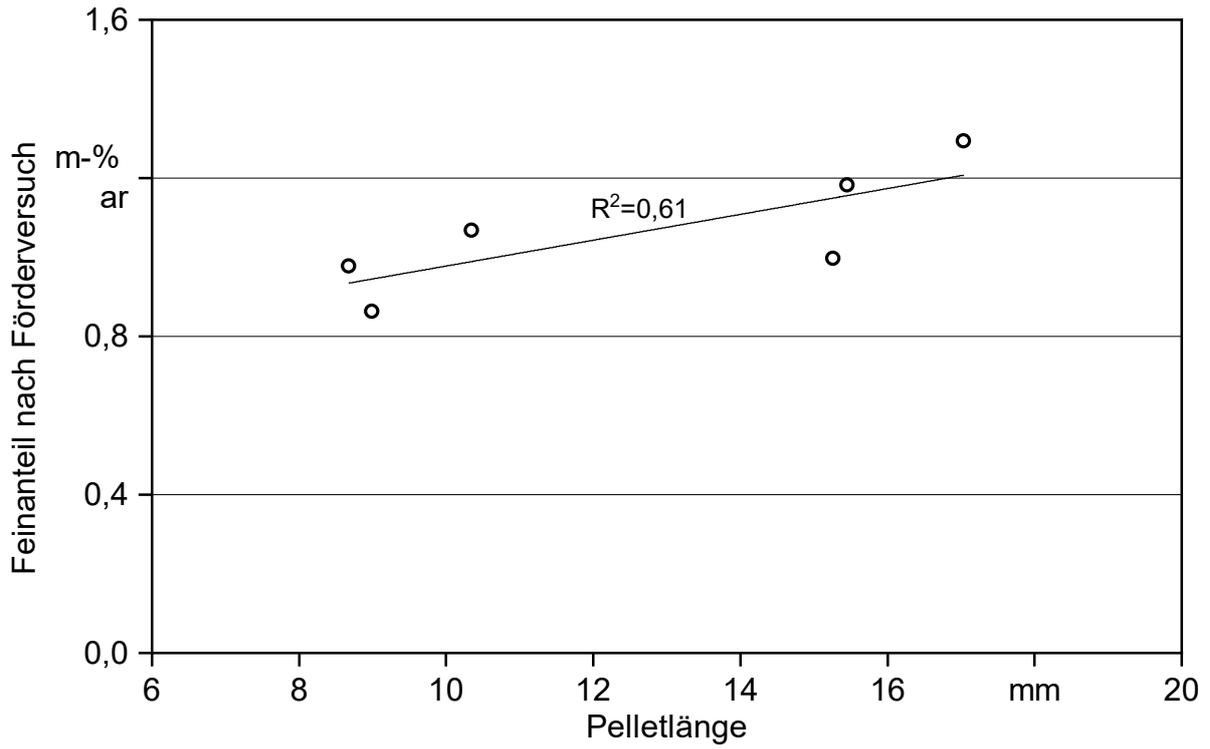


Abbildung 83: Abhängigkeit des Feinanteils nach der Förderung im kalten Pelletofen 2 von der mittleren Pelletlänge

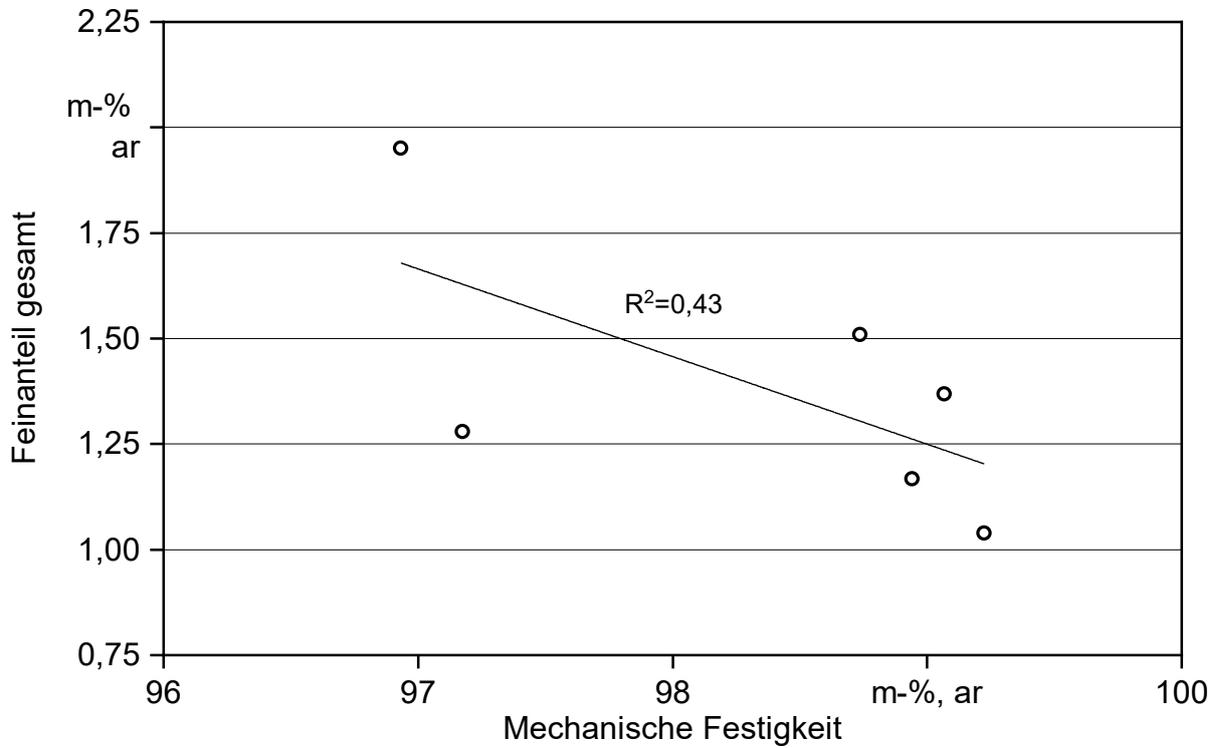


Abbildung 84: Abhängigkeit des gesamten Feinanteils (vor und nach Förderung) von der mechanischen Festigkeit

Fazit. Durch die mechanische Beanspruchung während der Förderung mittels Schnecke werden die Pellets gebrochen und die Pelletanzahl steigt. Die Schüttdichte nimmt meist zu, ebenso steigt der Feinanteil auf über 1 m-% an. Die Pellets werden aufgrund der Reibung zwischen Schnecke und Schneckengehäuse zerkleinert und es entsteht Feinanteil. Durch den erhöhten Feinanteil ist insofern eine dichtere Schüttung im Probenbehälter möglich, als nun auch kleine, luftgefüllte Hohlräume mit dem Feinanteil gefüllt werden. Der Grad der Zerkleinerung ist neben der Schneckenausführung selbst im Wesentlichen von der Pelletlänge und der mechanischen Festigkeit der Pellets abhängig.

Zusätzlich wurde während der Feuerungsversuche beobachtet, dass der Pelletabwurf in den Brennertopf sehr unregelmäßig und dadurch „schwallweise“ erfolgt, da die Förderschnecke meist nach einer vollen Umdrehung mehrere Pellets auf einmal abwirft. Dies führt immer wieder zu Störungen im Glutbett und teilweise zu lokalem Sauerstoffmangel, wodurch es zu Emissionsspitzen an CO und organischen Kohlenwasserstoffen kommen kann. Damit bietet die Schnecke bei Abwurff Feuerungen, wie sie bei den meisten Pelletöfen vorhanden ist, ein erhebliches Optimierungspotenzial bei der Entwicklung neuer Pellet-Einzelraumfeuerungen.

7 Ergebnisse der Feuerungsversuche

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Feuerungsversuche beschrieben. Dabei wird, wie auch bei den Brennstoffeigenschaften, zwischen marktverfügbaren zertifizierten Holzpellets (Unterkapitel 7.1) und Versuchspellets mit definierten Eigenschaften (Unterkapitel 7.2) unterschieden.

7.1 Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)

Von den in Unterkapitel 5.1 beschriebenen marktverfügbaren Holzpellets wurden 23 der insgesamt 28 Sortimente in Pelletofen 1 und alle 28 Sortimente in Pelletofen 2 hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens untersucht. Nach Auswertung der Verbrennungsversuche wurden acht Sortimente ausgewählt und in Pelletkessel 1 sowie zwei Sortimente in Pelletkessel 2 untersucht.

Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten getrennt hinsichtlich der gasförmigen Emissionen (7.1.1), Gesamtstaubemissionen (Abschnitt 7.1.2) sowie der Zusammensetzung der partikelförmigen Emissionen (Abschnitt 7.1.3) diskutiert. Bei direkten Vergleichen zwischen den Feuerungen werden bei Pelletofen 1 alle fünf Einzelmessungen und bei Pelletofen 2 immer die Mittelwerte aus vier Einzelmessungen verwendet und die fünfte Messung während der automatischen Brennerreinigung (Abschnitt 4.4.1) wird nicht berücksichtigt, da es während der Abreinigung zu Störungen im Glutbett und somit zu leicht erhöhten Emissionen kommt.

Tabelle 26 fasst die Mittelwerte der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter für beide Pelletöfen zusammen. Diese Parameter werden vor allem für die Diskussion der Ergebnisse der Emissionsmessungen in diesem Unterkapitel herangezogen.

Tabelle 26: Mittelwerte der feuerungstechnischen Parameter für Pelletofen 1 ($n = 5$ à 15 min) und Pelletofen 2 ($n = 4$ à 14 min, ohne Reinigung)

Pellet Nr.	Pelletofen 1				Pelletofen 2			
	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda	Brennraumtemperatur °C	Druckverlust über Glutbett Pa	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda	Brennraumtemperatur °C	Druckverlust über Glutbett Pa
1	1,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1	531 ± 3,0	10 ± 0,7	1,3 ± 0,1	2,6 ± 0,1	620 ± 17,9	30 ± 0,7
2	–	–	–	–	1,5 ± 0,1	2,4 ± 0,0	641 ± 9,9	29 ± 0,5
3	–	–	–	–	1,7 ± 0,1	2,3 ± 0,0	658 ± 7,4	27 ± 0,2
4	1,7 ± 0,1	2,0 ± 0,1	581 ± 5,6	12 ± 0,4	1,7 ± 0,1	2,4 ± 0,1	667 ± 12,4	32 ± 0,5
5	1,6 ± 0,1	2,3 ± 0,1	560 ± 4,4	11 ± 0,5	1,8 ± 0,4	2,3 ± 0,0	660 ± 7,4	31 ± 0,4
6	–	–	–	–	1,6 ± 0,1	2,5 ± 0,0	624 ± 8,8	28 ± 0,5
7	1,7 ± 0,1	2,1 ± 0,1	573 ± 4,1	13 ± 0,5	1,5 ± 0,1	2,3 ± 0,1	644 ± 18,2	30 ± 0,8

Pellet Nr.	Pelletofen 1				Pelletofen 2			
	Brennstoff- verbrauch	Lambda	Brennraum- temperatur	Druckverlust über Glutbett	Brennstoff- verbrauch	Lambda	Brennraum- temperatur	Druckverlust über Glutbett
	– kg/h, ar	–	°C	Pa	kg/h, ar	–	°C	Pa
8	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,0	599 ± 8,2	11 ± 0,6	1,8 ± 0,0	2,3 ± 0,0	691 ± 9,4	32 ± 0,3
9	–	–	–	–	1,4 ± 0,1	2,8 ± 0,0	598 ± 10,0	27 ± 0,5
10	1,6 ± 0,0	2,3 ± 0,0	556 ± 4,7	7 ± 0,2	1,4 ± 0,1	2,3 ± 0,0	641 ± 32,6	26 ± 1,4
11	1,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1	520 ± 9,9	9 ± 0,4	1,4 ± 0,0	2,8 ± 0,1	589 ± 10,9	28 ± 0,3
12	1,5 ± 0,2	2,7 ± 0,7	528 ± 28,8	10 ± 1,3	1,5 ± 0,1	2,7 ± 0,1	614 ± 10,8	29 ± 0,5
13	1,8 ± 0,1	2,0 ± 0,0	606 ± 18,7	11 ± 0,5	1,7 ± 0,0	2,0 ± 0,0	677 ± 7,5	30 ± 0,3
14	1,6 ± 0,1	2,5 ± 0,0	559 ± 7,8	9 ± 0,6	1,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1	627 ± 13,0	31 ± 0,4
15	1,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1	550 ± 8,6	9 ± 0,6	1,5 ± 0,1	2,4 ± 0,1	639 ± 13,2	29 ± 0,5
16	–	–	–	–	1,6 ± 0,1	2,5 ± 0,1	629 ± 15,3	28 ± 0,5
17	1,7 ± 0,1	2,1 ± 0,0	580 ± 5,9	1 ± 0,4	1,7 ± 0,1	2,3 ± 0,0	685 ± 11,3	33 ± 0,5
18	1,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	548 ± 12,5	9 ± 0,4	1,6 ± 0,0	2,2 ± 0,0	662 ± 8,6	29 ± 0,4
19	1,5 ± 0,1	2,5 ± 0,0	545 ± 6,9	8 ± 0,4	1,7 ± 0,0	2,4 ± 0,0	654 ± 7,7	31 ± 0,3
20	1,5 ± 0,1	2,4 ± 0,1	557 ± 16,6	8 ± 0,7	1,6 ± 0,1	2,2 ± 0,1	661 ± 11,7	27 ± 0,3
21	1,7 ± 0,0	2,1 ± 0,1	574 ± 9,2	11 ± 0,6	1,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1	641 ± 11,7	27 ± 0,4
22	1,8 ± 0,1	2,1 ± 0,0	579 ± 3,8	10 ± 0,4	1,7 ± 0,0	2,1 ± 0,0	668 ± 9,6	28 ± 0,3
23	1,7 ± 0,1	2,0 ± 0,0	582 ± 4,7	11 ± 0,6	1,6 ± 0,0	2,2 ± 0,0	668 ± 8,5	27 ± 0,3
24	1,9 ± 0,1	2,0 ± 0,1	592 ± 2,9	11 ± 0,6	1,7 ± 0,0	2,3 ± 0,0	674 ± 6,2	32 ± 0,2
25	1,6 ± 0,1	2,3 ± 0,1	588 ± 28,2	8 ± 0,6	1,6 ± 0,0	2,4 ± 0,0	655 ± 9,3	31 ± 0,3
26	1,7 ± 0,1	2,2 ± 0,0	562 ± 9,3	11 ± 0,5	1,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1	655 ± 10,5	29 ± 0,6
27	1,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1	530 ± 9,3	6 ± 0,4	1,5 ± 0,0	2,4 ± 0,0	636 ± 6,2	25 ± 0,2
28	1,6 ± 0,1	2,3 ± 0,1	548 ± 8,8	6 ± 0,6	1,6 ± 0,1	2,5 ± 0,0	649 ± 6,7	31 ± 0,2
Mittel- wert	1,6 ± 0,1	2,3 ± 0,1	563 ± 9,6	9,2 ± 0,6	1,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1	647 ± 11,2	29,2 ± 0,4
Mini- mum	1,4 ± 0,0	1,9 ± 0,0	520 ± 2,9	0,9 ± 0,2	1,3 ± 0,0	2,0 ± 0,0	589 ± 6,2	25,3 ± 0,2
Maxi- mum	1,9 ± 0,2	2,7 ± 0,7	606 ± 28,2	12,5 ± 1,3	1,8 ± 0,4	2,8 ± 0,1	691 ± 32,6	33 ± 1,4

Beim Vergleich der feuerungstechnischen Parameter fällt auf, dass sich der Brennstoffmassenstrom der beiden Pelletöfen für keinen der untersuchten Brennstoffe signifikant unterscheidet, obwohl Pelletofen 1 laut Deklaration eine Nennwärmeleistung von 8 kW und Pelletofen 2 eine Nennwärmeleistung von 6 kW hat und beide Pelletöfen in Nennwärmeleistungsstufe betrieben wurden. Pelletofen 2 weist eine im Durchschnitt um 88 °K höhere Brennraumtemperatur auf, was teilweise an der isolierenden Auskleidung des Brennraums liegen dürfte, die beim Pelletofen 1 fehlt. Mit zunehmendem Brennstoffmassenstrom und dem damit verbundenen Energieeintrag in die Feuerung steigt erwartungsge-

mäß auch die Brennraumtemperatur sowohl für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,72$) als auch für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,71$) (Abbildung 85).

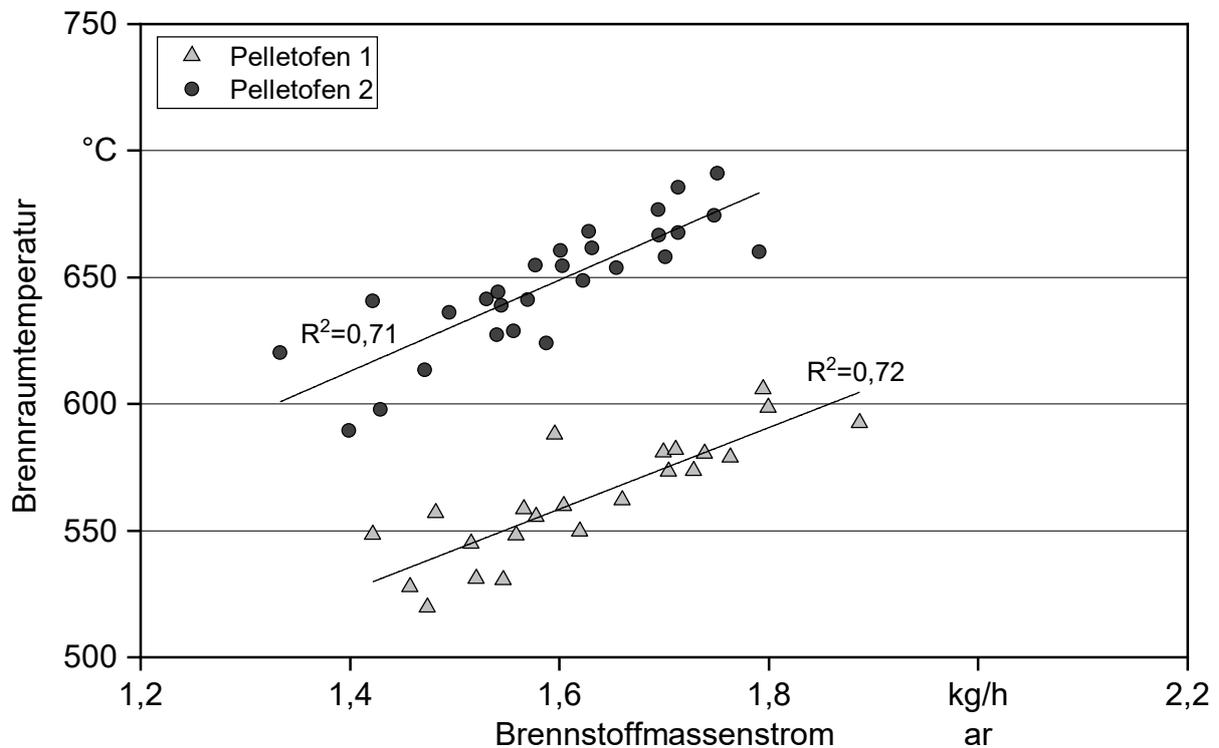


Abbildung 85: Abhängigkeit der Brennraumtemperatur vom Brennstoffmassenstrom am Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets

Die Luftverhältniszahl Lambda liegt für Pelletofen 1 zwischen 1,9 und 2,7 und für Pelletofen 2 zwischen 2,0 und 2,8. Für die meisten Messungen liegen die Lambda-Werte für Pelletofen 2 etwas höher als für Pelletofen 1. Auch der Lambda-Wert zeigt für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,70$) eine deutliche lineare Abhängigkeit zum Brennstoffmassenstrom, für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,45$) ist diese Abhängigkeit weniger deutlich ausgeprägt (siehe Abbildung 86). Der Lambda-Wert liegt bei den meisten Brennstoffen für Pelletofen 2 etwas höher als für Pelletofen 1 (im Mittel + 0,1, aber nicht signifikant), bei einigen Brennstoffen auch niedriger.

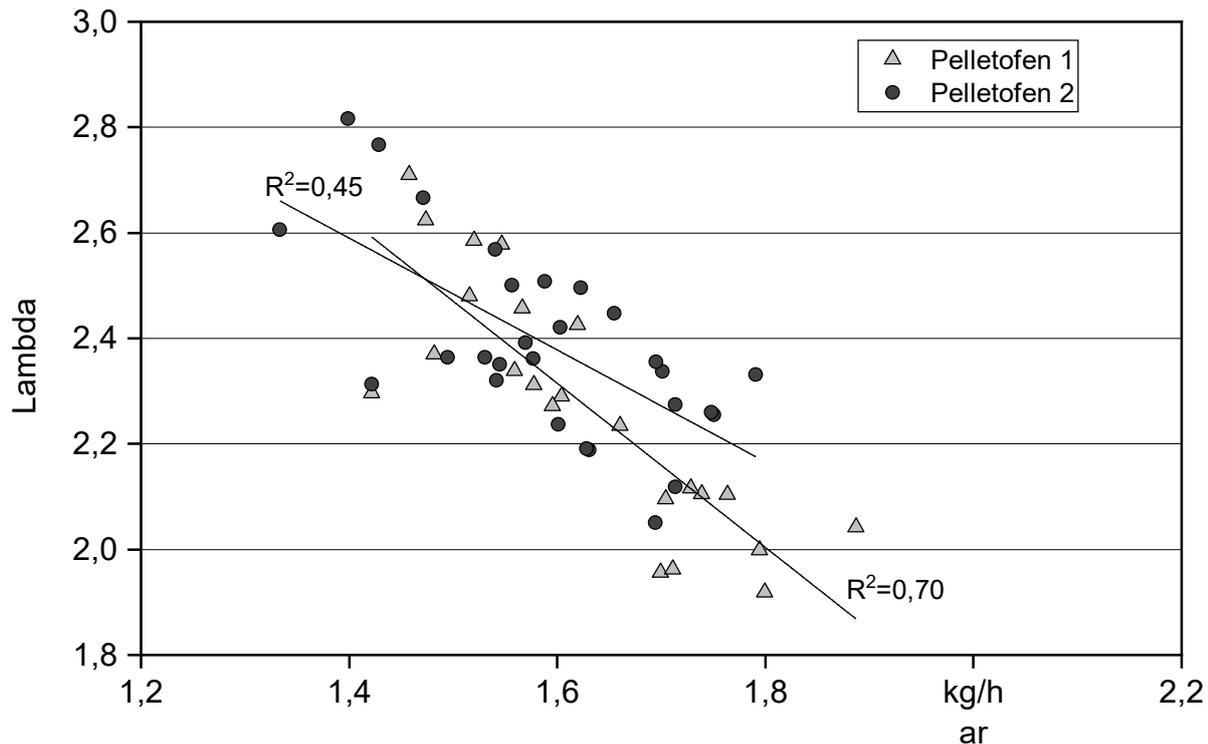


Abbildung 86: Abhängigkeit des Lambda-Werts vom Brennstoffmassenstrom am Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets

Der Druckverlust über das Glutbett ergibt sich aus dem Druckverlust des leeren Brennerkopfs und dem Druckverlust über der Schüttung im Brennerkopf selbst. Die Schüttung im Brennerkopf besteht aus den kontinuierlich zugeführten Holzpellets, die an der Verbrennung teilnehmen, und der sich bildenden Asche, was mit längerem Betrieb zu einem Anstieg des Asche- und Glutbetts führt. Der Druckverlust über das Glutbett ist bei Pelletofen 1 im Vergleich zu Pelletofen 2 durchschnittlich um 20 Pa niedriger, da Pelletofen 1 eine relativ große und langgezogene Rostfläche hat, die lediglich aus einer Reihe von Stahlstäben besteht. Betrachtet man die lineare Regression in Abbildung 87 für die beiden Pelletöfen, zeigt Pelletofen 1 ($R^2 = 0,35$) einen etwas ausgeprägteren Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und dem Brennstoffmassenstrom als Pelletofen 2 ($R^2 = 0,18$). Bei Pelletofen 1 wurde meist ein starker Anstieg des Glutbetts bis über die Sekundärluftdüsen des Brennerkopfs beobachtet. Bei Pelletofen 2 war das aber nicht der Fall, da dieser auch den Brennstoffmassenstrom in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur reduzieren konnte (Abschnitt 4.4.1).

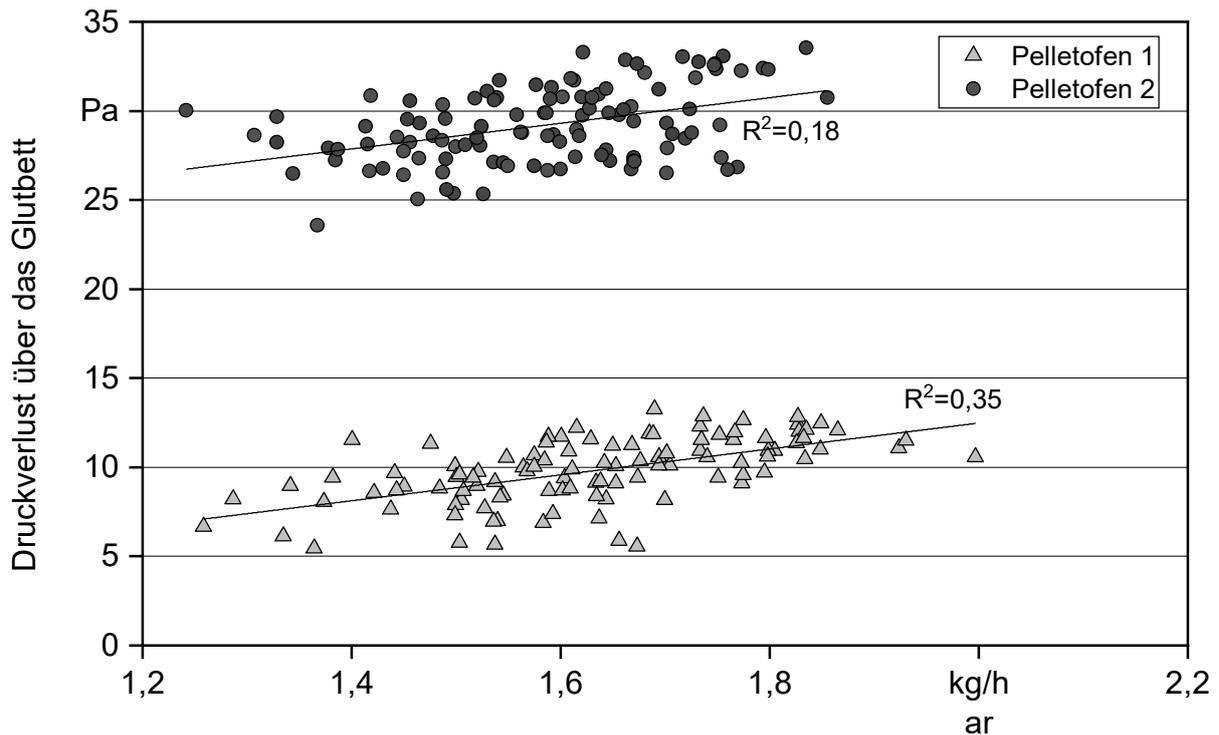


Abbildung 87: Abhängigkeit des Druckverlusts vom Brennstoffmassenstrom an Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets

Eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Verbrennungsqualität ist der Anteil von Falschluff an der Verbrennungsluft. Der Falschluffanteil beschreibt den Anteil an Luft, der ungeplant bzw. unkontrollierbar zur eigentlichen Verbrennungsluft (Primär- und Sekundärluft) hinzukommt. Falschluff kann entweder vor dem Brennertopf (Primärluft und/oder Sekundärluft) oder nach dem Brennertopf (Sekundärluft bzw. Verdünnung und Abkühlung) in die Feuerung gelangen. Dieser Anteil ist erfahrungsgemäß bei Einzelraumfeuerungen relativ hoch und kann einerseits fertigungsbedingt sein (z. B. punktgeschweißte Verkleidungsteile, undichter Pelletvorratsbehälter, offene Luftkanäle oder Nebenlufteintritt am Abgasventilator), aber auch durch den Verschleiß von Dichtungen an Türen und Revisionsöffnungen oder durch Alterung von Dichtmassen an punktgeschweißten Elementen entstehen. Der berechnete Falschluffanteil für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 ist in Abbildung 88 dargestellt. Für Pelletofen 1 liegt der Falschluffanteil trotz vorherigen Abdichtens der zugänglichen Stellen (Pelletvorratsbehälter, Luftkanäle usw.) mit temperaturbeständigem Silikon zwischen 63 % und 72 % an der gesamten Verbrennungsluft. Für den hochwertigeren Pelletofen 2 liegt der Falschluffanteil zwischen 16 % und 35 % und somit um etwa 40 % niedriger als bei Pelletofen 1. Beim Verschließen des zentralen Verbrennungsluftstutzens erlischt die Flamme nach kurzer Zeit bei beiden Pelletöfen, was darauf hindeutet, dass ein Großteil der Falschluff erst nach dem Brennertopf z. B. durch die Türdichtungen oder am Abgasventilator zuströmt und damit eher verdünnende und abkühlende Effekte hat. Dies könnte neben der Wärmeisolierung auch ein möglicher Grund für die deutlich niedrigere Brennraumtemperatur bei Pelletofen 1 sein.

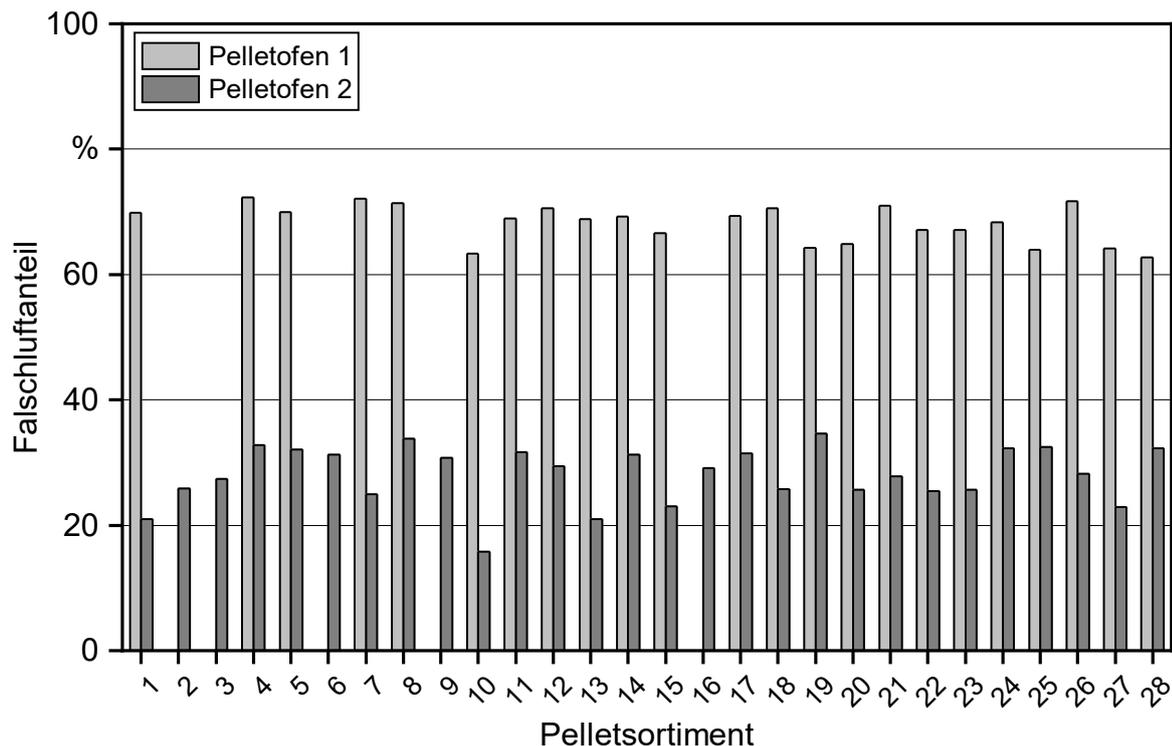


Abbildung 88: Aus der gemessenen Abgaskonzentration und den Volumenströmen am zentralen Verbrennungsluftstutzen und im Abgas berechneter Falschluffanteil während der Versuchsdauer für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 mit den marktverfügbaren Holzpellets

Für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,30$) und Pelletofen 2 ($R^2 = 0,34$) zeigt sich tendenziell eine lineare Abhängigkeit des Falschluffanteils vom Druckverlust über das Glutbett. Dies deutet ebenfalls auf einen Luftzutritt zwischen Brennertopf und Abgasventilator hin.

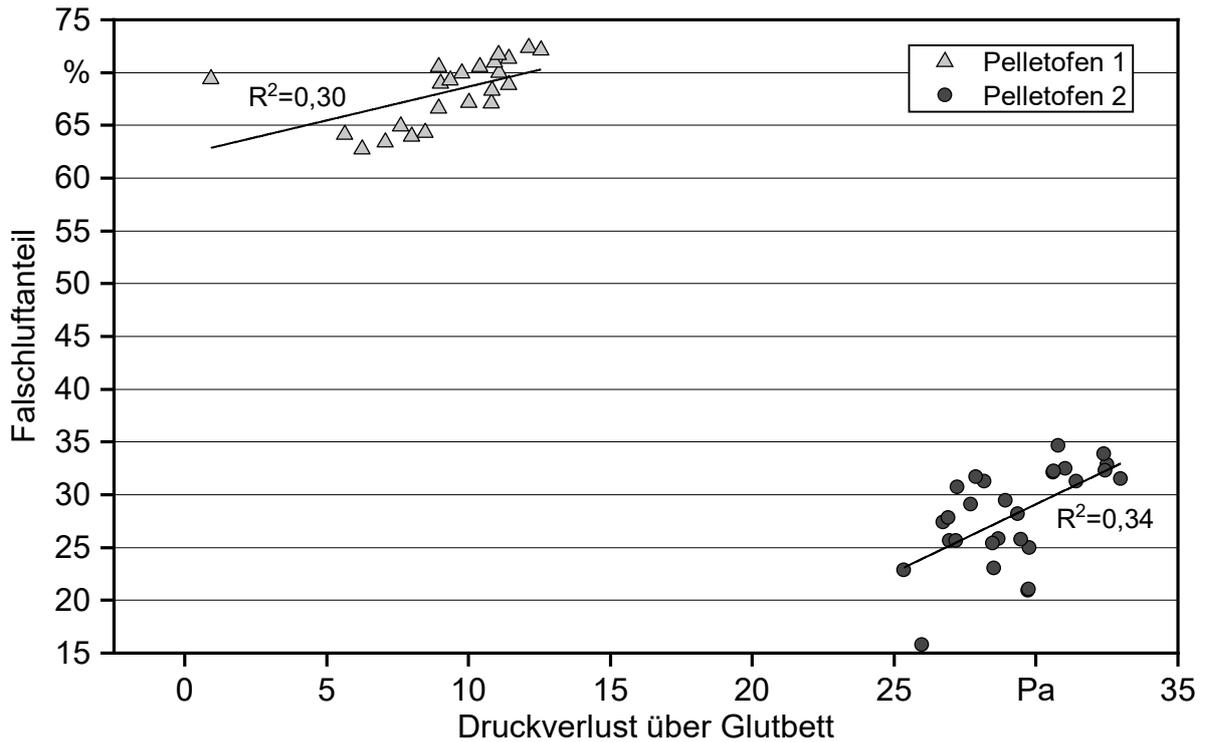


Abbildung 89: Abhängigkeit des berechneten Falschluffanteils vom Druckverlust über das Glutbett für die beiden Pelletöfen mit den marktverfügbaren Holzpellets

Tabelle 27: Mittelwerte der feuerungstechnischen Parameter für Pelletkessel 1 (n = 5 à 30 min) und Pelletkessel 2 (n = 5 à 30 min) (– nicht gemessen)

Pellet Nr.	Pelletkessel 1				Pelletkessel 2			
	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda	Abgastemperatur °C	Wärmeleistung kW	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda	Abgastemperatur °C	Wärmeleistung kW
5	3,1 ± 0,1	1,6 ± 0,0	118 ± 1,6	14,5 ± 0,0	– ± –	– ± –	– ± –	– ± –
8	3,1 ± 0,1	1,6 ± 0,0	113 ± 2,4	14,3 ± 0,1	– ± –	– ± –	– ± –	– ± –
16	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0,0	115 ± 1,1	14,2 ± 0,1	3,5 ± 0,1	1,4 ± 0,0	57 ± 0,6	16 ± 0,0
17	3,3 ± 0,1	1,6 ± 0,0	119 ± 0,8	14,3 ± 0,1	– ± –	– ± –	– ± –	– ± –
19	3,3 ± 0,1	1,6 ± 0,0	114 ± 1,2	14,2 ± 0,1	– ± –	– ± –	– ± –	– ± –
24	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0,0	117 ± 1,7	14,1 ± 0,1	– ± –	– ± –	– ± –	– ± –
26	3,3 ± 0	1,6 ± 0,0	117 ± 2,2	14,0 ± 0,1	– ± –	– ± –	– ± –	– ± –
28	3,1 ± 0,1	1,6 ± 0,0	113 ± 1,7	14,2 ± 0,1	2,8 ± 0,0	1,7 ± 0,0	52 ± 0,5	12,9 ± 0,2
Mittelwert	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0,0	116 ± 1,6	14,2 ± 0,1	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0,0	55 ± 0,5	14,4 ± 0,1
Minimum	3,1 ± 0,0	1,6 ± 0,0	113 ± 0,8	14 ± 0,0	2,8 ± 0,0	1,4 ± 0,0	52 ± 0,5	12,9 ± 0,0
Maximum	3,3 ± 0,1	1,6 ± 0,0	119 ± 2,4	14,5 ± 0,1	3,5 ± 0,1	1,7 ± 0,0	57 ± 0,6	16,0 ± 0,2

Tabelle 27 zeigt die Mittelwerte der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter für beide Kessel. Beide Kessel haben eine Nennwärmeleistung von 15 kW. Pelletkessel 1 weist ziemlich vergleichbare Brennstoffmassenströme zwischen 3,1 und 3,3 kg/h auf und erreicht dabei Wärmeleistungen von 14,0 bis 14,5 kW. Bei Pelletkessel 2 besteht ein relativ deutlicher Unterschied zwischen den beiden untersuchten Pelletsortimenten (16 und 28) sowohl beim Brennstoffmassenstrom (3,5–2,8 kg/h) als auch der Wärmeleistung (16,0–12,9 kW). Die Abgastemperatur liegt bei Pelletkessel 1 mit durchschnittlich 116 °C deutlich höher als bei Pelletkessel 2 mit durchschnittlich 55 °C.

7.1.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Abbildung 90 zeigt die mittleren CO-Emissionen beim Einsatz der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4). Für Pelletofen 1 liegen die CO-Emissionen zwischen 68 mg/Nm³ (Sortiment 1) und 468 mg/Nm³ (Sortiment 28) und weisen teilweise eine große Streuung der Messwerte auf. Bei den Messungen mit Pelletofen 1 wurde der aktuelle CO-Grenzwert der 1. BImSchV für Pellet-Einzelraumfeuerungen ohne Wassertasche von 250 mg/Nm³ für vier der insgesamt 23 an dieser Feuerung untersuchten Sortimente (4, 8, 17 und 28) überschritten. Der in der Typenprüfung gemessene Wert für Pelletofen 1 von 79 mg/Nm³ (siehe Abschnitt 4.4.1, Tabelle 15) wurde mit drei Sortimenten (1, 15 und 19) unterschritten. Für Pelletofen 2 wurden CO-Emissionen zwischen 130 mg/Nm³ (Sortiment 14) und 429 mg/Nm³ (Sortiment 28) gemessen. Der Grenzwert wurde hier bei neun der 28 an dieser Feuerung untersuchten Sortimente überschritten. Die mittleren CO-Emissionen lagen alle oberhalb des in der Typenprüfung ausgewiesenen Werts von 117 mg/Nm³, allerdings erreichten sieben Sortimente (3, 11, 14, 16, 21, 25 und 27) fast diesen Wert. Die Spreizung zwischen Minimal- und Maximalwert der Einzelmessungen ist bei Pelletofen 2 wesentlich geringer und deutet auf eine gleichmäßigere Verbrennung hin. Die Lambda-Werte liegen für beide Feuerungen im direkten Vergleich auf einem sehr ähnlichen Niveau (kein signifikanter Unterschied), wobei der Luftüberschuss für Pelletofen 1 oft etwas niedriger ist und bei manchen Brennstoffen (12, 15, 18, 19, 20 und 27) höher liegt als für Pelletofen 2. Interessant ist auch, dass die CO-Emissionen für elf der untersuchten Sortimente in beiden Feuerungen gut vergleichbar sind, sich aber z. B. bei den Sortimenten 1, 5, 8 und 26 (signifikant, p < 0,05) und den Sortimenten 18, 19, 20, 22 deutlich unterscheiden. Das legt die Vermutung nahe, dass die Feuerungen auf bestimmte Brennstoffparameter unterschiedlich reagieren. Insgesamt scheint Pelletofen 2 trotz der um ca. 90 °K höheren Brennraumtemperatur (siehe Tabelle 26) tendenziell etwas höhere CO-Emissionen zu verursachen, aber bezüglich der geringeren Schwankungen der Messwerte eine gleichmäßigere Verbrennung zu gewährleisten.

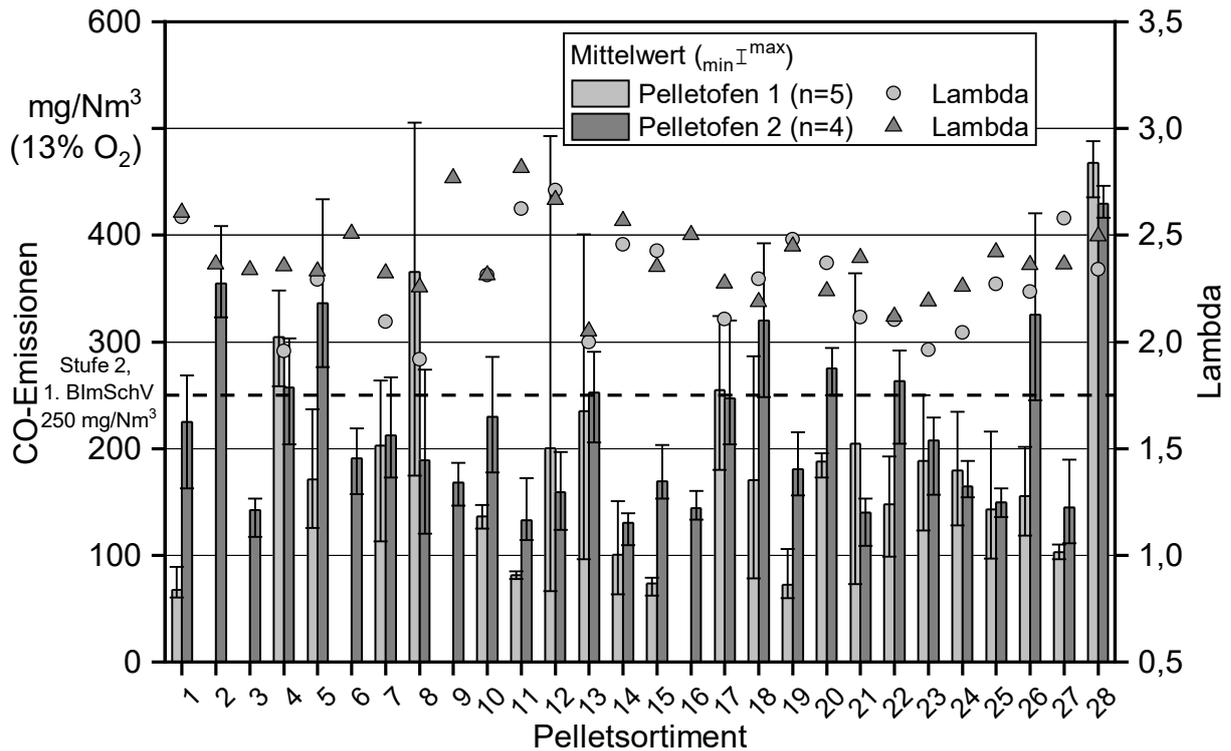


Abbildung 90: Vergleich der CO-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 ($n = 5$) und Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung) sowie die dazugehörigen Lambda-Werte. Die gestrichelte Linie zeigt den aktuell gültigen CO-Grenzwert der 1. BImSchV von 250 mg/Nm^3 [9].

In Abbildung 91 sind die CO-Emissionen der einzelnen Messzeiträume für Pelletofen 1 (15 Minuten) und in Abbildung 92 für Pelletofen 2 (14 Minuten) dargestellt. Bei Pelletofen 1 fällt auf, dass die CO-Emissionen für die meisten untersuchten Brennstoffe von der ersten bis zur letzten Messung ansteigen. Dies deckt sich mit dem während der Feuerungsversuche beobachteten starken Anstieg des Glutbetts. Bei einigen Brennstoffen stieg das Glutbett sogar über die im Brennertopf seitlich angebrachten Sekundärluftdüsen an, was zu einer unzureichenden Luftzufuhr und dadurch zu hohen CO-Emissionen führte, wie beispielsweise bei den Sortimenten 13 oder 21.

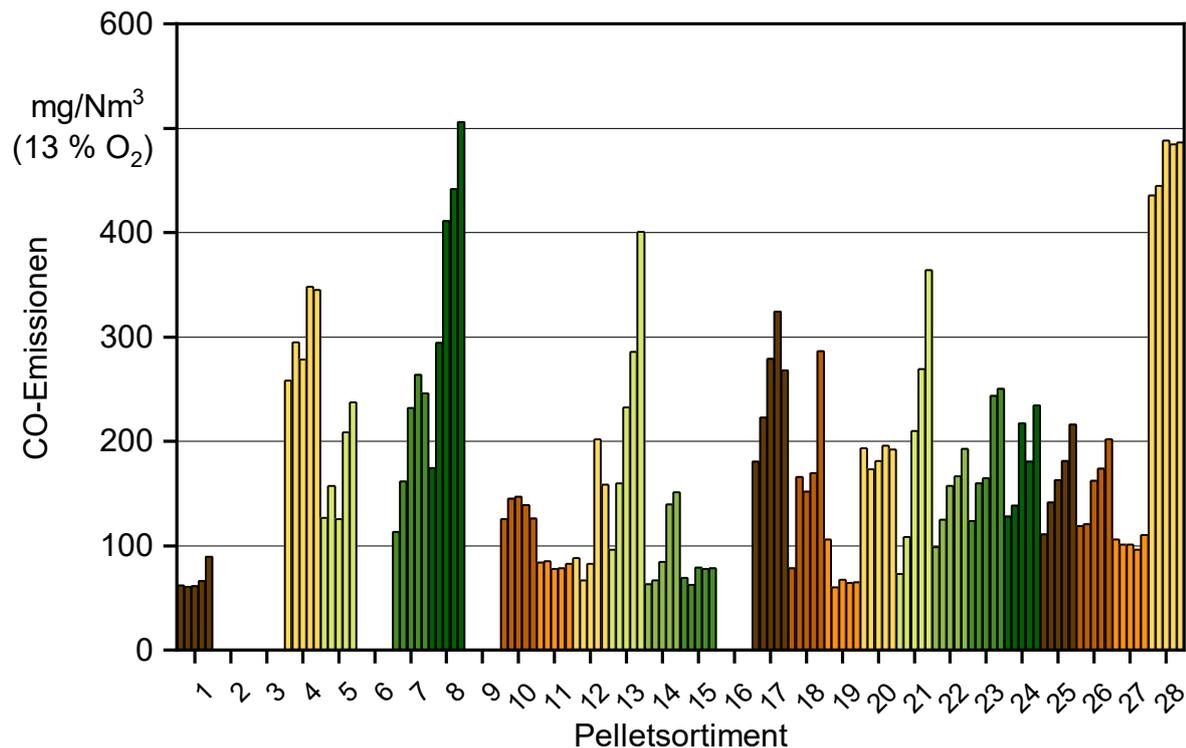


Abbildung 91: Einzelmesswerte der CO-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletofen 1. Jede Säule stellt die mittleren CO-Emissionen während einer Staubmessung (hier 15 min) dar.

Bei Pelletofen 2 konnte dieser Anstieg des Glutbetts nicht beobachtet werden, was unter anderem vermutlich auf die zyklische Brennertopfreinigung zurückzuführen ist. Auch der Anstieg der CO-Emissionen von der ersten zur letzten Messung ist hier nur selten und weniger stark ausgeprägt. Während der fünften Messung liegen die CO-Emissionen durch das starke Abkühlen des Glutbetts und durch den hohen Luftüberschuss (siehe Lambda, Abbildung 93) während der zyklischen Reinigung meist deutlich höher als für die restlichen Messungen (durchschnittlich + 50 %). Bei einigen Pelletsortimenten hat die zyklische Reinigung auch noch einen Einfluss auf die erste oder die ersten zwei Messungen nach der Reinigung (Messwerte 1–2), wie bei den Sortimenten 1 und 27. In der Praxis liegt der reale Mittelwert der CO-Emissionen über die gesamte Messdauer für die meisten Brennstoffe etwas höher (siehe Abbildung 93) als der Mittelwert ohne Reinigung. Wegen der besseren Vergleichbarkeit soll hier trotzdem der Wert ohne Reinigung für den Vergleich zwischen den Feuerungen verwendet werden.

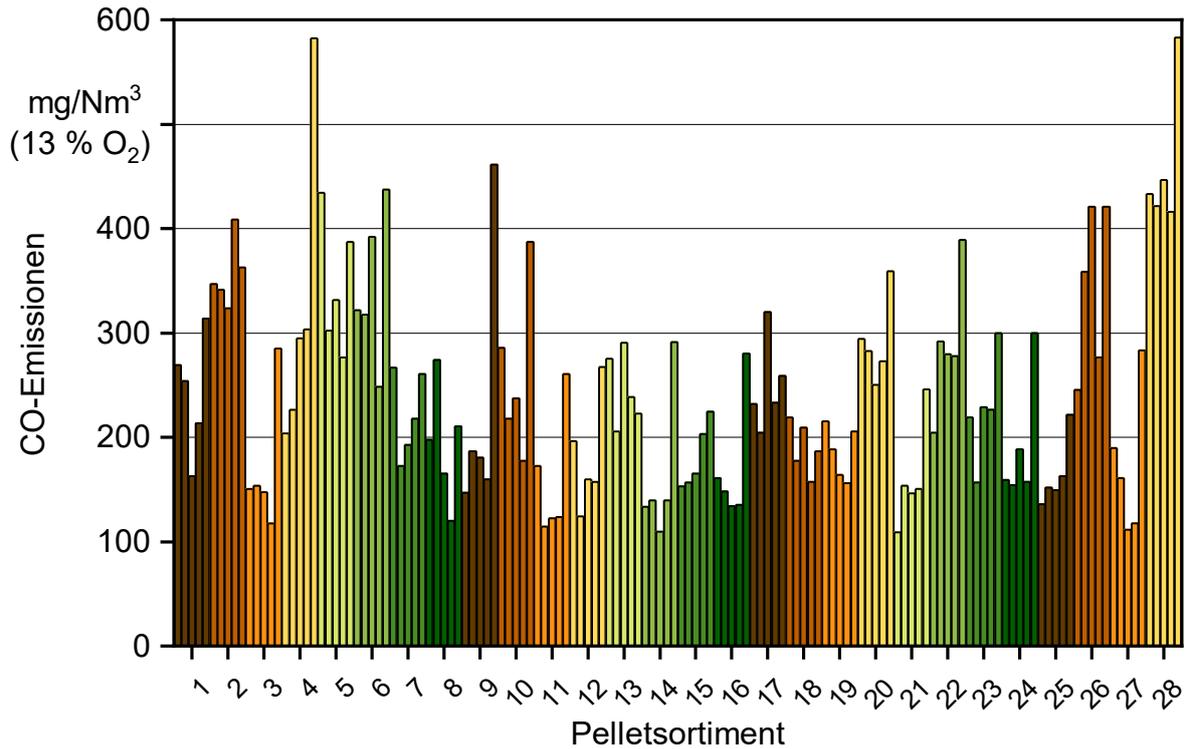


Abbildung 92: Einzelmesswerte der CO-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletofen 2. Jede Säule stellt die mittleren CO-Emissionen während einer Staubmessung (hier 14 min) dar. Bei Pelletofen 2 findet während der fünften Messung die Brennertopfreinigung statt.

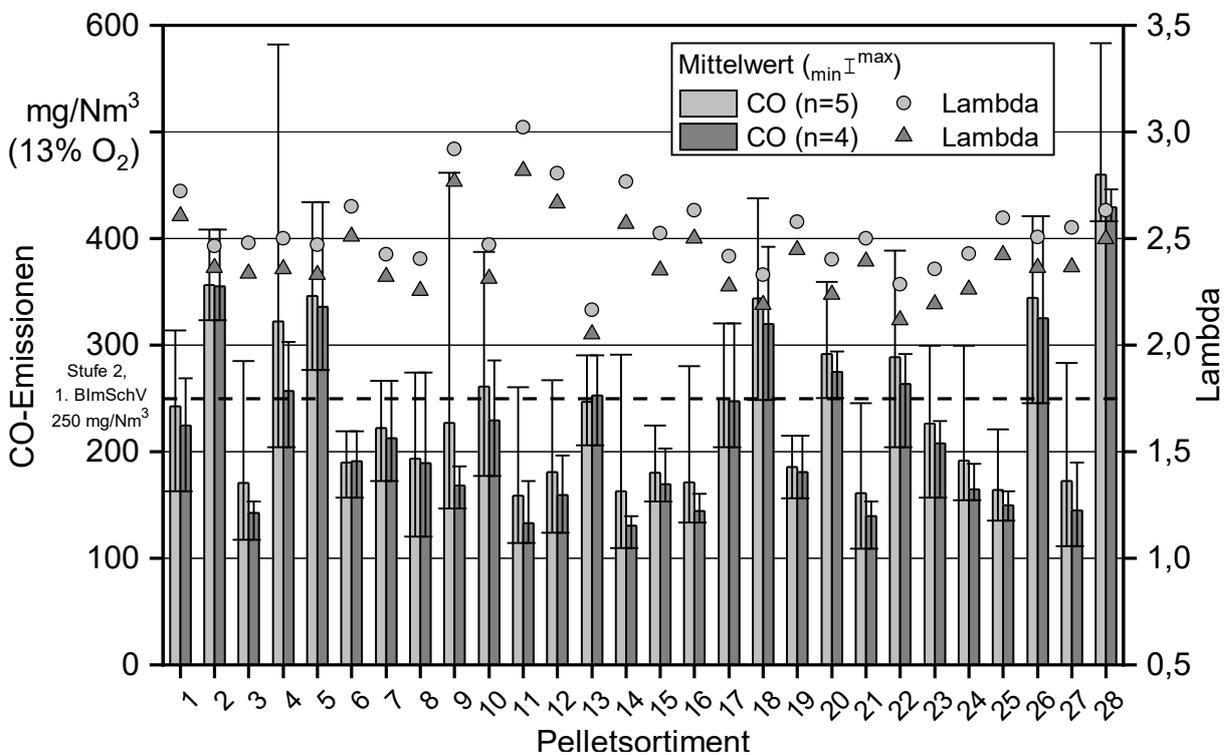


Abbildung 93: Vergleich der Mittelwerte der CO-Emissionen für die marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 2 mit Reinigung (n = 5) und ohne Reinigung (n = 4)

Abbildung 94 zeigt die Gegenüberstellung der CO-Emissionen der Einzelmessungen mit den dazugehörigen Lambda-Werten für die Messungen an den beiden Pelletöfen. Für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,65$) folgen die CO-Emissionen für die meisten untersuchten Pelletsortimente näherungsweise einer typischen CO-Lambda-Charakteristik, bei der die CO-Emissionen auf der linken Seite hin zu niedrigen Lambda-Werten exponentiell ansteigen [68] [69]. Für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,08$) liegt keine CO-Lambda-Charakteristik vor. Dies könnte ein Hinweis auf Falschlufteintrag im Bereich des Brennertopfs z. B. über die Öffnung für das Zündelement im Brennertopf sein, wodurch sich CO-Strahlen ausbilden können. Da die Lambda-Werte bei beiden Öfen vom Brennstoffmassenstrom abhängen (Unterkapitel 7.1), gilt dies folglich auch für die CO-Emissionen bei Pelletofen 1.

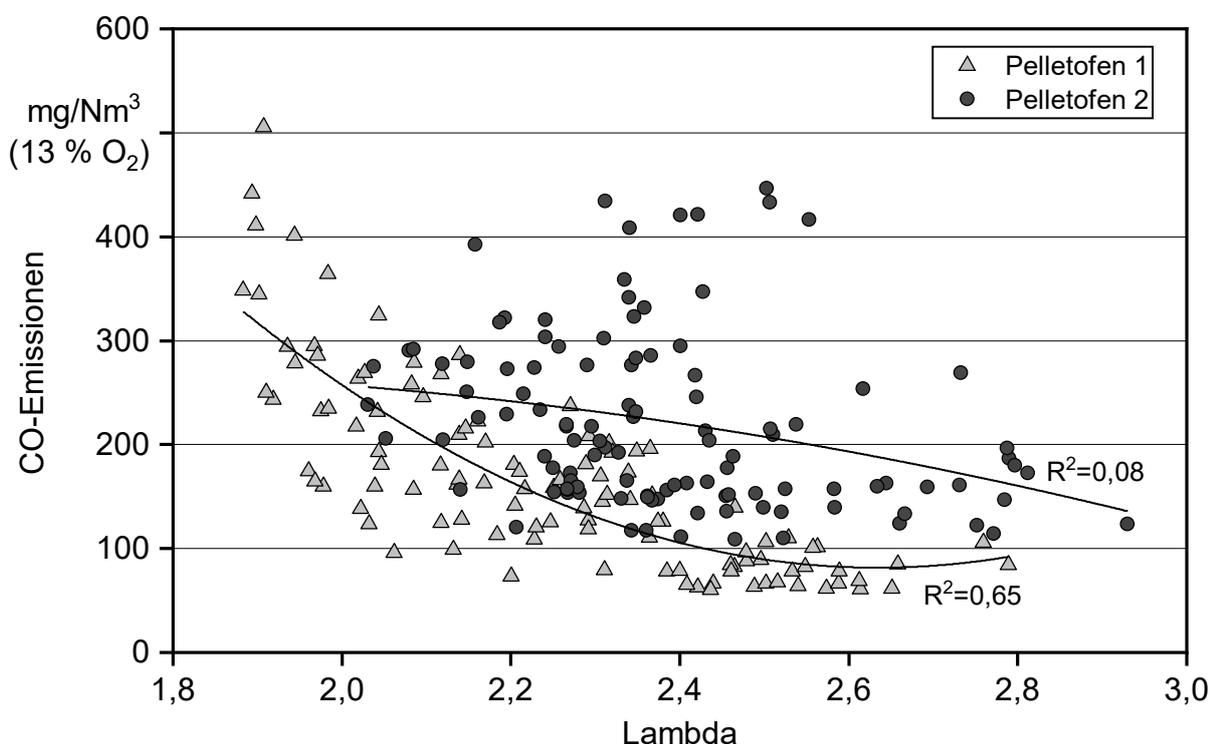


Abbildung 94: Quadratische Regression der CO-Emissionen mit den Lambda-Werten der Einzelmessungen bei den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)

Die Abhängigkeit der CO-Emissionen vom Druckverlust über das Glutbett illustriert Abbildung 95. Dabei fällt auf, dass die CO-Emission für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,50$) mit dem Druckverlust über das Glutbett (und damit auch der Glutbetthöhe) ansteigt. Für Pelletofen 2 ist kein Zusammenhang zwischen den CO-Emissionen und dem Druckverlust festzustellen.

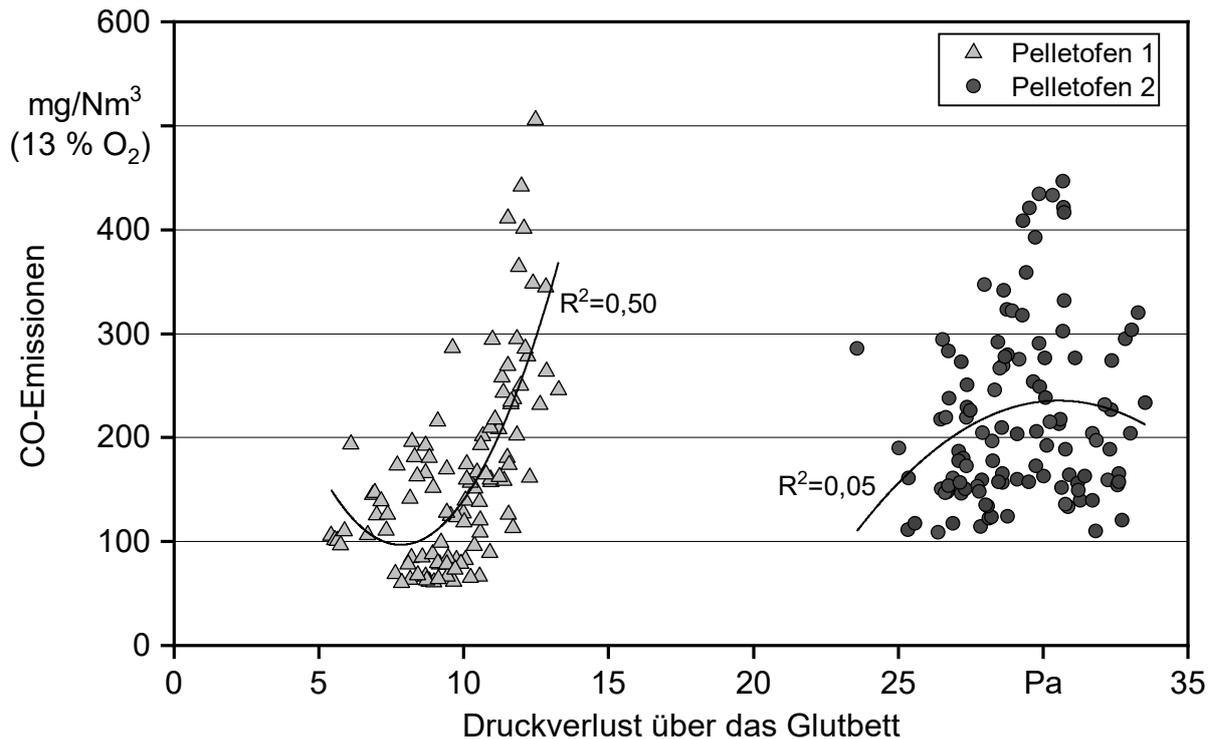


Abbildung 95: Abhängigkeit der CO-Emissionen vom Druckverlust über das Glutbett der Einzelmessungen bei den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)

Die CO-Emissionen für die ausgewählten Pelletsortimente der beiden Pelletkessel sind in Abbildung 96 dargestellt. Für Pelletkessel 1 liegen diese zwischen 2 und 12 mg/Nm³ und damit im unteren Messbereich der verwendeten Abgasmesstechnik. An Pelletkessel 2 wurden nur Sortiment 16 (14 mg/Nm³) und Sortiment 28 (176 mg/Nm³) verbrannt, bei Letzterem stiegen die CO-Emissionen auf das 12,6-Fache an. Es sei angemerkt, dass Pelletkessel 2 gezielt für das Sortiment 16 im Rahmen eines Parallelprojekts optimiert worden war. Dabei wurde der Regelbereich der Brennstoffzufuhr nach unten und oben von dem optimalen Punkt für Sortiment 16 stark limitiert. Bei Pelletkessel 1 gibt es keine nennenswerten Änderungen im Lambda-Wert zwischen den Brennstoffen, während bei Pelletkessel 2 ein deutlicher Anstieg des Lambda-Werts von 1,4 (Sortiment 16) auf 1,7 (Sortiment 28) eintrat. Dies liegt vermutlich an dem deutlichen Unterschied der Schüttdichten der Sortimente 16 (703 kg/m³) und 28 (621 kg/m³), da hier auch der Brennstoffmassenstrom in Pelletkessel 2 von 3,5 kg/h (Sortiment 16) auf 2,8 kg/h (Sortiment 28) sinkt. Bei Pelletkessel 1 beträgt der Unterschied im Brennstoffmassenstrom lediglich 0,1 kg/h zwischen den verschiedenen Sortimenten (siehe auch Tabelle 26) Die Leistungsregelung von Pelletkessel 1 ist demnach wesentlich effektiver als die von Pelletkessel 2. Allerdings wurde, wie bereits erwähnt, der Regelbereich von Pelletkessel 2 stark limitiert. Beide Feuerungen liegen deutlich unter dem für Pelletkessel gültigen CO-Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Nm³.

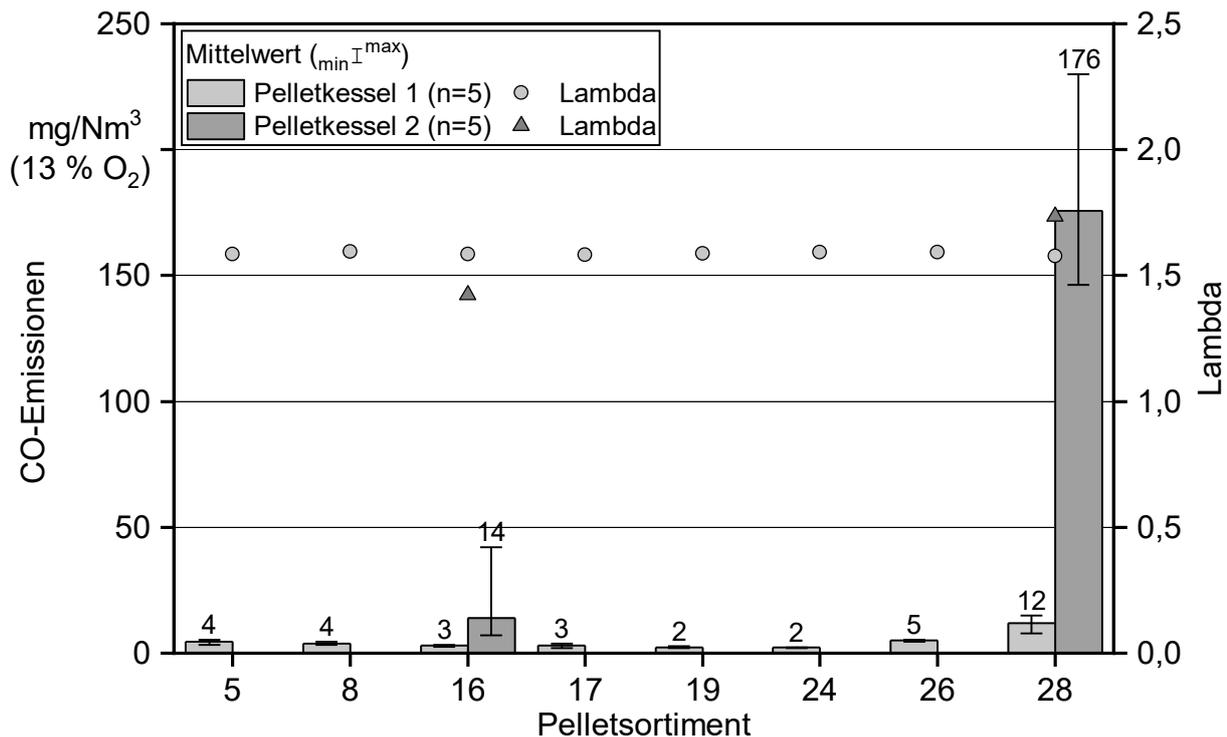


Abbildung 96: CO-Emissionen der untersuchten marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2

Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen (org.-C). Die mittleren Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen für die beiden Pelletöfen sind in Abbildung 97 dargestellt. Für Pelletöfen 1 liegen diese zwischen 1 mg/Nm³ (Sortiment 1) und 23 mg/Nm³ (Sortiment 8). Die Sortimente 4 und 8 weisen dabei die höchsten org.-C-Emissionen auf und unterscheiden sich signifikant von den meisten anderen Brennstoffen, gefolgt von den Sortimenten 13, 17 und 21, wobei diese sich bedingt durch die hohe Streuung der Einzelwerte nur von wenigen der 28 untersuchten Sortimente signifikant unterscheiden. Die Sortimente 1, 10, 15, 19 und 27 liegen auf einem sehr niedrigen Niveau zwischen 1 und 2 mg/Nm³ und unterscheiden sich dabei signifikant von den Sortimenten 4, 8, 13 und 17. Bei Pelletöfen 2 liegen die mittleren org.-C-Emissionen zwischen 2 (Sortiment 3) und 10 mg/Nm³ (Sortiment 26). Die höchsten org.-C-Emissionen werden für hier das Sortiment 26 erreicht und liegen im Vergleich zu zehn der untersuchten Brennstoffe signifikant höher. Am niedrigsten liegen die org.-C-Emissionen beim Sortiment 3, das sich damit signifikant von fünf der untersuchten Brennstoffe unterscheidet. Im direkten Vergleich liegen die org.-C-Emissionen bei Pelletöfen 2 durchschnittlich um 2 mg/Nm³ niedriger als bei Pelletöfen 1, wobei die Streuung der Einzelwerte, wie auch bei den CO-Emissionen bei Pelletöfen 2, wesentlich geringer ist. Sowohl die niedrigsten als auch die höchsten org.-C-Emissionen liegen für beide Pelletöfen für unterschiedliche Brennstoffe vor. Die durchschnittlich niedrigeren Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen bei Pelletöfen 2 lassen neben Unterschieden in der Brennraum- und Brennerkopfgeometrie auch durch die höheren mittleren Temperaturen im Brennraum erklären (siehe Tabelle 26). Statistisch signifikant unterscheiden sich die org.-C-Emissionen beider Pelletöfen nur für die Sortimente 4, 8 und 13.

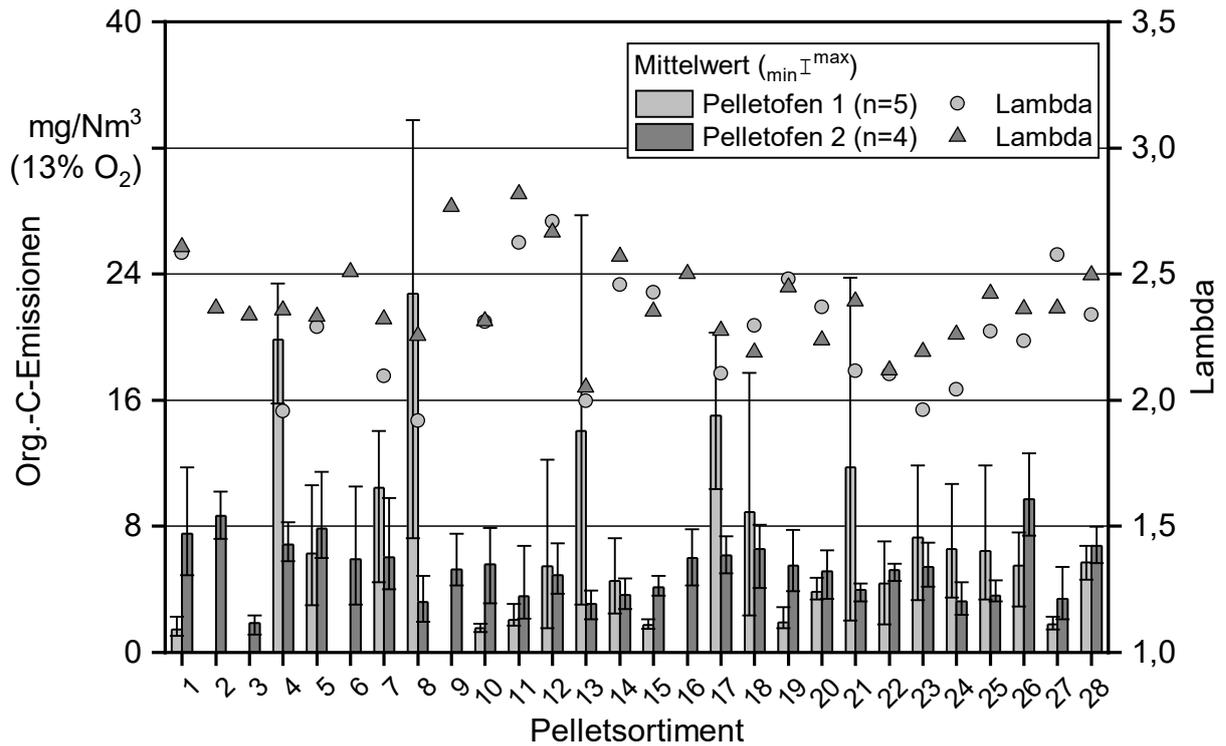


Abbildung 97: Vergleich der org.-C-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

Bei den Einzelmessungen der org.-C-Emissionen zeigt sich für Pelletofen 1 der gleiche zeitliche Verlauf wie bei den CO-Emissionen. Für den überwiegenden Teil der untersuchten Brennstoffe steigen die org.-C-Emissionen von der ersten zur letzten Messung innerhalb des Messzeitraums bedingt durch den starken Anstieg des Glutbetts an (Abbildung 98).

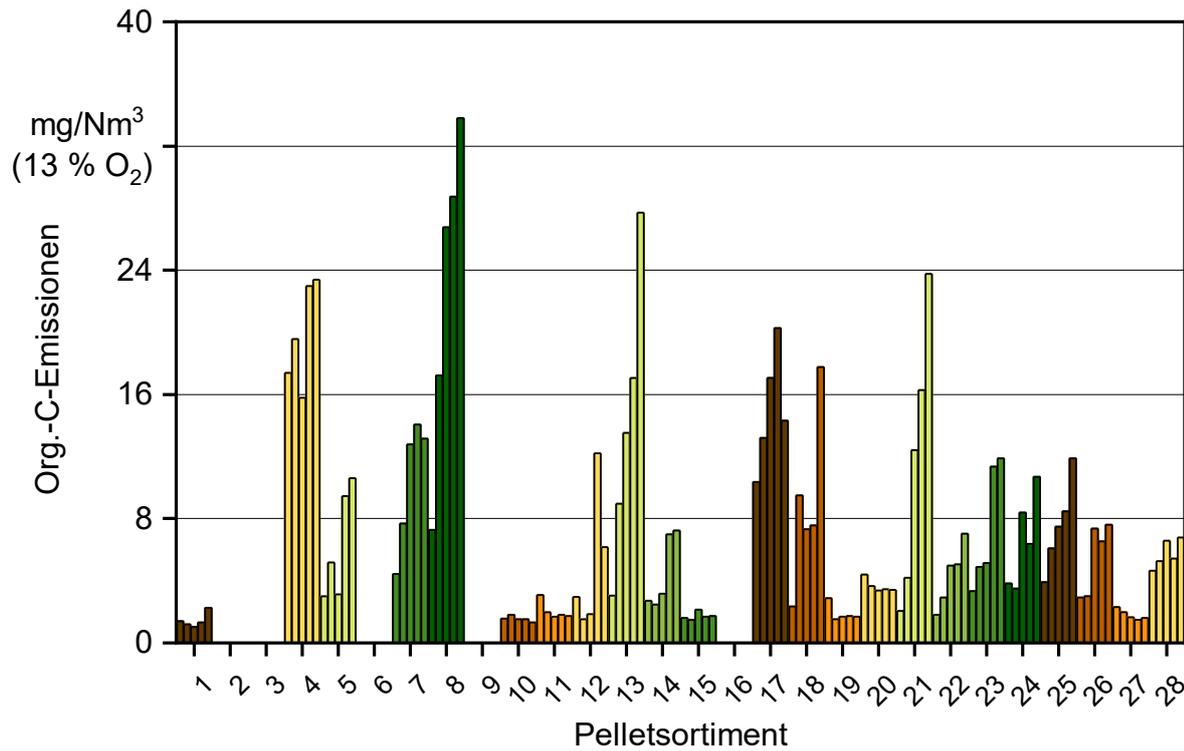


Abbildung 98: Einzelmesswerte der org.-C-Emissionen für Pelletofen 1. Jede Säule stellt die mittleren org.-C-Emissionen während einer Staubmessung (hier 15 min) dar.

Bei Pelletofen 2 gibt es diesen Trend nur für wenige (4, 15 und 21) der untersuchten Sortimente (Abbildung 99). Für die meisten Pelletsortimente zeigt sich jedoch ein höherer Messwert während der zyklischen Brennertopfreinigung (fünfter Messwert) und auch wieder teilweise in den sich anschließenden Messungen (Messwerte 1–2).

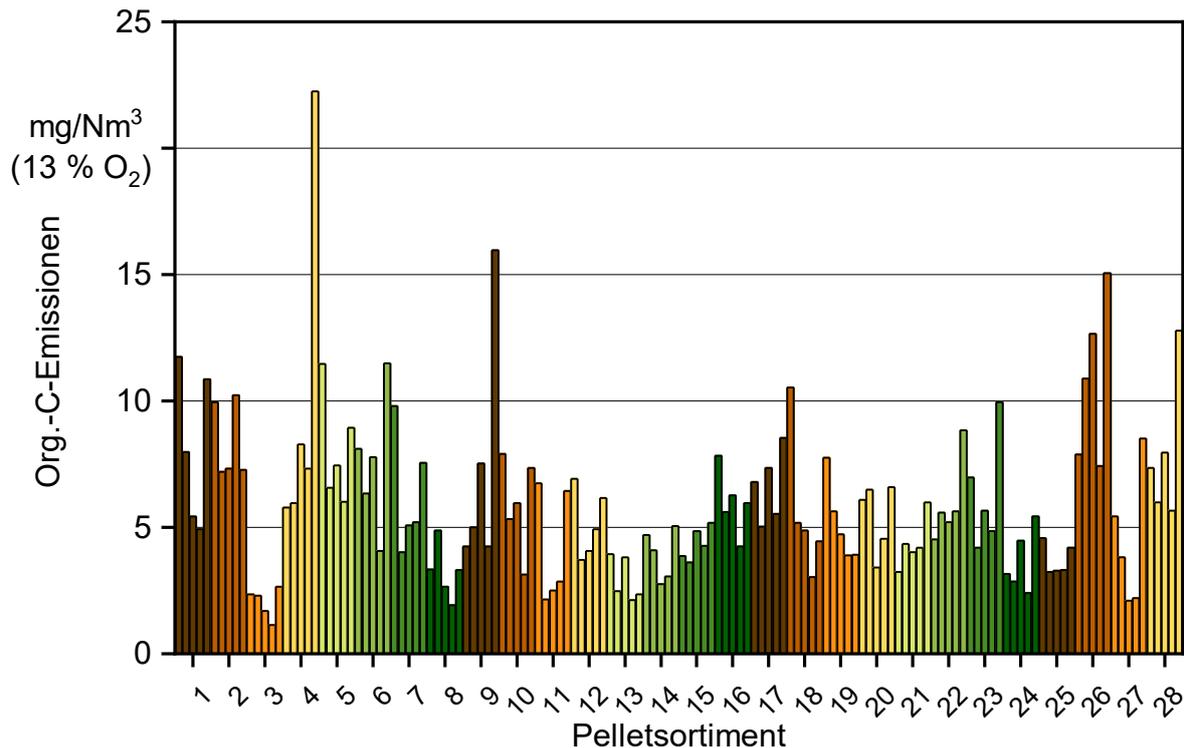


Abbildung 99: Einzelmesswerte der org.-C-Emissionen für Pelletofen 2. Jede Säule stellt die mittleren org.-C-Emissionen während einer Staubmessung (hier 14 min) dar. Bei Pelletofen 2 ist jeweils die fünfte Messung je Pelletsortiment die Messung, in der die Brennertopfreinigung stattfindet.

Abbildung 100 zeigt die Abhängigkeit der org.-C-Emissionen von den CO-Emissionen für die beiden Pelletöfen für die marktverfügbaren Pelletsortimente. Sowohl für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,92$) als auch für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,64$) zeigen die org.-C-Emissionen eine deutliche lineare Abhängigkeit von den CO-Emissionen.

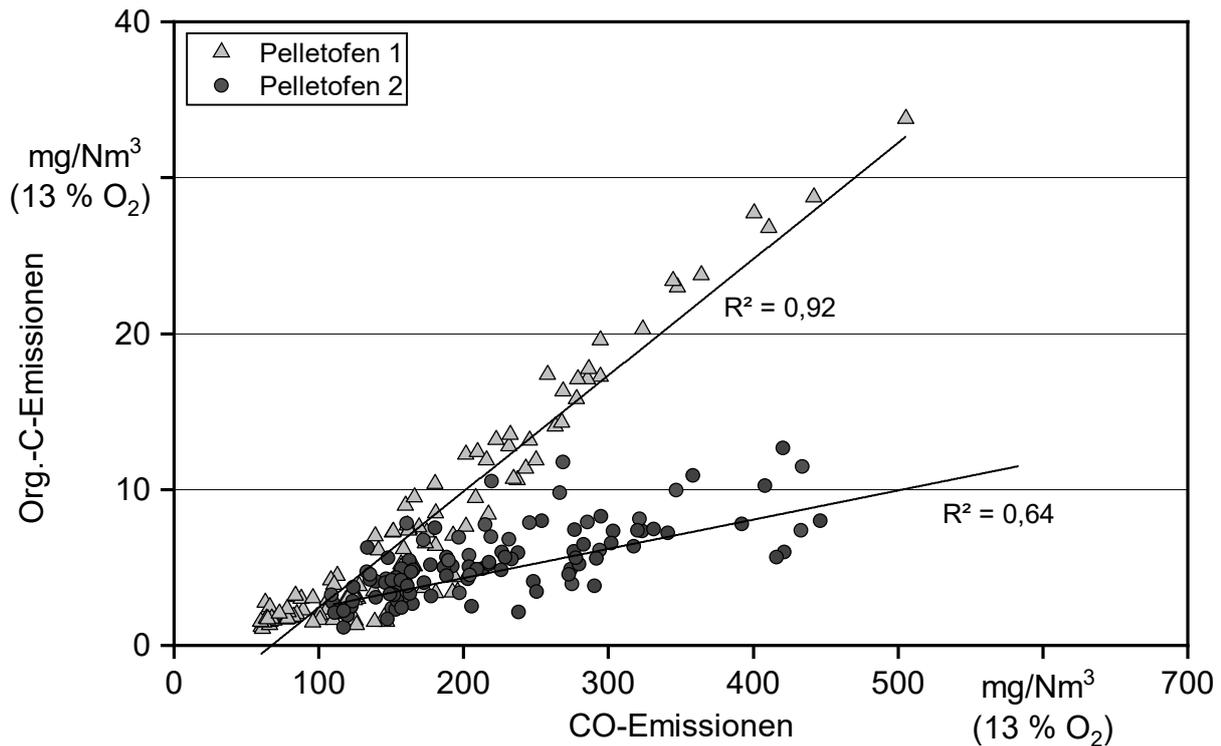


Abbildung 100: Abhängigkeit der org.-C-Emissionen von den CO-Emissionen für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung) für die marktverfügbaren Pelletsortimente

Für beide Pelletkessel liegen die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen unter 1 mg/Nm^3 und werden daher nicht separat dargestellt.

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen (Abbildung 101) liegen für Pelletofen 1 zwischen 92 mg/Nm^3 (Sortiment 13) und 188 mg/Nm^3 (Sortiment 26) und im Mittel über alle 23 untersuchten Sortimente bei 124 mg/Nm^3 . Für Pelletofen 2 liegen die gemessenen NO_x-Emissionen zwischen 108 mg/Nm^3 (Sortiment 3) und 212 mg/Nm^3 (Sortiment 26) und im Mittel über alle 28 untersuchten Sortimente bei 146 mg/Nm^3 . Damit liegen die NO_x-Emissionen für Pelletofen 2 im Durchschnitt um 22 mg/Nm^3 höher als bei Pelletofen 1, dabei ist der Unterschied zwischen den beiden Pelletöfen für alle untersuchten Brennstoffe signifikant ($p < 0,05$). Die niedrigsten NO_x-Emissionen ergeben sich für beide Pelletöfen für unterschiedliche Sortimente, die höchsten allerdings in beiden Fällen für Sortiment 26. Die Streuung der Einzelmesswerte (Fehlerbalken) ist im Vergleich zu den CO- und org.-C-Emissionen sehr gering. Beide Pelletöfen weisen – wie in Unterkapitel 7.1 bereits beschrieben – sehr vergleichbare Brennstoffmassenströme auf, bei allerdings unterschiedlicher Dimensionierung der Brennraum- bzw. Brennerschalengeometrie. Die Unterschiede bei den NO_x-Emissionen könnten daher durch Unterschiede in der Luftstufung (Brennerschalengeometrie) oder der Brennraumbelastung (Verhältnis der zugeführten Brennstoffmenge zum Brennraumvolumen) zustande kommen [52], die sich vermutlich ebenfalls auf die Abstände zu den Luftdüsen (Luftstufung) sowie die Temperatur im Brennraum auswirken kann. Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf die Bildung von NO_x (vor allem NO) ist die Verfügbarkeit von Sauerstoff und damit der Luftüberschuss Lambda [74]. Dieser Luft-

überschuss ist bei Pelletöfen 1 bei vergleichbarer Brennstoffmenge meistens etwas höher als bei Pelletöfen 2, was sich auch in einer niedrigeren Brennraumtemperatur bei Pelletöfen 1 (Tabelle 26) zeigt, die wiederum einen gewissen Einfluss auf die NO_x-Bildung haben könnte.

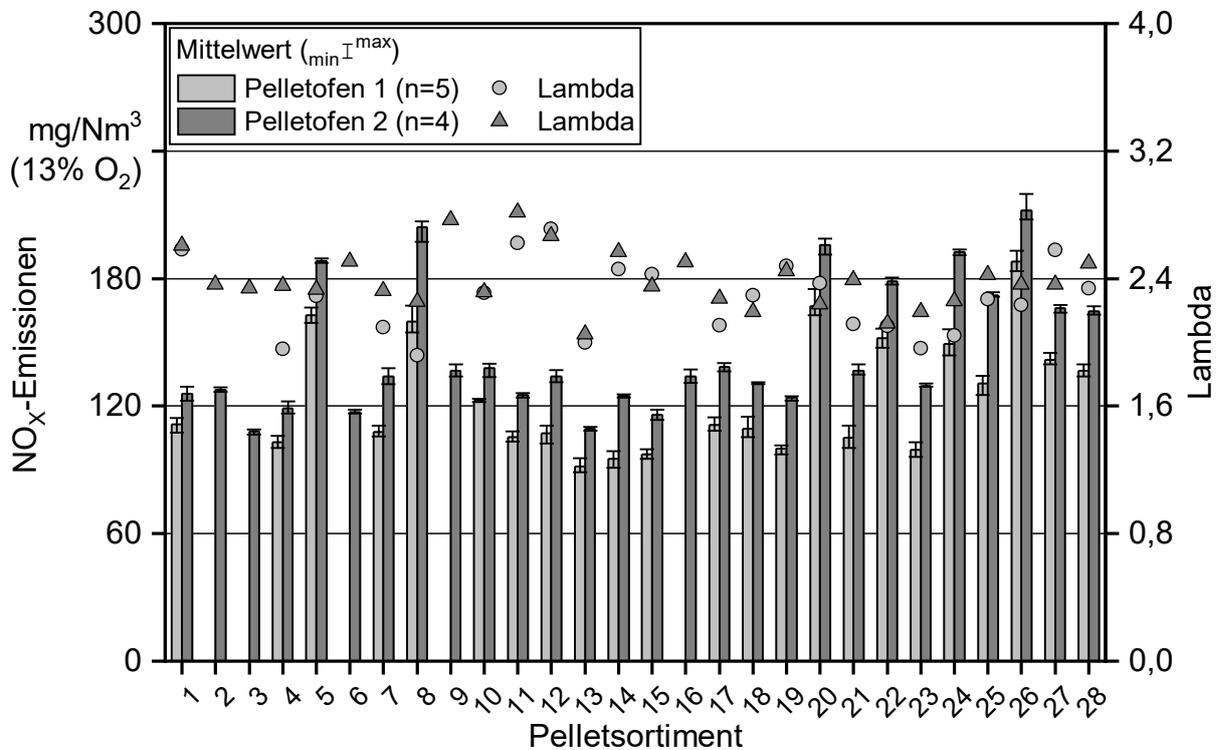


Abbildung 101: NO_x-Emissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 (n = 5) und Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

Für die untersuchten Pelletkessel sind die NO_x-Emissionen in Abbildung 102 dargestellt. Für Pelletkessel 1 liegen die NO_x-Emissionen zwischen 118 mg/Nm³ und 299 mg/Nm³ und damit für alle untersuchten Sortimente meist deutlich höher als bei den Pelletöfen, außer für Sortiment 19. Hier liegt Pelletkessel 1 mit 118 mg/Nm³ zwischen Pelletofen 1 (99 mg/Nm³) und Pelletofen 2 (123 mg/Nm³). Für Pelletkessel 2 liegen die NO_x-Emissionen für Sortiment 16 bei 134 mg/Nm³ und für Sortiment 28 bei 146 mg/Nm³. Pelletkessel 2 liegt damit für Sortiment 16 leicht über dem Wert von Pelletofen 1 und bei Sortiment 28 etwas unterhalb des Werts von Pelletofen 2, wobei der Messwert bei Sortiment 28 aufgrund des niedrigen Brennstoffmassenstroms etwas verfälscht sein dürfte.

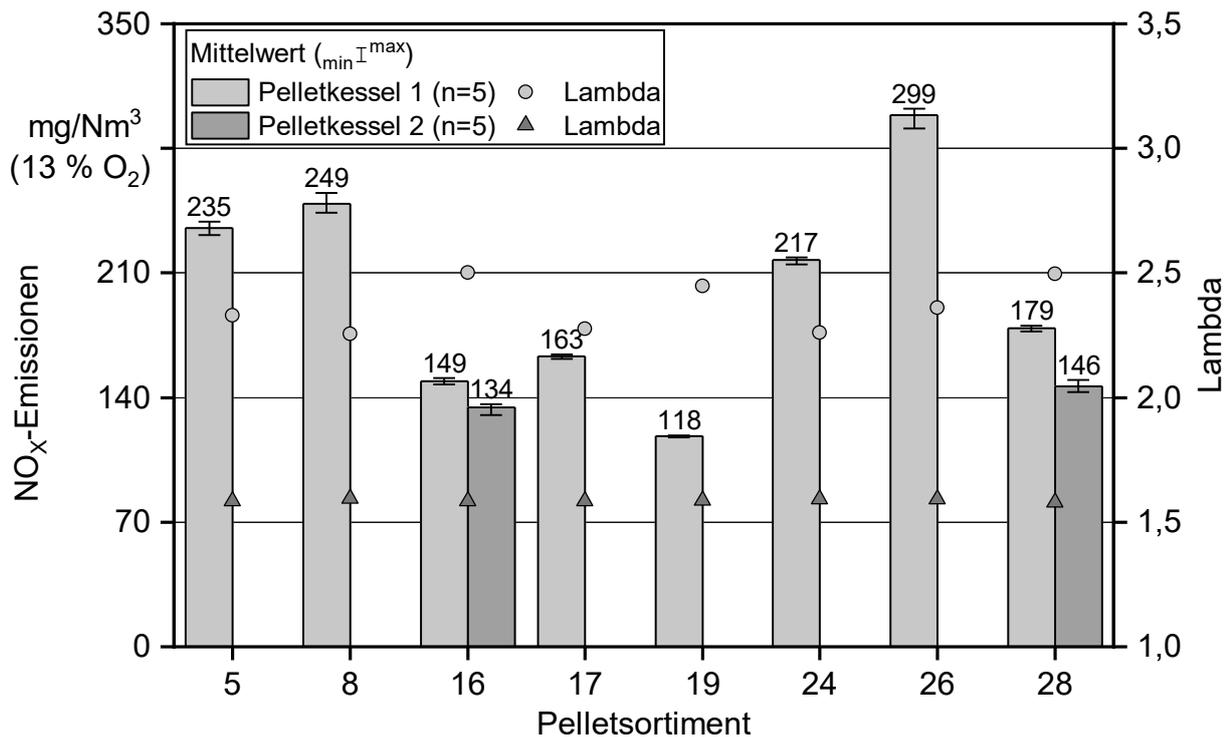


Abbildung 102: NO_x-Emissionen der untersuchten marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2

Abbildung 103 zeigt die Abhängigkeit der NO_x-Emissionen aller untersuchten Feuerungen und dem Stickstoffgehalt der untersuchten Holzpellets. Die Pelletöfen zeigen eine schwächere Abhängigkeit ($R^2 = 0,35-0,42$) zum Stickstoffgehalt der Holzpellets im Vergleich zu Pelletkessel 1. Die größere Steigung der Ausgleichsgeraden für Pelletkessel 1 deutet auf eine höhere Konversionsrate des Brennstoffstickstoffs durch die im Vergleich zu den Pelletöfen deutlich höheren Brennraumtemperaturen hin [60] [52]. Auch im Vergleich mit Pelletkessel 2 scheint die Konversionsrate von Brennstoffstickstoff zu NO_x deutlich höher zu sein. Bei Pelletkessel 2 ist hierfür vermutlich eine Kombination aus niedrigeren Temperaturen zusammen mit dem niedrigeren Brennstoffmassenstrom und damit einer niedrigeren Brennraumbelastung (Volumen des Brennstoffs zum Brennraumvolumen) verantwortlich [60] [52].

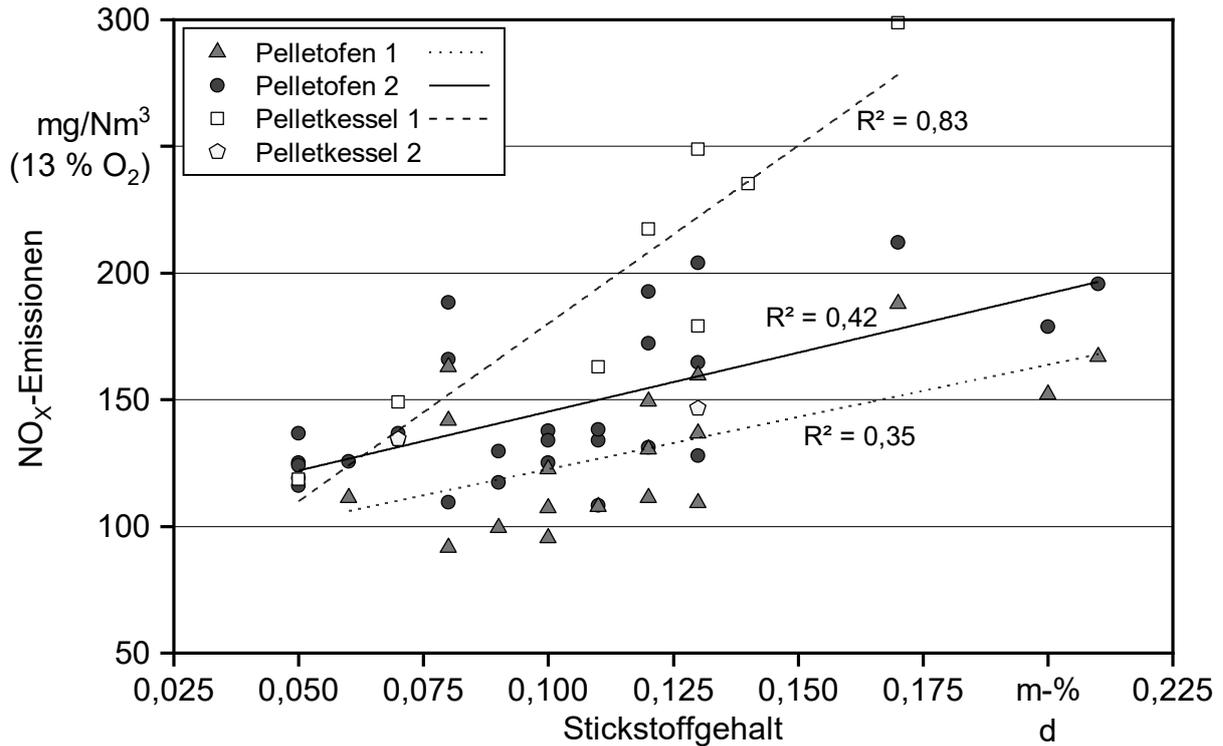


Abbildung 103: Abhängigkeit der NO_x-Emissionen für Pelletofen 1 und 2 sowie Pelletkessel 1 und 2 vom Stickstoffgehalt der untersuchten Pellets

7.1.2 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen der beiden Pelletöfen sind für die marktverfügbaren Pelletsortimente in Abbildung 104 dargestellt. Für Pelletofen 1 liegen die Gesamtstaubemissionen zwischen 45 mg/Nm³ (Sortiment 19) und 246 mg/Nm³ (Sortiment 8) und weisen dabei vor allem bei hohen Gesamtstaubemissionen extreme Streuungen der Einzelmessungen auf. Im Mittel über alle 23 untersuchten Sortimente liegen die Gesamtstaubemissionen damit bei Pelletofen 1 bei 121 mg/Nm³. Der aktuell gültige Grenzwert der Stufe 2 nach der 1. BImSchV für Staubemissionen für Pelletöfen ohne Wassertasche von 30 mg/Nm³ konnte bei Pelletofen 1 lediglich mit Sortiment 1 für einige Einzelmessungen, jedoch nicht im Mittel über alle fünf Messungen erreicht werden. Alle anderen Sortimente liegen meist deutlich über dem Grenzwert. Mit keinem der untersuchten Sortimente konnte der Wert von 24 mg/Nm³ bezüglich Gesamtstaubemissionen (siehe Abschnitt 4.4.1, Tabelle 15) unterschritten werden. Für Pelletofen 2 liegen die Gesamtstaubemissionen zwischen 22 mg/Nm³ (Sortiment 25) und 58 mg/Nm³ (Sortiment 6) und damit für die meisten Brennstoffe signifikant niedriger als bei Pelletofen 1 (außer 10, 11, 14, 15, 19 und 27). Im Mittel über alle bei Pelletofen 2 untersuchten Sortimente liegen die Gesamtstaubemissionen bei 35 mg/Nm³ und damit nur bei 30 % der mittleren Staubemissionen von Pelletofen 1. Der Grenzwert von 30 mg/Nm³ wurde bei 14 Sortimenten und somit von ca. der Hälfte aller Pellets überschritten (2, 4, 5, 8, 10, 13, 17, 18, 20, 22, 24, 26, 17, 28). Der in der Typenprüfung ermittelte Wert von 19 mg/Nm³ konnte mit keinem der untersuchten Sortimente erreicht werden. Sowohl die niedrigsten als auch die höchsten gemessenen Gesamtstaubemissionen liegen für beide Pelletöfen für unterschiedliche Sortimente vor.

Beide Feuerungen scheinen auch bei den Gesamtstaubemissionen auf unterschiedliche Brennstoffparameter zu reagieren.

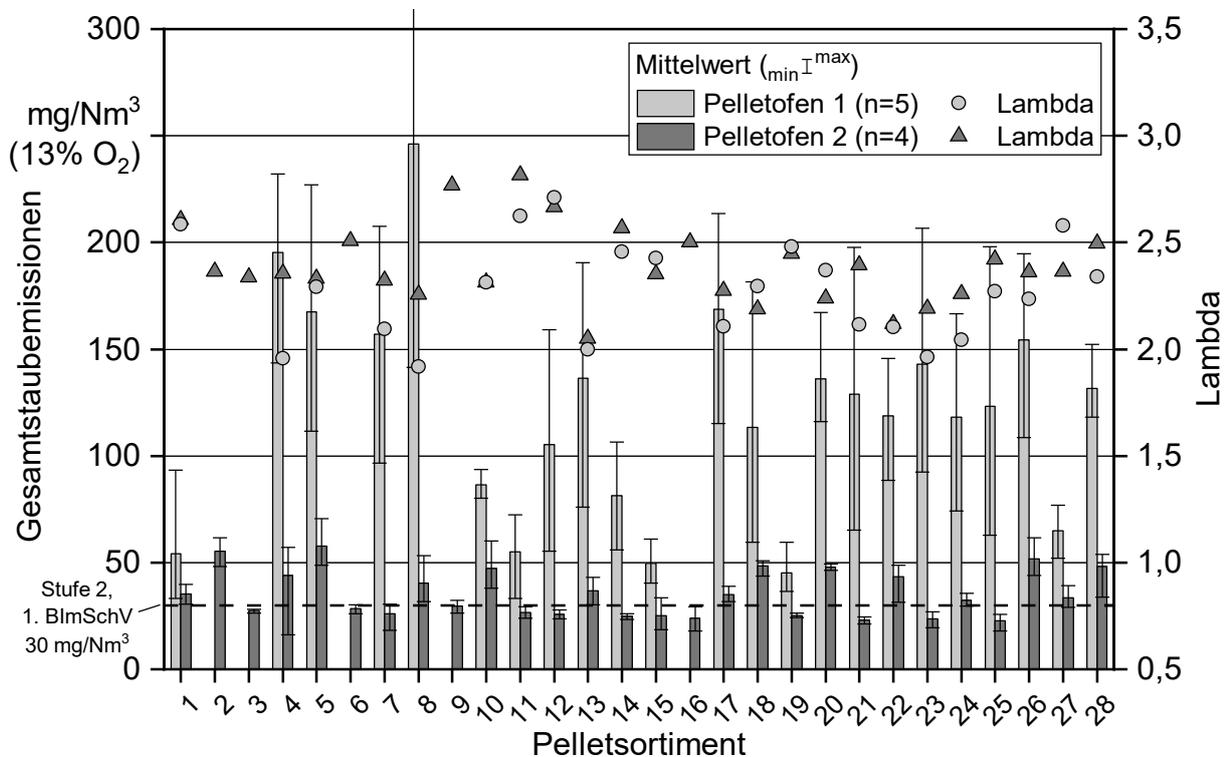


Abbildung 104: Gesamtstaubemissionen der marktverfügbaren Pelletsortimente in Pelletofen 1 ($n = 5$) und Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung). Die gestrichelte Linie zeigt den aktuell gültigen Staubgrenzwert der 1. BImSchV von 30 mg/Nm^3 .

Wie bereits bei den CO-Emissionen (Abschnitt 7.1.1) beschrieben zeigt Pelletofen 1 auch bei den Gesamtstaubmessungen einen starken Anstieg von der ersten zur fünften Einzelmessung (siehe Abbildung 105), der ebenfalls auf den beobachteten Anstieg des Glutbetts während der Versuchsdauer zurückzuführen ist. Dieser Trend ist für die Gesamtstaubemissionen sogar wesentlich stärker ausgeprägt als bei den CO-Emissionen. Lediglich bei Sortiment 10 scheint es den Emissionsanstieg nicht zu geben, da hier kein Anstieg des Glutbetts über die Sekundärluftdüsen des Brennerkopfs beobachtet wurde.

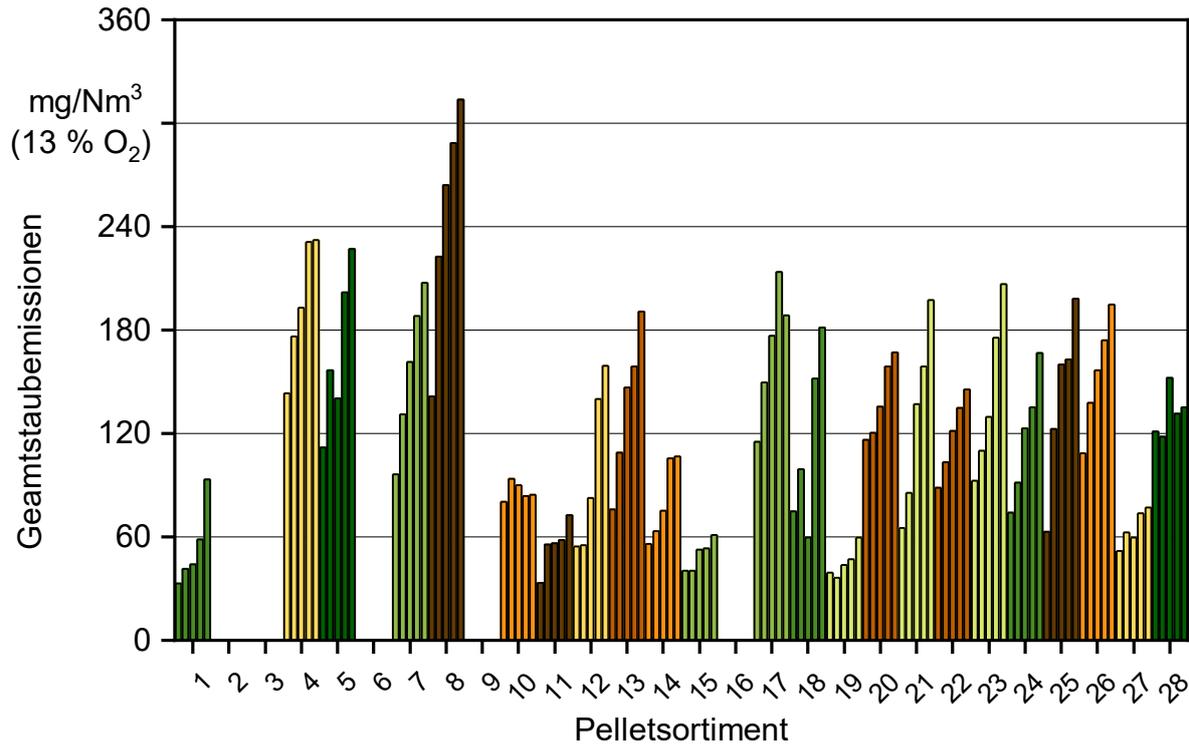


Abbildung 105: Einzelmesswerte der Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 1. Jede Säule stellt die Gesamtstaubemissionen während einer Staubbemessung (hier 15 min) dar.

Bei Pelletofen 2 (Abbildung 106) ist dieser Trend der ansteigenden Gesamtstaubemissionen nur für wenige Sortimente (2, 4, 16, 17) zu beobachten, ein sichtbarer Anstieg des Glutbetts wurde bei keinem der Versuche mit den marktverfügbaren Holzpellets beobachtet. Während der zyklischen Brennertopfreinigung liegen die Gesamtstaubemissionen für 16 der untersuchten Sortimente höher als der Mittelwert über die vorangegangenen vier Messungen ohne Reinigung, und bei zwölf Brennstoffen war der Wert während der Reinigung niedriger. Ein genereller Trend für den Einfluss der zyklischen Brennertopfreinigung auf die Gesamtstaubemissionen kann hier somit nicht abgeleitet werden. Durch die Brennertopfreinigung wird ein starker Anstieg des Glutbetts verhindert, wie es bei Pelletofen 1 beobachtet wurde.

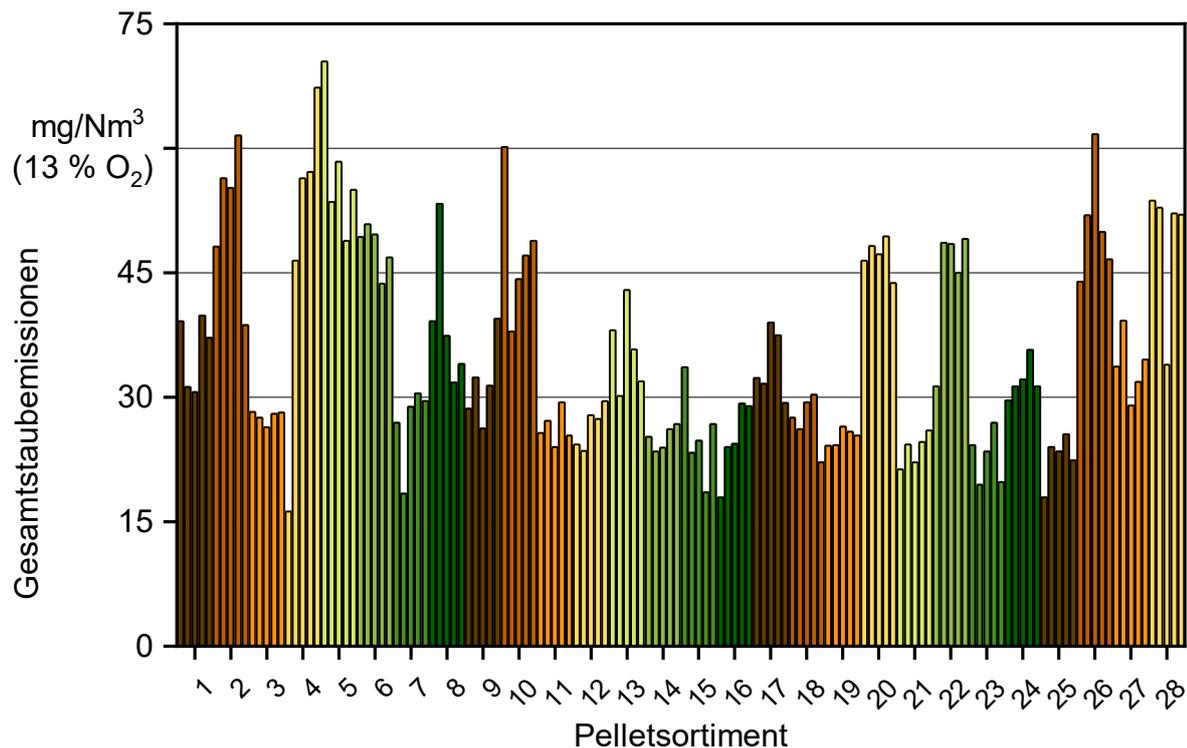


Abbildung 106: Einzelmesswerte der Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 2. Jede Säule stellt die Gesamtstaubemissionen während einer Staubbmessung (hier 14 min) dar. Bei Pelletofen 2 ist jeweils die fünfte Messung je Pelletsortiment die Messung, in der die Brennertopfreinigung stattfindet.

Die Gesamtstaubemissionen korrelieren mit den CO-Emissionen für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,61$) und für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,55$), wie Abbildung 107 zeigt. Da die CO-Emissionen ebenfalls mit den org.-C-Emissionen korrelieren, handelt es sich bei den Gesamtstaubemissionen wahrscheinlich zu einem großen Teil um Partikel aus der unvollständigen Verbrennung, wie z. B. Ruß und Teere (Abschnitt 7.1.3) [52]. Für Pelletofen 1 ist die Steigung der Ausgleichsgeraden wesentlich größer als bei Pelletofen 2. Dies könnte auf einen höheren Anteil an Ruß und unverbrannten Kohlenwasserstoffen an den Gesamtstaubemissionen von Pelletofen 1 hinweisen.

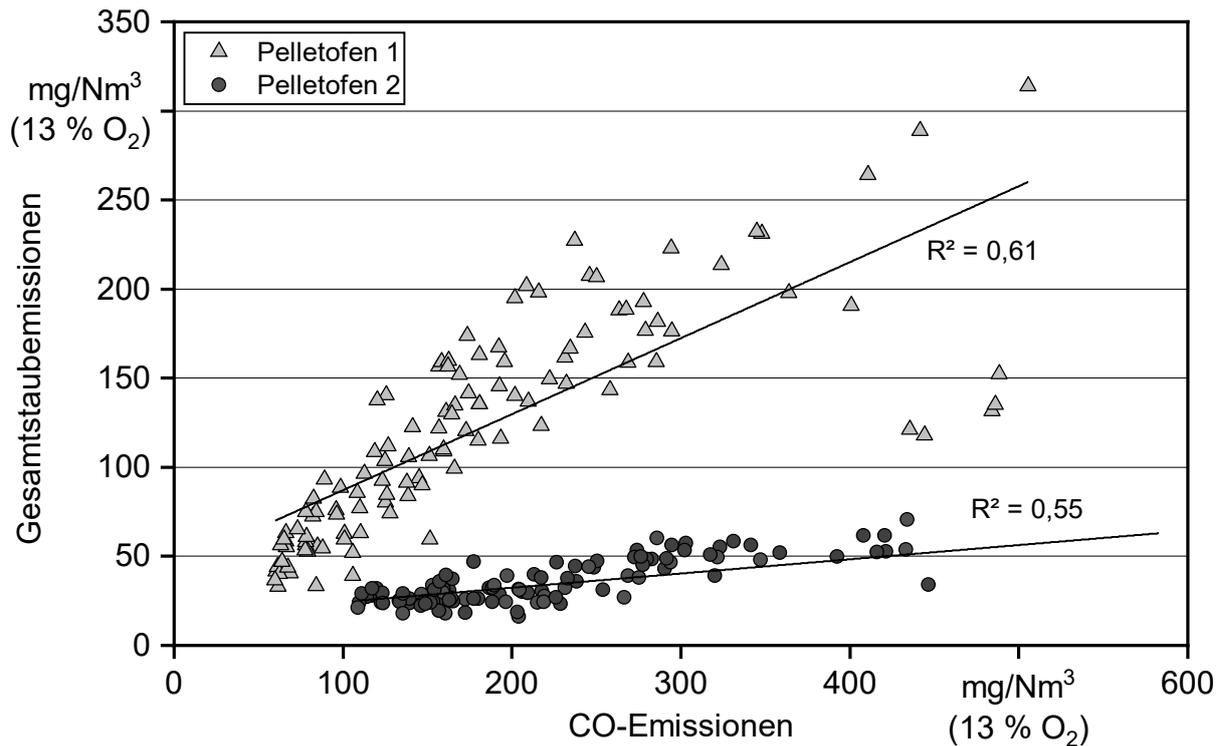


Abbildung 107: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von den CO-Emissionen der Einzelmessungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)

Ähnlich wie bei den CO-Emissionen scheinen die Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,53$) quadratisch mit dem Druckverlust anzusteigen, was sich mit dem beobachteten Anstieg des Glutbetts deckt. Bei Pelletofen 2 ($R^2 = 0,01$) ist kein Zusammenhang wie auch bei CO festzustellen. Hier scheint durch die Geometrie der Brennerschale und die Abstände der Sekundärluftdüsen der Einfluss des Brennstoffmassenstroms auf den Anstieg des Glutbetts und damit den Druckverlust minimiert zu sein (Unterkapitel 7.1).

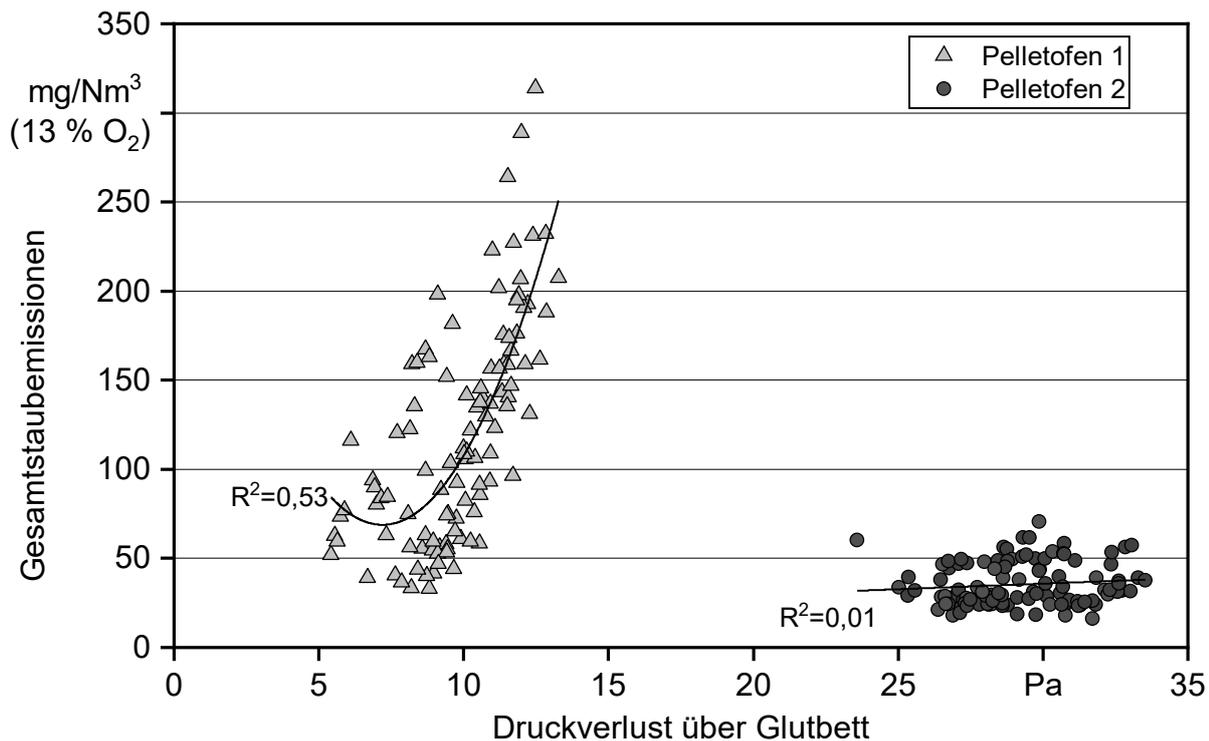


Abbildung 108: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen vom Druckverlust über das Glutbett für die Einzelmessungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)

Die Gesamtstaubemissionen zeigen daher auch einen linearen Anstieg mit steigendem Brennstoffmassenstrom (siehe Abbildung 109) für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,30$). Für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,01$) ist dieser Zusammenhang nicht gegeben.

Damit scheint das Emissionsverhalten von Pelletofen 1 generell maßgeblich von dem Druckverlust über das Glutbett bzw. dem Anstieg des Glutbetts, dem Luftverhältnis und dem Brennstoffmassenstrom beeinflusst zu sein. Für Pelletofen 2 sind diese einfachen Zusammenhänge mit grundlegenden verbrennungstechnischen Parametern nicht eindeutig erkennbar.

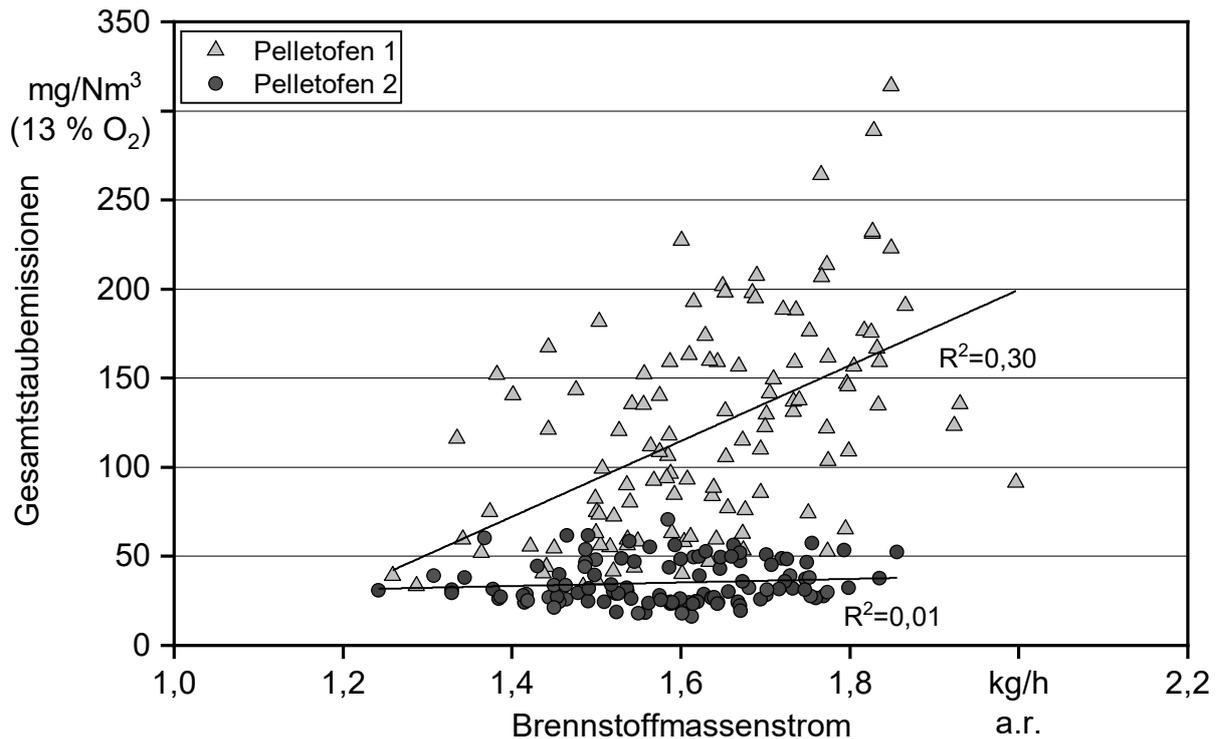


Abbildung 109: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen (Einzelmessungen) vom Brennstoffmassenstrom für die Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung)

Abbildung 110 zeigt die Gesamtstaubemissionen der ausgewählten marktverfügbaren Sortimente für die beiden Pelletkessel. Für Pelletkessel 1 liegen die Gesamtstaubemissionen zwischen 18 mg/Nm³ (Sortimente 8, 16, 19 und 24) und 41 mg/Nm³ für das Sortiment 28 mit dem höchsten Aschegehalt. Pelletkessel 1 wurde nicht auf einen bestimmten Brennstoff optimiert und es erfolgte keine zusätzliche Anpassung des Kessels an die Brennstoffparameter. Der Grenzwert der 1. BlmSchV für Zentralheizkessel von 20 mg/Nm³ wird hier für die Sortimente 17, 26 und 28 überschritten. Die während der Typenprüfung gemessenen mittleren Gesamtstaubemissionen von 14 mg/Nm³ (siehe Abschnitt 4.4.1, Tabelle 15) konnte mit keinem der hier verwendeten Sortimente erreicht werden. Bei Pelletkessel 2 liegen die mittleren Gesamtstaubemissionen für Sortiment 16 bei 3 mg/Nm³ und somit unter dem Wert aus der Typenprüfung von 4 mg/Nm³. Dieser sehr niedrige Wert im Rahmen dieser Untersuchungen wurde nur erreicht, da der Pelletkessel 2 speziell auf das Sortiment 16 eingestellt war, nach zahlreichen Vorversuchen im Rahmen eines Parallelprojekts. Daher führt die Verbrennung von Sortiment 28 – einem aschereicheren Brennstoff mit deutlich geringerer Schüttdichte – zu signifikant höheren Gesamtstaubemissionen in Höhe von 37 mg/Nm³. Für diese beiden Sortimente liegt Pelletkessel 2 zwar jeweils niedriger als Pelletkessel 1, allerdings ist auch der Unterschied von Sortiment 16 auf Sortiment 28 mit 34 mg/Nm³ wesentlich größer als bei Pelletkessel 1 mit 23 mg/Nm³. Der Gehalt aerosolbildender Elemente (Abschnitt 5.1.2) bewirkt bei den Pelletkesseln erhöhte Staubemissionen.

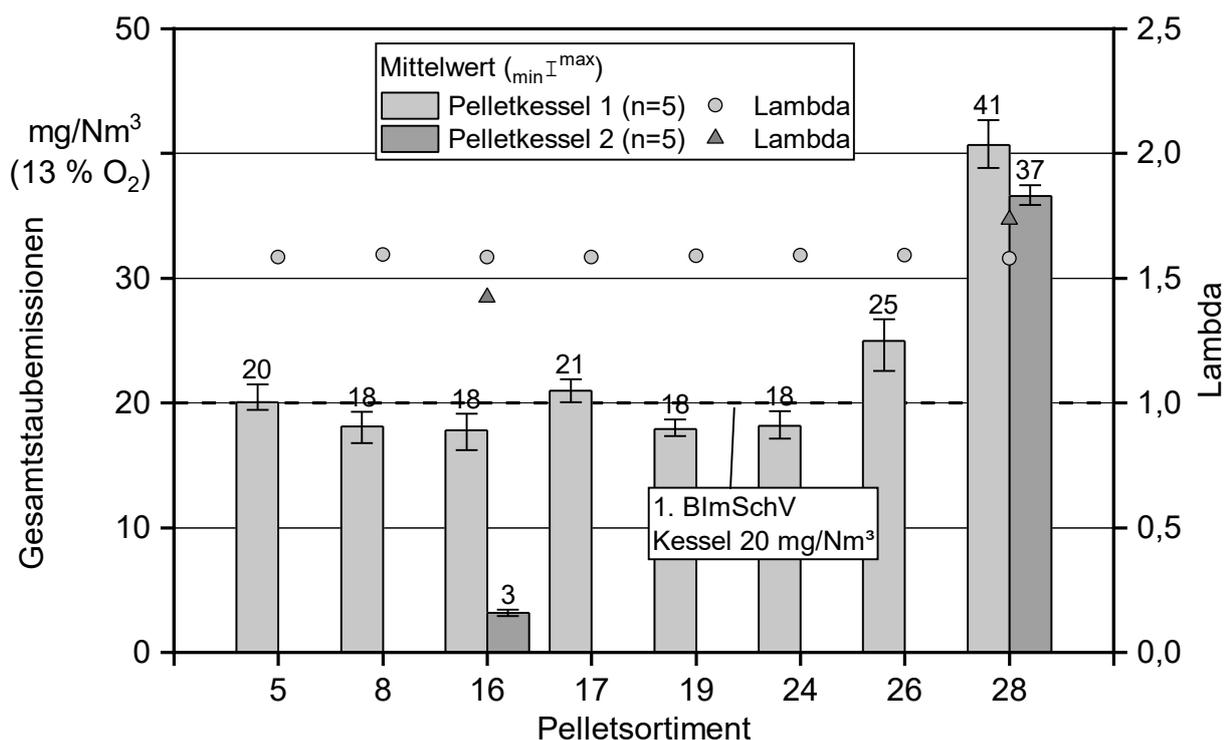


Abbildung 110: Gesamtstaubemissionen der untersuchten marktverfügbaren Pelletsortimente für Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2. Die gestrichelte Linie zeigt den aktuell gültigen Staubgrenzwert für automatisch beschickte Biomasseheizkessel der Stufe 2 nach der 1. BImSchV von 20 mg/Nm³.

Für automatisch beschickte Feuerungen ist eine Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen vom Gehalt an aerosolbildenden Elementen (K, Na, Zn und Pb) bekannt [84] [54]. Dieser Zusammenhang ist weder für Pelletöfen 1 ($R^2 = 0,01$) noch bei Pelletöfen 2 ($R^2 = 0,10$), jedoch für Pelletkessel 1 ($R^2 = 0,76$) und bei Pelletkessel 2 für die beiden untersuchten Brennstoffe erkennbar (siehe Abbildung 111). Daher ist zu vermuten, dass die Staubemissionen der Pelletöfen sich nicht primär aus den Salzen zusammensetzen, sondern aus Partikeln der unvollständigen Verbrennung wie Ruß oder Teere. Ein höherer Anteil an Partikeln aus unvollständiger Verbrennung bei Pelletöfen im Vergleich zu Pelletkesseln im Vollastbetrieb scheint typisch [67] und ist vermutlich der meist weniger ausgeprägten Luftstufung (Brennertopf), der geringeren Durchmischung (Turbulenz) und den niedrigeren Temperaturen in der Sekundärbrennkammer bei Pelletöfen geschuldet [67]. Zwei wesentliche Faktoren bei der Partikelbildung in Pelletöfen sind das Design des Brennertopfs sowie die Gestaltung und Anordnung der Luftdüsen [77]. Tiefere Brennertöpfe mit einer kleineren Rostfläche und einem größeren Abstand zwischen Primär- und Sekundärluftzufuhr erlauben eine bessere Luftstufung und Durchmischung der brennbaren Gase mit Sauerstoff [77]. Hierdurch lassen sich vermutlich auch die Unterschiede zwischen den Pelletöfen 1 und 2 erklären.

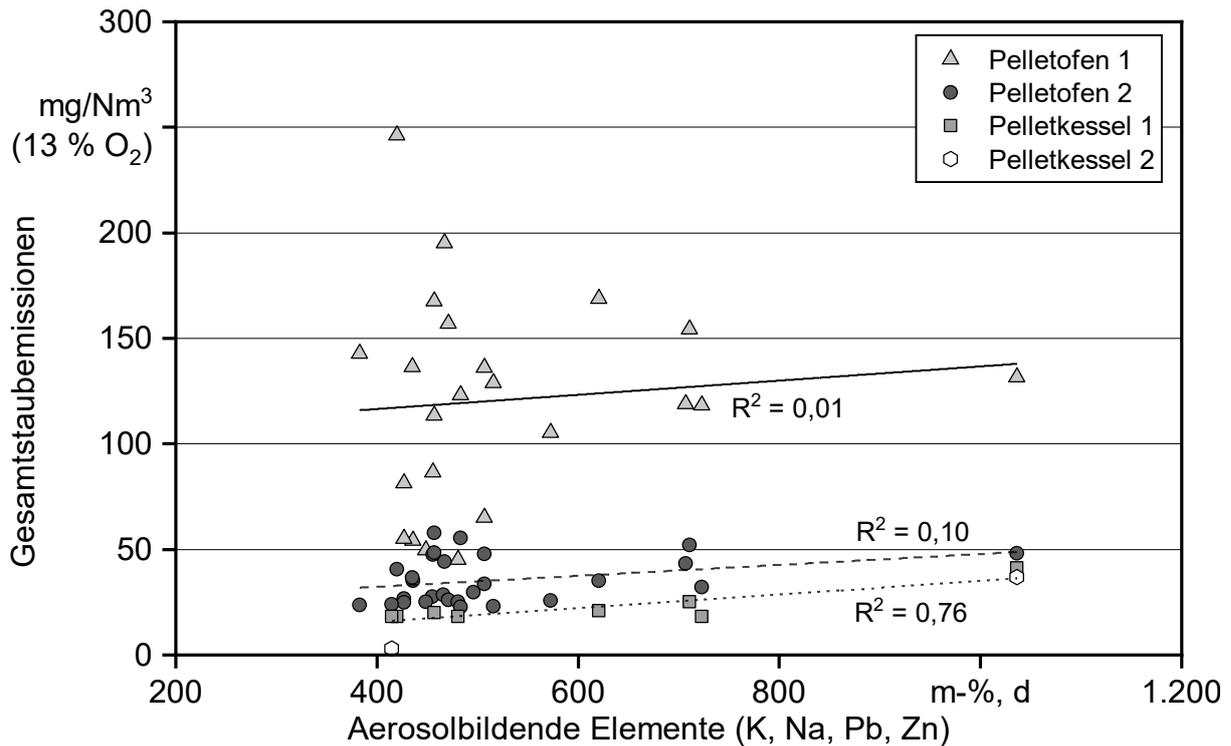


Abbildung 111: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von den aerosolbildenden Elementen für die Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigung), Pelletkessel 1 und Pelletkessel 2

7.1.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Gesamtstaubpartikel

Zusammensetzung der Staubpartikel. Für Pelletofen 2 wurde zur Staubanalytik meist der mit Staubpartikeln beladene Planfilter aus der vierten Messung verwendet. Unter Annahme einer gleichmäßigen Partikelverteilung auf dem Planfilter wurde dieser in vier bzw. acht gleichgroße Stücke vorsichtig geteilt. Diese Filterstücke wurden anschließend im Kohlenstoffanalysator (Abschnitt 4.3.2) entweder nach IC (anorganischer Kohlenstoff, z. B. Karbonate) oder nach OC (organischer Kohlenstoff, z. B. Teere) und EC (elementarer Kohlenstoff, z. B. Ruß oder mitgerissene Holzkohle) untersucht. Der Rest der Filterbeladung wird als Salze und Oxide der Stäube zusammengefasst. Für Pelletofen 1 war diese Untersuchung nicht möglich, da wegen der deutlich höheren Gesamtstaubemissionen zur Messung eine gestopfte Filterhülse vor den Planfilter geschaltet werden musste.

Tabelle 28 zeigt die Zusammensetzung der Staubbelaadungen der untersuchten Planfilter für Pelletofen 2. Der Hauptbestandteil ist dabei für die Sortimente 1, 2, 4, 5 und 23 elementarer Kohlenstoff (EC), wahrscheinlich größtenteils Ruß [67], mit bis zu 64 m-%. Für die restlichen Sortimente dominieren die Salze und Oxide, die aus den mineralischen Inhaltsstoffen des Brennstoffs während der Verbrennung entstehen (z. B. Kaliumverbindungen wie KCl, K₂SO₄, ...) mit bis zu 91 m-%. Bei den Sortimenten 20 und 22 liegen zu gleichen Teilen EC und Salze und Oxide vor. Als dritte relevante Komponente ist der organisch gebundene Kohlenstoff (z. B. Teere [67]) mit 3–19 m-% zu nennen. Der anorganische Kohlenstoff (Karbonate) spielt hier eine untergeordnete Rolle mit 0–11 m-%, wobei

nur bei den Sortimenten 6, 12, 22 und 25 nennenswerte Anteile vorliegen. IC könnte auf mitgerissene karbonathaltige Aschepartikel aus dem Glutbett hindeuten. Fasst man den Anteil an EC und OC zusammen und nimmt an, dass es sich dabei um Partikel aus der unvollständigen Verbrennung handelt, lässt sich schlussfolgern, dass bei 29 % der untersuchten Sortimente der Anteil an Partikeln aus der unvollständigen Verbrennung überwiegt (größer ist als 50 %). Damit ergibt sich ein erheblicher Optimierungsbedarf für diesen Pelletofen, um den Anteil von elementarem und organisch gebundenem Kohlenstoff und damit die Gesamtstaubemissionen um bis zu 50 % zu reduzieren.

Tabelle 28: *Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei den Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide in Prozent und in mg/Nm³ bei 13 % Bezugssauerstoff*

Pellet Nr.	IC	EC	OC	Salze und Oxide	IC	EC	OC	Salze und Oxide
	m-%	m-%	m-%	m-%	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
1	0	49	8	42	0	17	3	15
2	0	56	8	36	0	31	4	20
3	3	21	10	67	1	6	3	18
4	1	64	7	27	0	28	3	12
5	1	56	8	35	0	33	5	20
6	11	29	12	48	3	8	3	14
7	1	26	12	60	0	7	3	16
8	0	5	5	90	0	2	2	36
9	1	18	16	65	0	5	5	19
10	2	27	8	62	1	13	4	29
11	1	20	12	67	0	5	3	18
12	6	4	14	77	1	1	4	20
13	3	26	12	59	1	10	4	22
14	0	7	10	83	0	2	2	21
15	0	24	12	64	0	6	3	16
16	3	21	11	65	1	5	3	16
17	0	36	4	60	0	13	1	21
18	2	40	12	46	1	19	6	22
19	0	10	3	87	0	3	1	22
20	2	45	8	45	1	21	4	22
21	0	7	12	82	0	2	3	19
22	9	38	15	38	4	17	7	16
23	3	46	9	42	1	11	2	10
24	0	6	10	83	0	2	3	27
25	6	16	19	59	1	4	4	13

Pellet Nr.	IC	EC	OC	Salze und Oxide	IC	EC	OC	Salze und Oxide
–	m-%	m-%	m-%	m-%	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
26	3	27	13	57	1	14	7	30
27	0	38	9	53	0	13	3	18
28	0	0	9	91	0	0	4	44
Mittelwert	2	27	10	60	1	11	4	21
Minimum	0	0	3	27	0	0	1	10
Maximum	11	64	19	91	4	33	7	44

Für Pelletkessel 1 liegt der Hauptanteil der Gesamtstaubemissionen mit 85–99 m-% bei den Salzen und Oxiden (siehe Tabelle 29). Durch die niedrigen CO-Emissionen des Pelletkessels kommt es hier zu keiner Rußbildung, weshalb kein elementarer Kohlenstoff nachweisbar war. Auch der Anteil an organischem Kohlenstoff an den Gesamtstaubemissionen liegt hier mit 1–4 m-% deutlich niedriger als beim Pelletofen. Der Anteil an Karbonaten (IC) durch mitgerissene Aschepartikel liegt auf einem vergleichbaren Niveau mit dem Pelletofen, allerdings unterschieden sich die einzelnen Sortimente (z. B. Sortiment 28) deutlich zwischen Pelletofen 2 und Pelletkessel 1. Die Ergebnisse in Tabelle 29 zeigen, dass beim Pelletkessel im Vergleich zum Pelletofen ein sehr vollständiger Ausbrand stattfindet. Hier ergibt sich zumindest hinsichtlich der Partikel aus unvollständiger Verbrennung kaum weiteres Optimierungspotenzial. Für Pelletkessel 2 wurden die gebildeten Stäube nicht untersucht.

Tabelle 29: Zusammensetzung der Staubbelastung auf den Planfiltern bei den Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide in Prozent und mg/Nm³ bei 13 % Bezugssauerstoff

Pellet Nr.	IC	EC	OC	Salze und Oxide	IC	EC	OC	Salze und Oxide
–	m-%	m-%	m-%	m-%	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
5	3	0	2	95	1	0	0	19
8	4	0	2	94	1	0	0	17
16	2	0	2	96	0	0	0	17
17	3	0	2	95	1	0	0	20
19	1	0	2	97	0	0	0	17
24	0	0	1	99	0	0	0	18
26	1	0	1	99	0	0	0	25
28	11	0	4	85	4	0	2	35
Mittelwert	3	0	2	95	1	0	0	21
Minimum	0	0	1	85	0	0	0	17
Maximum	11	0	4	99	4	0	2	35

Partikelanzahl und Anzahlverteilung. Die mittels ELPI+ ermittelten Partikelanzahlen und die prozentualen Partikelanzahlverteilungen sind in Tabelle 30 zusammengestellt. Der ELPI+ besitzt 14 Impaktorstufen zwischen 9,1 nm und 7,3 µm. Um die Vergleichbarkeit wegen Störgrößen zu verbessern und einen besseren Überblick zu ermöglichen, wurden immer drei Impaktorstufen zu einem Größenbereich zusammengefasst. Auf den Impaktorstufen größer 731 nm wurden während der Messungen keine Partikel gefunden, daher sind diese hier nicht aufgeführt.

Tabelle 30: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer gemittelt (1 h) für die marktverfügbaren Sortimente an Pelletofen 1 und Pelletofen 2

Nr.	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletofen 1	Pelletofen 2
–	9–40 nm	9–40 nm	40–230 nm	40–230 nm	230– 731 nm	230– 731 nm	Summe	Summe
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[1/cm ³]	[1/cm ³]
1	5,6	6,8	89,4	86,4	5,1	6,8	6,5 × 10 ⁷	3,9 × 10 ⁷
2	–	4,6	–	88,8	–	6,6	–	6,1 × 10 ⁷
3	–	8,8	–	86,7	–	4,5	–	4,1 × 10 ⁷
4	2,5	4,0	86,6	91,2	10,9	4,8	1,6 × 10 ⁸	7,1 × 10 ⁷
5	3,9	4,7	86,8	86,4	9,2	8,9	1,2 × 10 ⁸	5,9 × 10 ⁷
6	–	5,6	–	88,9	–	5,5	–	3,7 × 10 ⁷
7	3,8	9,6	86,6	86,6	9,6	3,8	1,3 × 10 ⁸	4,6 × 10 ⁷
8	3,1	5,5	83,5	90,9	13,4	3,6	1,8 × 10 ⁸	6,7 × 10 ⁷
9	–	8,5	–	87,3	–	4,2	–	3,8 × 10 ⁷
10	5,1	5,8	86,9	87,5	8,0	6,8	8,0 × 10 ⁷	5,8 × 10 ⁷
11	7,1	7,2	86,8	88,6	6,1	4,2	6,0 × 10 ⁷	3,7 × 10 ⁷
12	4,1	9,9	87,3	86,9	8,5	3,1	9,1 × 10 ⁷	3,6 × 10 ⁷
13	4,7	4,9	84,9	90,1	10,4	5,1	1,3 × 10 ⁸	5,4 × 10 ⁷
14	6,2	9,8	84,0	87,2	9,8	3,0	6,9 × 10 ⁷	3,9 × 10 ⁷
15	5,2	9,2	89,1	86,7	5,7	4,1	6,6 × 10 ⁷	3,5 × 10 ⁷
16	–	8,9	–	85,9	–	5,1	–	3,5 × 10 ⁷
17	2,2	5,4	89,0	89,8	8,8	4,7	1,6 × 10 ⁸	5,5 × 10 ⁷
18	3,2	3,5	88,6	90,1	8,1	6,3	1,2 × 10 ⁸	6,0 × 10 ⁷
19	6,6	6,9	88,2	89,8	5,2	3,3	5,9 × 10 ⁷	4,1 × 10 ⁷
20	3,5	4,6	83,8	88,1	12,6	7,3	9,8 × 10 ⁷	4,9 × 10 ⁷
21	4,0	7,2	86,9	85,3	9,1	7,5	1,2 × 10 ⁸	2,9 × 10 ⁷
22	3,7	5,1	88,2	87,2	8,1	7,7	1,2 × 10 ⁸	5,0 × 10 ⁷
23	3,6	8,4	87,0	84,6	9,3	6,9	1,3 × 10 ⁸	3,3 × 10 ⁷
24	3,7	7,1	86,9	87,2	9,4	5,7	1,3 × 10 ⁸	4,0 × 10 ⁷
25	5,3	8,6	78,4	88,3	16,3	3,0	1,0 × 10 ⁸	4,0 × 10 ⁷

Nr.	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletofen 1	Pelletofen 2
–	9–40 nm	9–40 nm	40–230 nm	40–230 nm	230– 731 nm	230– 731 nm	Summe	Summe
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[1/cm ³]	[1/cm ³]
26	2,5	7,0	87,0	85,5	10,5	7,5	1,1 × 10 ⁸	5,0 × 10 ⁷
27	8,1	9,8	84,9	84,9	7,0	5,3	5,4 × 10 ⁷	3,5 × 10 ⁷
28	2,4	5,7	84,7	87,4	13,0	7,0	9,5 × 10 ⁷	4,4 × 10 ⁷
Mittelwert	4,4	6,9	86,3	87,7	9,3	5,4	1,1 × 10 ⁸	4,6 × 10 ⁷
Min	2,2	3,5	78,4	84,6	5,1	3,0	5,4 × 10 ⁷	2,9 × 10 ⁷
Max	8,1	9,9	89,4	91,2	16,3	8,9	1,8 × 10 ⁸	7,1 × 10 ⁷

Für Pelletofen 1 liegt die mittlere Anzahl der Partikel über die gesamte Messdauer zwischen $5,4 \times 10^7/\text{cm}^3$ und $1,8 \times 10^8/\text{cm}^3$ ($\bar{x} 1,06 \times 10^8$). Der Hauptanteil der Partikel liegt mit durchschnittlich 86,3 % im Größenbereich zwischen 40 nm und 230 nm. Die restlichen Partikel teilen sich in zwei Größenbereiche 230–731 nm ($\bar{x} 9,3$ %) und 9–40 nm ($\bar{x} 4,4$ %) auf. Die Anteile der verschiedenen Sortimente schwanken bei 40 nm und 230 nm ca. 3–8 %, bei 9–40 nm ca. 2–4 % um den Mittelwert und bei 230–731 nm ca. 4–7 %. Für Pelletofen 2 liegt die mittlere Anzahl der Partikel über die gesamte Messdauer (ohne die zyklische Brennertopfreinigung) zwischen $2,3 \times 10^7/\text{cm}^3$ und $7,1 \times 10^7/\text{cm}^3$ ($\bar{x} 4,6 \times 10^7$). Der Hauptanteil der Partikel liegt ebenfalls mit durchschnittlich 87,7 % im Größenbereich zwischen 40 nm und 230 nm. Die restlichen Partikel teilen sich für Pelletofen 2 in etwa gleichmäßig in zwei Größenbereiche 230–731 nm ($\bar{x} 5,4$ %) und 9–40 nm ($\bar{x} 6,9$ %) auf. Die Anteile der verschiedenen Sortimente schwanken bei 40 nm und 230 nm ca. 3 %, bei 9–40 nm ca. 3 % um den Mittelwert und bei 230–731 nm ca. 2–3 %. Im direkten Vergleich liegt die Gesamtzahl der Partikel für Pelletofen 1 beim ca. 2,4-Fachen im Vergleich zu Pelletofen 2. Die Verteilung der Partikel ist für beide Pelletöfen relativ ähnlich, Pelletofen 1 tendiert etwas mehr zu den größeren Partikeln als Pelletofen 2 und die Schwankungen innerhalb der Größenbereiche sind etwas größer.

Abbildung 112 zeigt die Korrelation zwischen Gesamtstaubemissionen und der Partikelanzahl für beide untersuchte Pelletöfen. Die lineare Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Partikelanzahl ist für Pelletofen 1 ($R^2 = 0,86$) stärker ausgeprägt als bei Pelletofen 2 ($R^2 = 0,57$). Dies könnte damit zusammenhängen, dass bei Pelletofen 1 tendenziell eher etwas größere Partikel gemessen wurden als bei Pelletofen 2. Größere Partikel sind unter Annahme einer ähnlichen Partikeldichte schwerer und führen somit zu höheren Gesamtstaubemissionen, die gravimetrisch bestimmt werden.

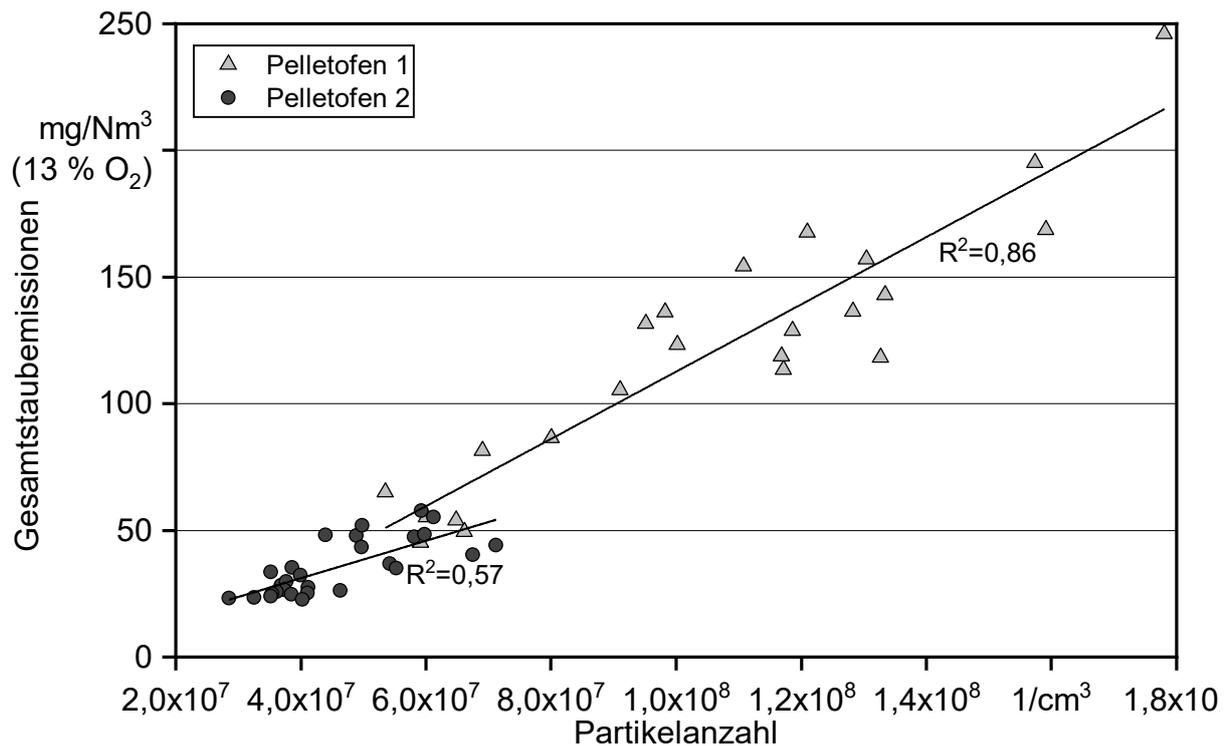


Abbildung 112: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Partikelanzahl bei den Messungen mit den marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 und Pelletofen 2 (ohne Reinigungsabbrand)

Für die beiden Pelletkessel wurden bei den Messungen mit den marktverfügbaren Pelletsortimenten keine Bestimmung der Partikelanzahl und Anzahlverteilung durchgeführt, da das Messgerät nicht zur Verfügung stand.

7.1.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Tabelle 31 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände der Feuerungsversuche der beiden Pelletöfen und Pelletkessel 1 sowie der PASSA-Methode. Zur Beurteilung der Verschlackungsneigung der Brennstoffe wird hier einmal der kumulative Siebrückstand von > 2 mm und von > 1 mm verglichen. Bei den Verbrennungsrückständen aus den Feuerungsversuchen wurden Holzkohle und unverbrannte Holzpellets vor der Siebung aussortiert, um nur die reine Aschefraktion zu beurteilen. Die PASSA-Methode wurde bei den marktverfügbaren Holzpellets nur an drei ausgewählten Sortimenten durchgeführt.

Bei Pelletofen 1 liegen die ermittelten Siebrückstände von > 2 mm zwischen 0 m-% (Sortiment 28) und 26,2 m-% (Sortiment 27, eventuell verfälschtes Ergebnis) der gesamten Aschemenge. Bei Pelletofen 2 weisen 0,1 m-% (Sortiment 28) bis 11,6 m-% (Sortiment 3) der gesamten Aschepartikel einen Durchmesser von > 2 mm auf. Für Pelletkessel 1 ergaben sich Anteile der Partikel > 2 mm von 1,6 m-% (Sortiment 28) bis 15,7 m-% (Sortiment 16). Im Vergleich der drei untersuchten Feuerungen weist der Pelletkessel 1 die höchsten Werte bei den Partikeln > 2 mm auf, was mit der höheren Brennraumtemperatur

beim Kessel zusammenhängen könnte. Ein weiterer Grund könnte in der deutlich längeren Versuchsdauer beim Pelletkessel 1 begründet liegen, während derer sich die Aschepartikel am Rost agglomerieren. Schließt man bei Pelletofen 1 Sortiment 27 aus der Betrachtung aus, ergibt sich ein Durchschnitt von 3,3 m-% und es liegen keine Werte mehr über 10 m-% im Gegensatz zu Pelletofen 2. Die größere Brennertopfgeometrie und die größeren Abstände der Stäbe am Boden des Brennertopfs zusammen mit einer wesentlich niedrigeren Brennraumtemperatur führen bei Pelletofen 1 vermutlich zu der etwas niedrigeren Verschlackungsanfälligkeit.

Alle drei Feuerungen weisen die niedrigsten Anteile an Partikeln > 2 mm für Sortiment 28 auf, obwohl es sich dabei um den aschereichsten Brennstoff im Rahmen der Untersuchungen handelt. Vergleicht man nur die Sortimente, die in allen drei Feuerungen untersucht wurden (5, 8, 17, 19, 24, 26 und 28), zeigt sich das Maximum der Partikel > 2 mm an allen drei Feuerungen bei Sortiment 17. Der zweithöchste Wert liegt dann für Pelletofen 1 bei Sortiment 19, für Pelletofen 2 bei Sortiment 5 und für Pelletkessel 1 bei Sortiment 24. Die Feuerungen scheinen unterschiedlich sensibel auf bestimmte Brennstoffeigenschaften und -zusammensetzungen zu reagieren.

Die PASSA-Methode, die für die Vorhersage der Verschlackungsneigung in Pelletkesseln entwickelt wurde, wurde nur auf die Sortimente 16, 24 und 26 angewandt. Hierbei ergaben sich Anteile an Aschepartikeln > 2 mm zwischen 14,8 m-% (Sortiment 26) und 19,9 m-% (Sortiment 24). Vergleicht man diese drei Sortimente mit den realen Feuerungen (für Sortiment 16 ohne Pelletofen 1), zeigt sich, dass die PASSA-Ergebnisse eher in der Größenordnung des Pelletkessels liegen und nicht mit den Beobachtungen bei den Pelletöfen übereinstimmen. Die PASSA-Methode überschätzt die Verschlackungsneigung bei den beiden verwendeten Pelletöfen deutlich.

Tabelle 31: *Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände aus den Feuerungsversuchen und aus der PASSA-Methode der marktverfügbaren Holzpellets für Aschepartikel > 2 mm und > 1 mm (– nicht bestimmt/gemessen)*

Pellet Nr.	Pelletofen 1 > 2 mm	Pelletofen 2 > 2 mm	Pellet- kessel 1 > 2 mm	PASSA > 2 mm	Pelletofen 1 > 1 mm	Pelletofen 2 > 1 mm	Pellet- kessel 1 > 1 mm	PASSA > 1 mm
–	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%
1	0,1	0,3	–	–	5,0	14,2	–	–
2	–	5,8	–	–	–	15,7	–	–
3	–	11,6	–	–	–	18,1	–	–
4	3,0	8,1	–	–	16,0	19,0	–	–
5	2,4	7,2	12,9	–	10,3	18,8	22,0	–
6	–	3,7	–	–	–	16,7	–	–
7	2,4	9,7	–	–	10,5	21,1	–	–
8	2,3	3,9	8,6	–	10,9	11,0	17,7	–
9	–	2,7	–	–	–	14,2	–	–

Pellet Nr.	Pelletofen 1 > 2 mm	Pelletofen 2 > 2 mm	Pellet- kessel 1 > 2 mm	PASSA > 2 mm	Pelletofen 1 > 1 mm	Pelletofen 2 > 1 mm	Pellet- kessel 1 > 1 mm	PASSA > 1 mm
–	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%
10	2,0	2,7	–	–	10,7	9,4	–	–
11	3,2	11,3	–	–	12,7	20,2	–	–
12	6,6	10,3	–	–	15,0	20,5	–	–
13	2,8	5,6	–	–	10,9	15,1	–	–
14	6,0	0,9	–	–	14,5	8,4	–	–
15	4,0	3,1	–	–	12,7	12,3	–	–
16	n. b.	5,0	15,7	16,3	n. b.	14,6	28,0	28,4
17	4,9	9,1	14,2	–	17,4	18,0	24,9	–
18	5,6	0,6	–	–	16,7	9,0	–	–
19	3,4	1,8	12,5	–	12,0	7,5	26,2	–
20	2,9	4,0	–	–	8,0	9,8	–	–
21	2,4	1,7	–	–	12,2	10,0	–	–
22	4,7	7,8	–	–	16,7	20,4	–	–
23	0,8	8,3	–	–	8,6	16,6	–	–
24	3,3	4,3	13,5	19,9	13,0	15,5	31,4	47,5
25	7,4	6,5	–	–	20,8	14,0	–	–
26	1,8	5,3	1,8	14,8	6,2	15,4	8,2	39,2
27	26,2	0,2	–	–	37,5	15,9	–	–
28	0,0	0,1	1,6	–	0,1	2,6	5,0	–
Mittelwert	4,3	5,1	10,1	17,0	13,0	14,4	20,4	38,3
Min	0,0	0,1	1,6	14,8	0,1	2,6	5,0	28,4
Max	26,2	11,6	15,7	19,9	37,5	21,1	31,4	47,5

Betrachtet man den Anteil der Partikel > 1 mm, ergeben sich für Pelletofen 1 Werte von 0,1 m-% (Sortiment 28) bis 37,5 m-% (Sortiment 27, eventuell verfälschtes Ergebnis), für Pelletofen 2 Werte von 2,6 m-% (Sortiment 28) bis 21,1 m% (Sortiment 7) und für Pelletkessel 1 Werte von 5,0 m-% (Sortiment 28) bis 31,4 m-% (Sortiment 24). Die niedrigsten Anteile > 1 mm ergeben sich wieder für Sortiment 28, jedoch ändern sich die Sortimente, die bei der jeweiligen Feuerung das Maximum aufweisen. Vergleicht man nur die Sortimente, die in allen drei Feuerungen verbrannt wurden, ergibt sich das Maximum für Partikel > 1 mm bei Pelletofen 1 für Sortiment 17, aber bei Pelletofen 2 für Sortiment 5 und bei Pelletkessel 1 für Sortiment 24.

Die PASSA-Methoden-Ergebnisse liegen bei den Partikeln > 1 mm zwischen 28,4 m-% (Sortiment 16) und 47,5 m-% (Sortiment 24) und damit wieder deutlich über den Werten der Feuerungsversuche. Im direkten Vergleich mit den Feuerungen werden bei > 1 mm das Minimum und das Maximum des Pelletofens erkannt, allerdings die Wirkung deutlich überschätzt. Im Vergleich zum Pelletkessel würde nur das Maximum, nicht aber das Minimum korrekt erkannt werden.

Vergleicht man die lineare Regression der Partikel > 2 mm (Abbildung 113) mit den aus der Elementaranalyse berechneten Verschlackungsindizes (Unterkapitel 3.2) mit der Regression für Partikel > 1 mm (Abbildung 114), fällt auf, dass der Zusammenhang des Anteils > 2 mm für die PASSA-Methode ($R^2 = 0,70$) wesentlich deutlicher mit den Verschlackungsindizes korreliert als für Aschepartikel > 1 mm. Beim Pelletkessel 1 korreliert dagegen der Anteil > 1 mm ($R^2 = 0,45$) etwas deutlicher als der Anteil > 2 mm ($R^2 = 0,33$). Für Pelletofen 2 und Pelletofen 1 (ohne Sortiment 27) zeigt sich im Bereich der Verschlackungsindizes bei den marktverfügbaren Holzpellets von ca. 0,6 mol/mol bis 1,3 mol/mol keine Abhängigkeit weder zu Partikeln > 2 mm noch zu Partikeln > 1 mm. Erst ab einem Verschlackungsindex von über 2,5 kann von einer niedrigeren Ascheschmelztemperatur ausgegangen werden.

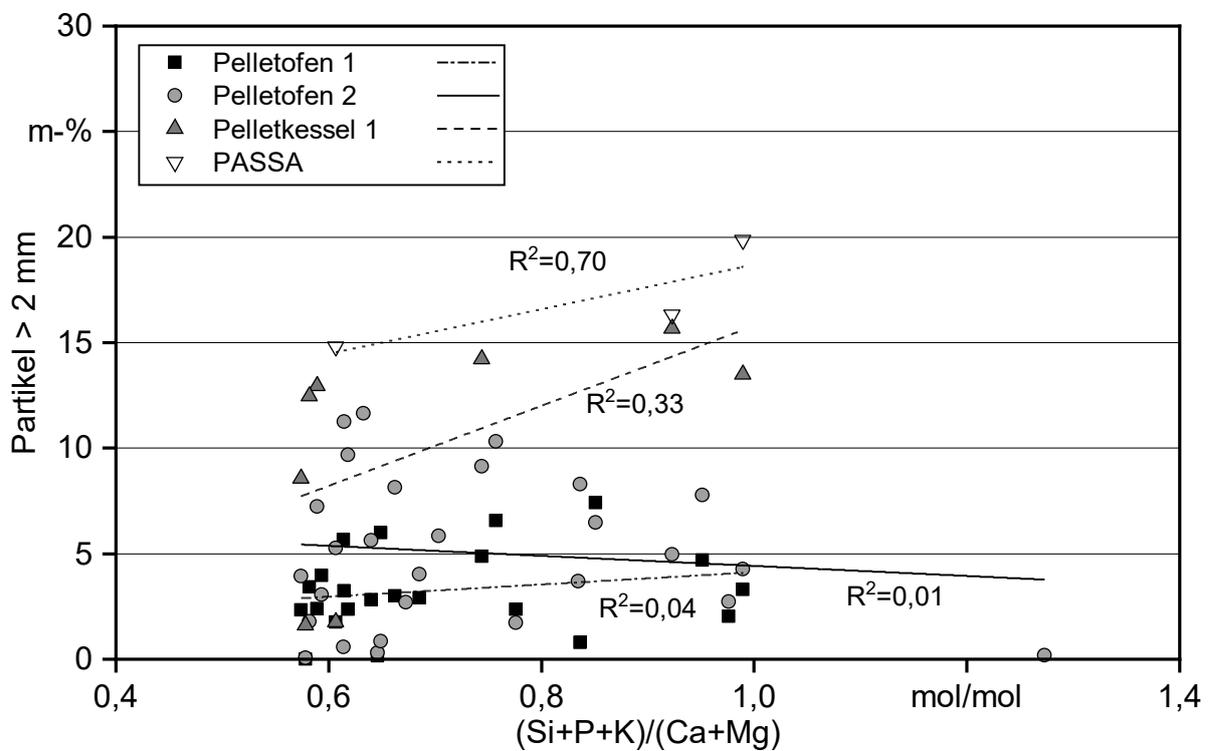


Abbildung 113: Abhängigkeit des Anteils von Aschepartikeln > 2 mm an der gesamten Asche für die untersuchten marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 (ohne Sortiment 27), Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und PASSA-Methode

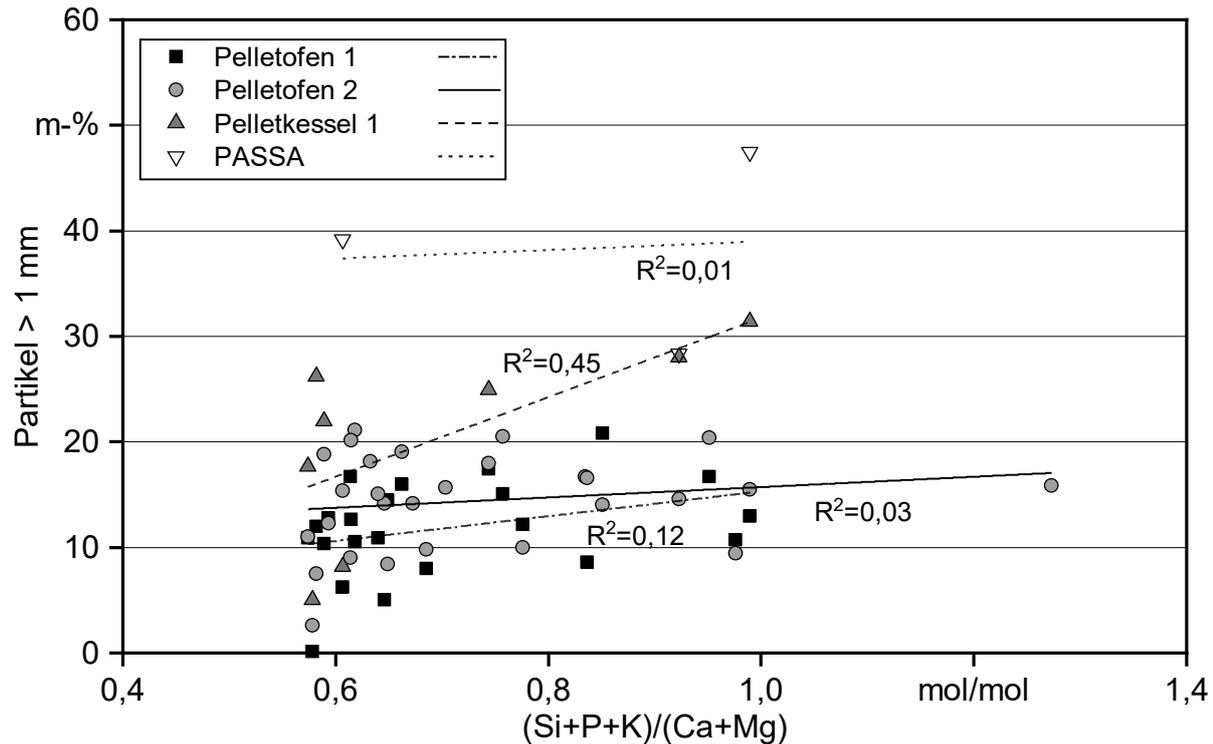


Abbildung 114: Abhängigkeit des Anteils von Aschepartikeln > 1 mm an der gesamten Asche für die untersuchten marktverfügbaren Holzpellets für Pelletofen 1 (ohne Sortiment 27), Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und PASSA-Methode

7.1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die untersuchten marktverfügbaren Holzpellets weisen trotz A1-Qualität deutliche Unterschiede im Emissionsverhalten auf, sowohl bei den Pelletöfen als auch beim Pelletkessel. Die Wahl des Brennstoffs entscheidet darüber, ob die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können oder nicht. So liegt die Bandbreite der CO-Emissionen zwischen 68 und 468 mg/Nm³ für Pelletofen 1, während bei Pelletofen 2 CO-Emissionen zwischen 130 und 429 mg/Nm³ nachgewiesen wurden. Dabei wurden die geringsten CO-Emissionen nicht für das gleiche Sortiment an Pelletofen 1 erzielt wie bei Pelletofen 2. Bei Pelletofen 1 wurde teilweise ein stark vom Druckverlust über das Glutbett oder vom Brennstoffmassenstrom abhängiges Emissionsverhalten festgestellt. Bei Betrachtung der Einzelwerte kann dies mit dem Aufbau des Glutbetts über die Messdauer von etwas mehr als zwei Stunden in Verbindung gebracht werden. Hier zeigt sich bei Pelletofen 1 ein technisches Defizit durch die nicht vorhandene Leistungsregelung bzw. durch die kaum mögliche automatische Anpassung der Brennstoffzufuhr, was bei Pelletofen 2 zumindest teilweise vorhanden ist. Die Gesamtstaubemissionen variieren zwischen 45 und 246 mg/Nm³ bei Pelletofen 1 und zwischen 22 und 58 mg/Nm³ auf einem deutlich niedrigeren Niveau bei Pelletofen 2. Dabei setzen sich bei Pelletofen 2 zu einem großen Teil die Partikel aus der unvollständigen Verbrennung (Ruß und Teere) zusammen, was vermutlich für Pelletofen 1 noch stärker ausgeprägt ist, jedoch aufgrund der vorgeschalteten Staubmesshülse nicht analysiert werden konnte.

Beim Pelletkessel liegen die Gesamtstaubemissionen größtenteils unter dem derzeit gültigen Grenzwert von 20 mg/Nm^3 , die Partikel bestehen überwiegend aus Salzen und Oxiden, die aus der Brennstoffzusammensetzung resultieren. Im Vergleich dazu besteht bei den Pelletöfen noch erhebliches Minderungspotenzial durch eine entsprechende Optimierung der Feuerungstechnik. Während Pelletofen 1 und Pelletkessel 1 eine deutliche Übereinstimmung bei der Verschlackung in Form von Aschepartikeln $> 2 \text{ mm}$ zeigen, ist dies für Pelletofen 2 nicht der Fall. Hier scheinen weitere Mechanismen einen Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten bzw. die Versinterung zu haben.

Es konnten für die Pelletöfen weder bei den gasförmigen noch den Gesamtstaubemissionen eindeutige Beziehungen zu einzelnen Brennstoffparametern der untersuchten Sortimente, wie z. B. zwischen Gesamtstaub und aerosolbildenden Elementen, identifiziert werden. Daher wird dieser Teil der Betrachtung in der statistischen Gesamtauswertung der Messergebnisse nochmals vertieft betrachtet (siehe Unterkapitel 7.3). Insgesamt scheint eine weitergehende Normierung der Brennstoffparameter hinsichtlich der großen Bandbreite bei den Emissionen der hier untersuchten marktverfügbaren A1-Pellets durchaus sinnvoll. Hierzu werden Ansatzpunkte in Unterkapitel 9.1 diskutiert (siehe Tabelle 70).

7.2 Versuchspellets mit definierten Eigenschaften und Ausgangsmaterialien

Die in Abschnitt 4.2.3 sowie Unterkapitel 5.2 beschriebenen Versuchspellets mit definierten Eigenschaften wurden sämtlich am Pelletofen 2 und eine Auswahl am Pelletkessel 1 hinsichtlich ihres Emissionsverhalten untersucht. In den folgenden Abschnitten werden die Versuchspellets nochmals hinsichtlich der zu untersuchenden Einflussgrößen wie folgt unterteilt:

- Einfluss der Pelletlänge (Abschnitt 7.2.1),
- Einfluss des Wassergehalts (Abschnitt 7.2.2),
- Einfluss des Feinanteils (Abschnitt 7.2.3),
- Einfluss der Rohstoffaufbereitung, der Lagerung und der Additivierung von Fichtenpellets (Abschnitt 7.2.4),
- Einfluss der Holzart (Abschnitt 7.2.6).

7.2.1 Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen

Zur Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge wurden vom Projektpartner DEPI Fichtenpellets unterschiedlicher Längenverteilungen hergestellt (Abschnitt 5.2.1). Diese kurzen, mittleren und langen Pellets kamen an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 zum Einsatz, wobei die Feuerung – wie in der Praxis – nicht speziell an variierende Schüttdichten angepasst wurde. Lediglich bei Pelletofen 2 wurde eine zusätzliche Versuchsreihe mit jeweils angeglichenem Brennstoffmassenstrom zwischen den Sortimenten durchgeführt. Dabei wurde der Brennstoffmassenstrom über einen Korrekturfaktor in der Ofenregelung

auf das Niveau des Sortimentes mit der langen Verteilung angepasst, da die Korrektur des Brennstoffinputs bei Pelletofen 1 nur nach unten hin möglich war. Außerdem wurde wegen der unter Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Inhomogenitäten bei den aerosolbildenden Elementen an Pelletofen 2 eine Versuchsreihe mit aus einer homogenen Pelletprobe (Säcke, 3 × 15 kg, Sortiment 16) abgeseibten Pelletlängenverteilungen durchgeführt, um eventuelle Einflüsse von Inhomogenität der größeren Pelletlieferungen des DEPI auszuschließen. Dabei wurden die Pellets mit einer 2-D-Siebmaschine mit Rundlochsieben mit einem Lochdurchmesser von 5 mm, 8 mm und 16 mm gesiebt. Verbrannt wurde dann der Rückstand auf dem 5-mm-Sieb (d. h. 5–8 mm) zusammen mit den Pellets auf dem 8-mm-Sieb (d. h. 8–16 mm).

Tabelle 32 zeigt die relevanten Brennstoffparameter für die Untersuchung zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen. Der Massenanteil der Pellets < 10 mm liegt für das kurze Sortiment (\bar{x} 10,3 mm) am höchsten mit 37,4 m-%, jedoch für das mittlere Sortiment (\bar{x} 15,5 mm) mit 2,8 m-% niedriger als für das lange Sortiment (\bar{x} 17,0 mm) mit 5,1 m-%. Dies liegt daran, dass aus dem mittleren Sortiment der Anteil an kurzen Pellets mit einer Sortieranlage entfernt wurde. Bei der Versuchsreihe mit den abgeseibten Pellets weist die Charge 5–8 mm eine mittlere Pelletlänge von 15,5 mm, vergleichbar zu Sortiment „mittel“, und einen Anteil von Pellets > 10 mm von 7,8 m-%, eher vergleichbar mit Sortiment „lang“, auf. Die Fraktion 8–16 mm hebt sich dagegen mit einer mittleren Pelletlänge von 20,6 mm und 0 m-% (< 10 mm) doch deutlich ab. Durch den Umstand, dass beim Sieben Pellets durch die Siebbewegung kippen und senkrecht durch die Sieböffnungen rutschen, ergibt sich eine, verglichen mit der Nennweite des Siebs, deutlich längere mittlere Pelletlänge des jeweiligen Siebrückstands bei 5–8 mm bzw. 8–16 mm. Die Energiedichte nimmt mit zunehmender Pelletlänge von 12,4 GJ/m³ (kurz) auf 11,6 GJ/m³ (lang) um insgesamt 6 % ab, während die Schüttungsporosität von 0,458 (kurz) auf 0,489 (lang) um ca. 7 % zunimmt. Damit liegen diese Pellets in etwa auf demselben Niveau wie das Sortiment „mittel“. Für die gesiebten Varianten wurden diese Parameter aufgrund der kleinen Probenmenge nicht separat bestimmt.

Tabelle 32: Relevante Brennstoffparameter für die Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge (n. b. – nicht bestimmt)

Sortiment	mittlere Pelletlänge	Pellets < 10 mm	Energiedichte	Schüttungsporosität
–	mm	m-%	GJ/m ³	–
kurz	10,3	37,4	12,4	0,458
mittel	15,5	2,8	12,2	0,464
lang	17	5,1	11,6	0,489
kurz angepasst	10,3	37,4	12,4	0,458
mittel angepasst	15,5	2,8	12,2	0,464
gesiebt 5–8 mm	15,5	7,8	n. b.	n. b.
gesiebt 8–16 mm	20,6	0,0	n. b.	n. b.

Tabelle 33 gibt einen Überblick über die wichtigsten feuerungstechnischen Parameter während der Versuchsreihen zum Einfluss der Pelletlänge für Pelletofen 2. Ohne Anpassung der Regelungsparameter beeinflusst die mittlere Pelletlänge beim Pelletofen deutlich den Brennstoffmassenstrom. Ein Anstieg der Pelletlänge um 6,3 mm von kurz auf lang bewirkt eine signifikante Reduzierung des Brennstoffmassenstroms um 20 % und ein Anstieg der Pelletlänge um 5,2 mm (kurz auf mittel) reduziert ihn um 6 %. Durch die Erhöhung der Brennstoffzufuhr sinken die Lambda-Werte signifikant von 3,3 (lang) über 2,7 (mittel) nach 2,4 (kurz) mit Reduzierung der Pelletlänge ab. Dies zeigt auch, dass der Pelletofen 2 weder die Brennstoffzufuhr in geeignetem Maß zurückregeln noch die Luftzufuhr an den gesteigerten Brennstoffmassenstrom anpassen kann. Die Unterschiede im Brennstoffmassenstrom kombiniert mit der von der Pelletlänge maßgeblich beeinflussten Energiedichte sowie der Schüttungsporosität führen zu einer Brennraumtemperatur von 645 °C bei Verwendung der kurzen und 561 °C bei Verwendung der langen Pellets. Die Glutbetttemperatur liegt dagegen nur für das kurze Sortiment mit 866 °C um ca. 63 K signifikant höher als für die mittleren und langen Pellets. Hier könnte eventuell der hauptsächlich durch die Sortierung niedrige Anteil an Pellets < 10 mm die Glutbetttemperatur der mittleren Pellets neben der Schüttungsporosität beeinflusst haben. Der Druckverlust über das Glutbett sinkt mit zunehmender Pelletlänge (Schüttungsporosität) signifikant von 31,2 Pa (kurz) auf 26,5 Pa (lang).

Durch die Anpassung der Schneckendrehzahl auf das Niveau des langen Sortiments konnte der Brennstoffmassenstrom bei 1,24 kg/h und 1,29 kg/h annähernd konstant gehalten werden. Im direkten Vergleich ergibt sich die höchste Brennraumtemperatur auch hier wieder für das kurze Sortiment (593 °C) und die niedrigste für das lange Sortiment (561 °C). Allerdings sind die Unterschiede relativ gering. Interessanterweise weisen die „kurzen“ Pellets bei angepasstem Brennstoffmassenstrom die niedrigste Glutbetttemperatur auf (756 °C) und die „mittleren“ Pellets die höchste (837 °C), die „langen“ Pellets liegen mit 802 °C dazwischen. Der Druckverlust sinkt für die kurzen und die mittleren Pellets durch die Anpassung der Brennstoffzufuhr um ca. 1 Pa (nicht signifikant).

Auf die Änderungen der Massenströme bzw. der damit zusammenhängenden feuerungstechnischen Parameter wird auch in den in Unterkapitel 3.3 bereits erwähnten Veröffentlichungen von WÖHLER ET AL. [95] und SIKANEN ET AL. [82] eingegangen. Allerdings wurde hier keine Anpassung der Brennstoffzufuhr vorgenommen. Zudem muss erwähnt werden, dass die mittleren Pelletlängen der untersuchten Sortimente bei WÖHLER ET AL. bei 17,5 mm (kurz), 19,5 mm (mittel) und 22,6 mm (lang) lagen [95] und damit wesentlich länger waren als die hier untersuchten Sortimente. In der Untersuchung von KHALSA ET AL. [53] wurden die Längenklassen 6 (6,5–9,5 mm), 12 (12,5–15,5 mm), 18 (18,5–21,5 mm) und 36 (34–40 mm) untersucht. Damit lassen sich die Ergebnisse der Längenklassen 6, 12 und 18 aus dieser Untersuchung näherungsweise mit den Sortimenten kurz, mittel und lang vergleichen. Die mittleren Pelletlängen der marktverfügbaren Pelletsortimente (Abschnitt 5.1.1) lagen zwischen 8,9 und 18,1 mm, daher decken die hier gewählten Sortimente „kurz“, „mittel“ und „lang“ die Bandbreite der marktverfügbaren Pellets gut ab.

Für das Sortiment „gesiebt 5–8 mm“ liegt der Brennstoffmassenstrom bei 1,43 kg/h, der Lambda-Wert bei 2,66, die Brennraumtemperatur bei 620 °C und der Druckverlust über

dem Glutbett bei 29,6 Pa. Für die Pellets „8–16 mm gesiebt“ sinkt der Brennstoffmassenstrom signifikant auf 1,27 kg/h ab und der Lambda-Wert steigt signifikant auf 3,0, ähnlich zu dem langen Pelletsortiment. Auch die Brennraumtemperatur mit 582 °C und der Druckverlust mit 26,3 Pa sind zum langen Sortiment gut vergleichbar. Die Glutbetttemperatur liegt vermutlich durch die noch einmal etwas längeren Pellets und den niedrigeren Anteil an Pellets < 10 mm mit 672 °C aber deutlich niedriger als bei den langen Pellets.

Tabelle 33: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter für die Versuche zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen für Pelletofen 2

Sortiment	Brennstoffverbrauch	Lambda	Brennraumtemperatur	Glutbetttemperatur	Druckverlust Glutbett
–	kg/h ar.	–	°C	°C	Pa
kurz	1,55 ± 0,06	2,4 ± 0,06	645 ± 15,9	866 ± 20,5	31,2 ± 0,7
mittel	1,46 ± 0,17	2,74 ± 0,33	624 ± 17,6	803 ± 6,7	30,1 ± 1,4
lang	1,24 ± 0,08	3,32 ± 0,48	561 ± 13,2	802 ± 8,5	26,5 ± 0,9
kurz angepasst	1,29 ± 0,04	3,05 ± 0,31	593 ± 14,9	756 ± 15,1	30,4 ± 1,1
mittel angepasst	1,25 ± 0,08	3,2 ± 0,28	562 ± 11,8	837 ± 19	29 ± 1,2
gesiebt 5–8 mm	1,43 ± 0,07	2,66 ± 0,04	620 ± 9,5	762 ± 17,8	29,6 ± 0,7
gesiebt 8–16 mm	1,27 ± 0,07	3 ± 0,08	582 ± 8	672 ± 14,2	26,3 ± 0,3

Bei Pelletkessel 1 (Tabelle 34) werden die Einflüsse der Pelletlänge auf den Brennstoffmassenstrom und die Lambda-Werte durch die Leistungsregelung in Verbindung mit der Lambdaregelung vollständig ausgeglichen. Damit sind keine Unterschiede bei Abgastemperatur und Wärmeleistung im Rahmen der Messgenauigkeit erkennbar.

Tabelle 34: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter für die Versuche zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen für Pelletkessel 1

Sortiment	Brennstoffverbrauch	Lambda	Abgastemperatur	Wärmeleistung
–	kg/h ar	–	°C	kW
kurz	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0	114,0 ± 1,6	14,2 ± 0,1
mittel	3,3 ± 0	1,6 ± 0	116,3 ± 1,5	14,2 ± 0,1
lang	3,2 ± 0	1,6 ± 0	113,6 ± 1,7	14,1 ± 0,1

7.2.1.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Bei unterbliebener Anpassung der Brennstoffzufuhr liegen die CO-Emissionen für die kurzen Pellets bei 219 mg/Nm³, bei 135 mg/Nm³ für die mittleren und bei 165 mg/Nm³ für die langen Pellets. Damit liegt das Optimum bei übereinstimmender Einstellung der Ofenregelung bei den mittleren Pellets. Die Mittelwerte unterscheiden sich aufgrund der Streuung der Messwerte aber nur je zu den kurzen Pellets, sie sind also nicht signifikant zwischen „mittel“ und „lang“. Durch die Anpassung der Brennstoffzufuhr lassen sich die CO-Emissionen der kurzen Pellets um 21 % auf 172 mg/Nm³ signifikant reduzieren und die der mittleren Pellets um 16 % auf 114 mg/Nm³ (nicht signifikant). Das Optimum ergibt sich abermals für die mittleren Pellets, hier sind die Unterschiede zu den beiden anderen Pelletsortimenten aufgrund der niedrigeren Streuung bei den mittleren Pellets signifikant. Bei den kurzen Pellets erhöht sich die Streuung der Einzelwerte deutlich.

Bei den gesiebten Pellets ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr zeigen sich die höheren CO-Emissionen mit 168 mg/Nm³ für das Sortiment 5–8 mm und die niedrigeren CO-Emissionen mit 120 mg/Nm³ für das Sortiment 8–16 mm. Die Mittelwerte unterscheiden sich aufgrund der hohen Streuung der Messwerte jedoch nicht signifikant. Damit entsprechen die CO-Emissionen des Sortiments 5–8 mm denen des langen Sortiments und die des Sortiments 8–16 mm denen der mittleren Pellets.

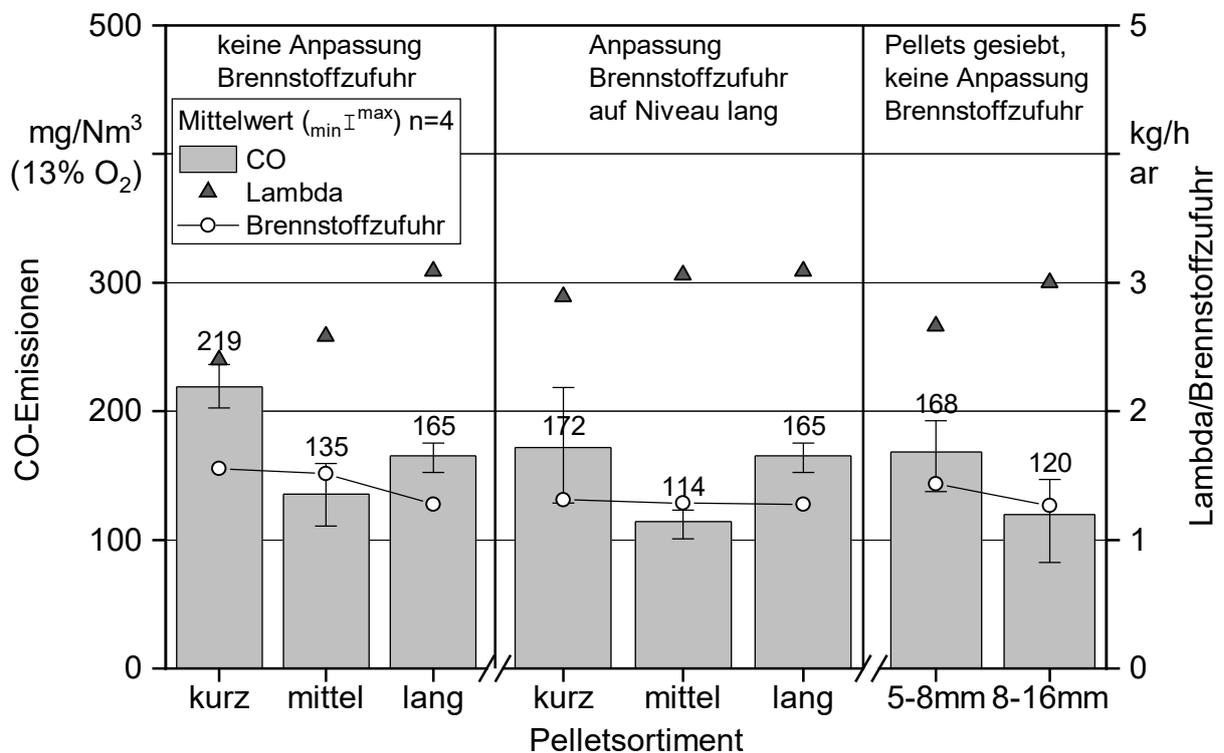


Abbildung 115: CO-Emissionen, Lambda und Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

Die CO-Emissionen zeigen für Pelletofen 2 (Abbildung 116) einen linearen Zusammenhang mit der mittleren Pelletlänge ($R^2 = 0,81$) und dem Massenanteil an Pellets < 10 mm ($R^2 = 0,86$), wobei die zunehmende Pelletlänge zu geringeren CO-Emissionen führt, aber der Anteil an Pellets < 10 mm die CO-Bildung begünstigt. Hierdurch lassen sich auch die Unterschiede zwischen den Sortimenten mittel und lang vs. 5–8 mm und 8–16 mm erklären. Das Aussortieren des Anteils an Pellets < 10 mm führt bei den mittleren Pellets zu niedrigen CO-Emissionen, nicht jedoch die generell niedrigere Pelletlänge. Somit ergibt sich hier hinsichtlich der CO-Emissionen ein genau umgekehrter Zusammenhang verglichen mit den Ergebnissen von WÖHLER ET AL. [95]. Im Vergleich zu KHALSA ET AL. [53] zeigt sich zwar ein ähnlicher Effekt zu kurzen und langen Pellets, jedoch führten, anders als hier, bei dieser Untersuchung die mittleren Pellets (LK 12) zu einer deutlichen Erhöhung der CO-Emissionen.

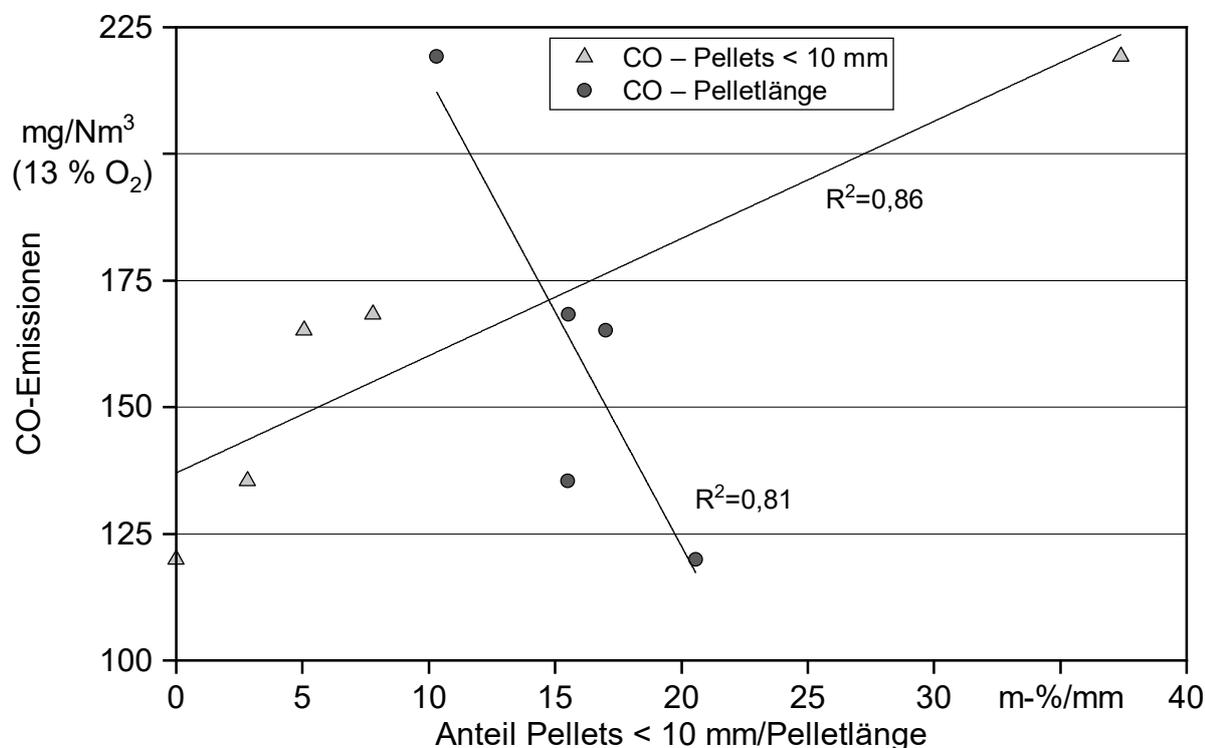


Abbildung 116: Abhängigkeit der mittleren CO-Emissionen von der Pelletlänge und dem Massenanteil an Pellets < 10 mm an Pelletofen 2

Für Pelletkessel 1 (Abbildung 117) liegen die CO-Emissionen für das lange Sortiment tendenziell etwas höher als bei dem kurzen und mittleren Sortiment, der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. Die CO-Emissionen liegen insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau, was für Pelletkessel typisch ist.

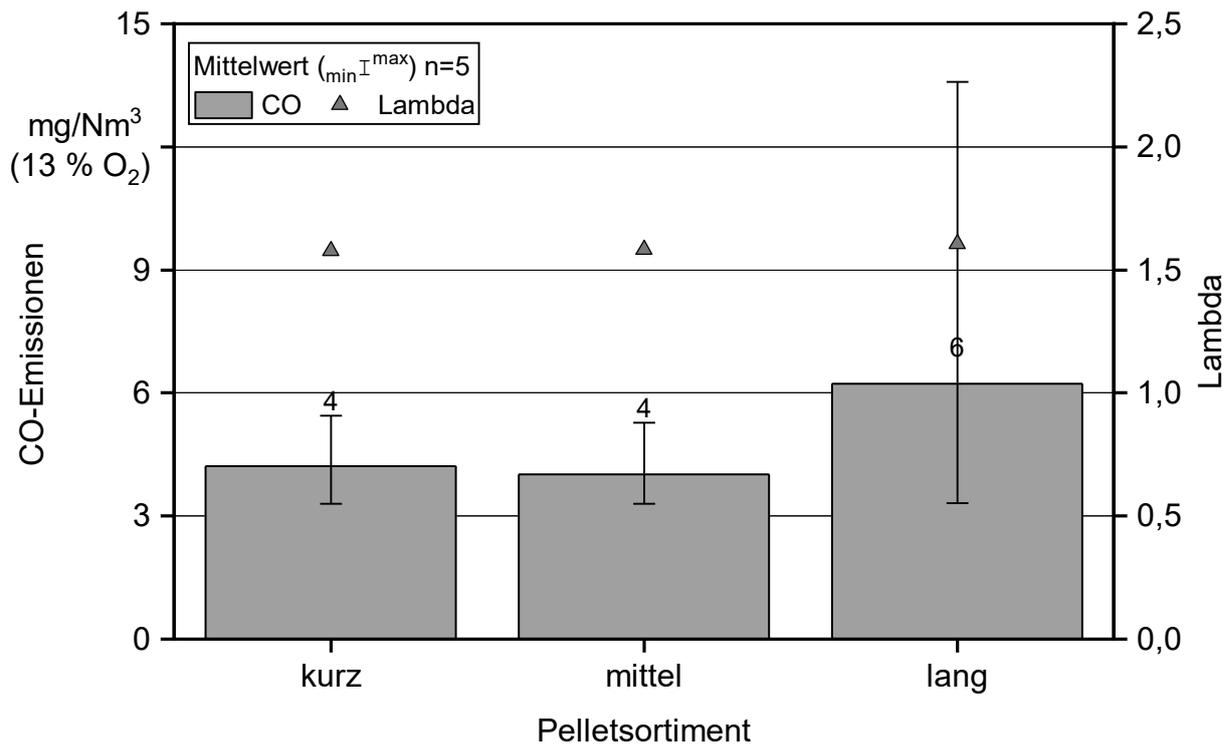


Abbildung 117: CO-Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletkessel 1 ($n = 5$)

Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen (org.-C). Die org.-C-Emissionen verhalten sich für Pelletofen 2 von den Tendenzen her wie die CO-Emissionen für die jeweiligen Sortimenten (Abbildung 118). Im Unterschied zu den CO-Emissionen führt die Anpassung der Brennstoffzufuhr bei den kurzen Pellets eher zu einer leichten Erhöhung der org.-C-Emissionen von 7 mg/Nm³ auf 8 mg/Nm³. Auch zeigen die org.-C-Emissionen der Sortimenten mittel und lang mit 5–8 mm und 8–16 mm wie bei den CO-Emissionen ein bei steigender Pelletlänge gegenläufiges Verhalten. Signifikant unterscheiden sich die Mittelwerte der org.-C-Emissionen nur zwischen den Sortimenten mittel und kurz, bei angepasstem Brennstoffmassenstrom zwischen allen drei Sortimenten.

Die lineare Regression der org.-C-Emissionen mit dem Anteil an Pellets < 10 mm ($R^2 = 0,76$) sowie der mittleren Pelletlänge ($R^2 = 0,73$) in Abbildung 119 zeigt, wie bei den CO-Emissionen, einen dämpfenden Einfluss der Pelletlänge, der etwas schwächer ist als der steigernde Einfluss des Anteils an Pellets < 10 mm auf die org.-C-Emissionen. Auch hier ergibt sich ein entgegengesetzter Effekt im Vergleich zu der Untersuchung von WÖHLER ET AL. [95] sowie KHALSA ET AL. [53], die hier steigende org.-C-Emissionen mit der Pelletlänge ermittelten. Zudem ergaben sich bei KHALSA ET AL. [53] – wie auch bei CO – höhere Emissionen für das mittlere Sortiment, verglichen mit dem kurzen und langen Sortiment.

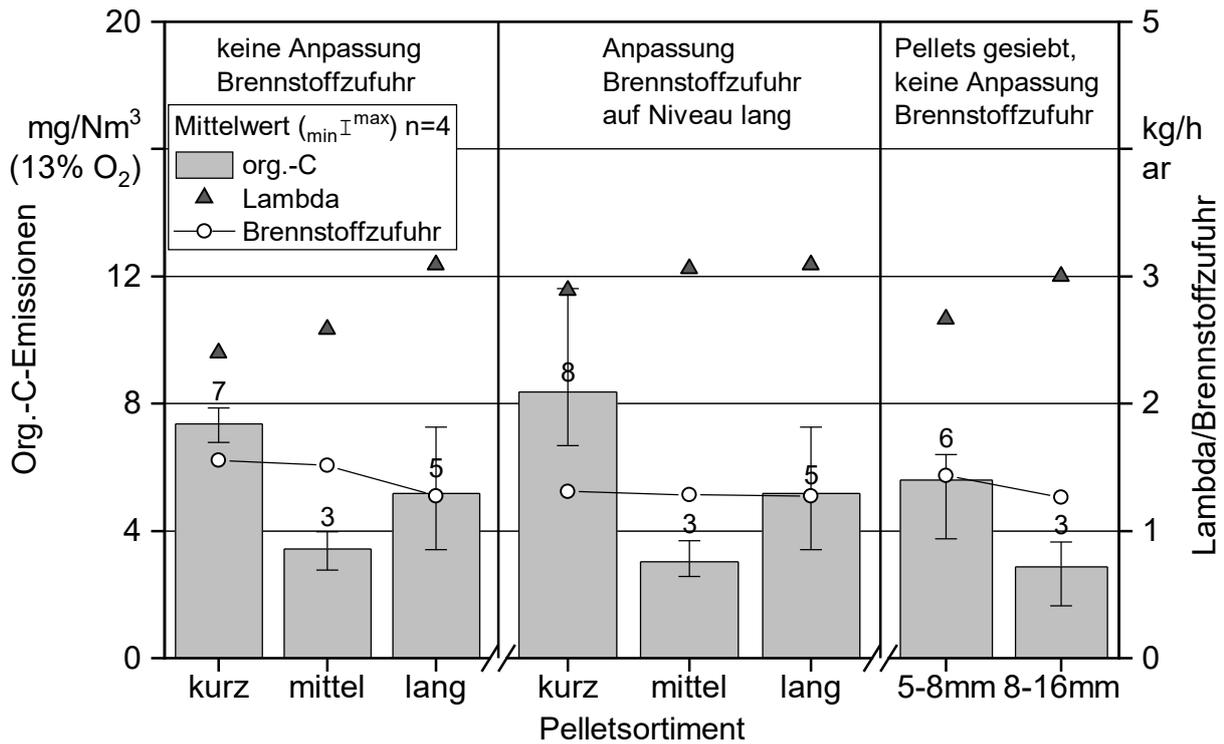


Abbildung 118: Org.-C-Emissionen, Lambda und Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

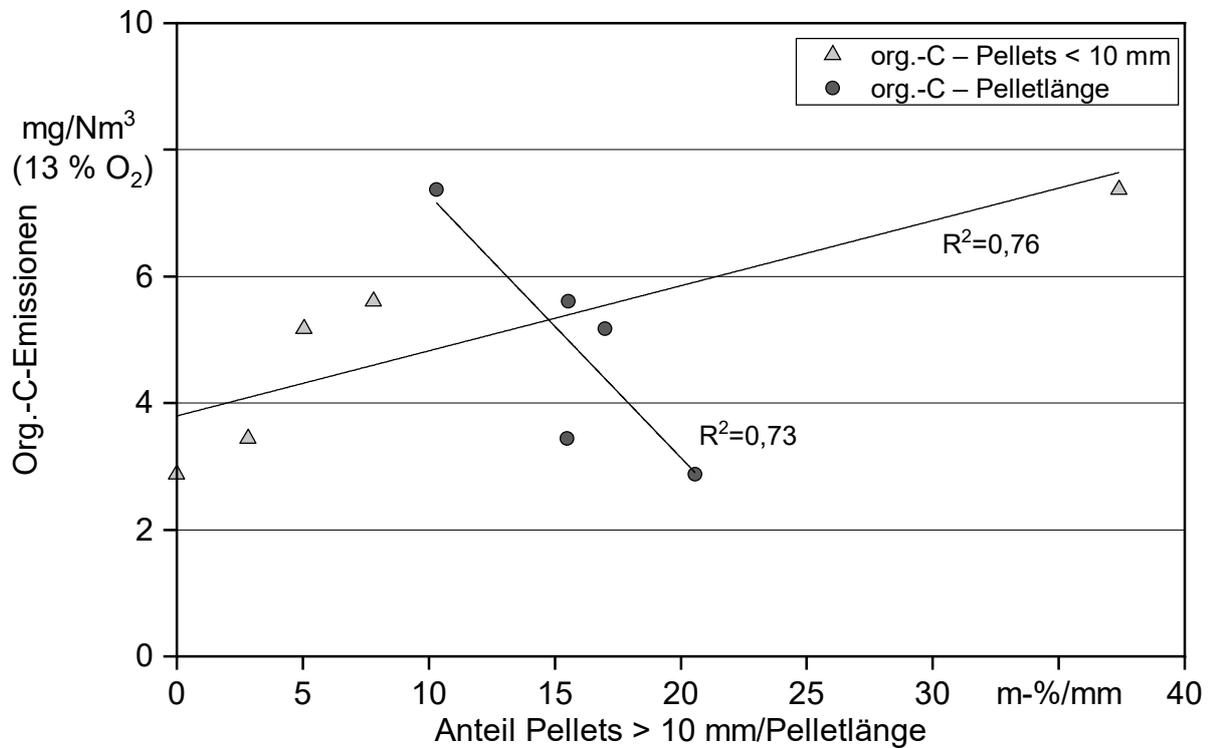


Abbildung 119: Abhängigkeit der org.-C-Emissionen von der Pelletlänge und dem Massenanteil an Pellets < 10 mm zur Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge an Pelletofen 2

Für Pelletkessel 1 sanken tendenziell die org.-C-Emissionen von den kurzen ($0,5 \text{ mg/Nm}^3$) über die mittleren ($0,4 \text{ mg/Nm}^3$) zu den langen Pellets ($0,2 \text{ mg/Nm}^3$) minimal (Abbildung 120). Die Messwerte liegen aber im Bereich der Bestimmungsgrenze des verwendeten Messgeräts und werden hier nur der Vollständigkeit halber dargestellt.

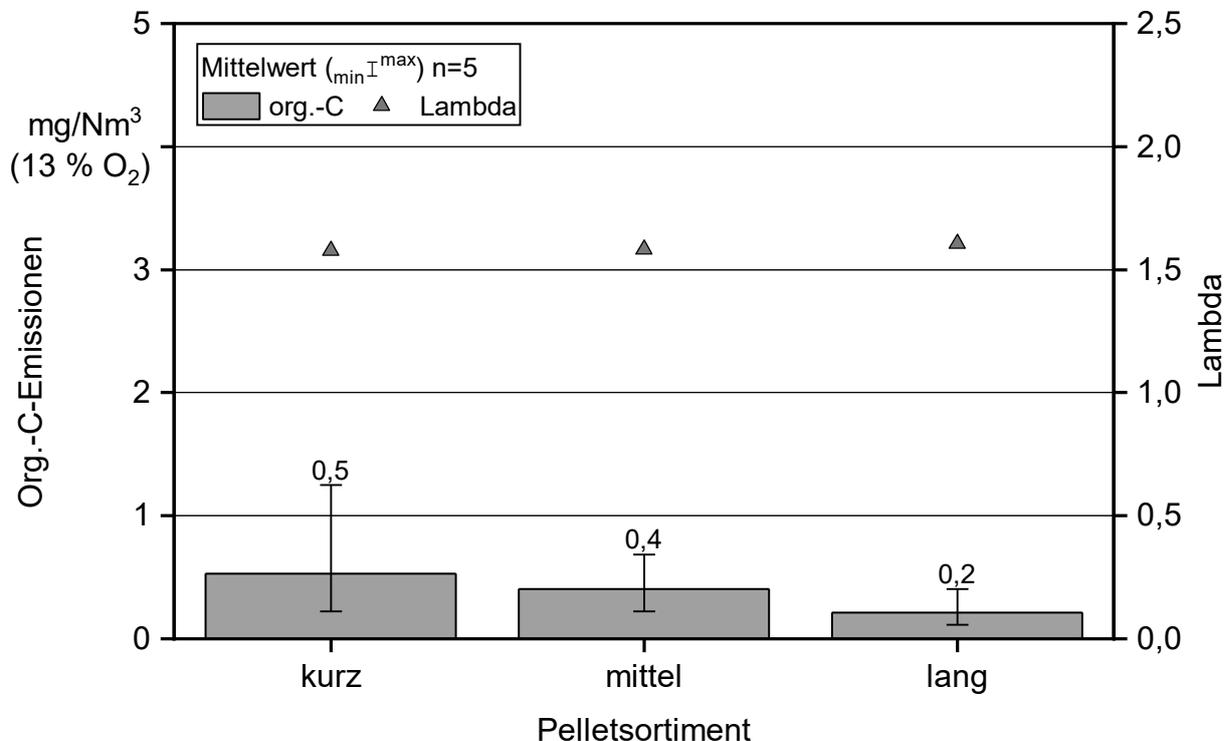


Abbildung 120: Org.-C-Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge für Pelletkessel 1 ($n = 5$)

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen steigen ohne Anpassung des Brennstoffinputs mit der Pelletlänge an. Dies gilt sowohl für die Sortimente kurz (139 mg/Nm^3), mittel (149 mg/Nm^3) und lang (150 mg/Nm^3) als auch für die gesiebten Sortimente 5–8 mm (125 mg/Nm^3) und 8–16 mm (141 mg/Nm^3) (siehe Abbildung 121). Bei angepasstem Brennstoffmassenstrom führen die mittleren Pellets (159 mg/Nm^3) zu den höchsten und die kurzen Pellets (141 mg/Nm^3) zu den niedrigsten NO_x-Emissionen. Wie schon bei den Org.-C-Emissionen wirkt sich auch für die NO_x-Emissionen die Anpassung des Brennstoffinputs nach unten negativ aus.

Betrachtet man die Sortimente kurz, mittel und lang getrennt ohne Anpassung ($R^2 = 0,50$) bzw. mit Anpassung des Brennstoffinputs ($R^2 = 0,75$) und stellt sie den CO-Emissionen gegenüber (siehe Abbildung 122), ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Für die Versuchsreihe ohne Anpassung des Brennstoffinputs ist dieser Zusammenhang deutlicher ausgeprägt als mit Anpassung des Brennstoffinputs. Der Grund ist vermutlich die homogene NO-verbrauchende Reaktion unter Anwesenheit von CO. Höhere CO-Konzentrationen im Abgas verschieben das Gleichgewicht in Richtung N₂ [52].

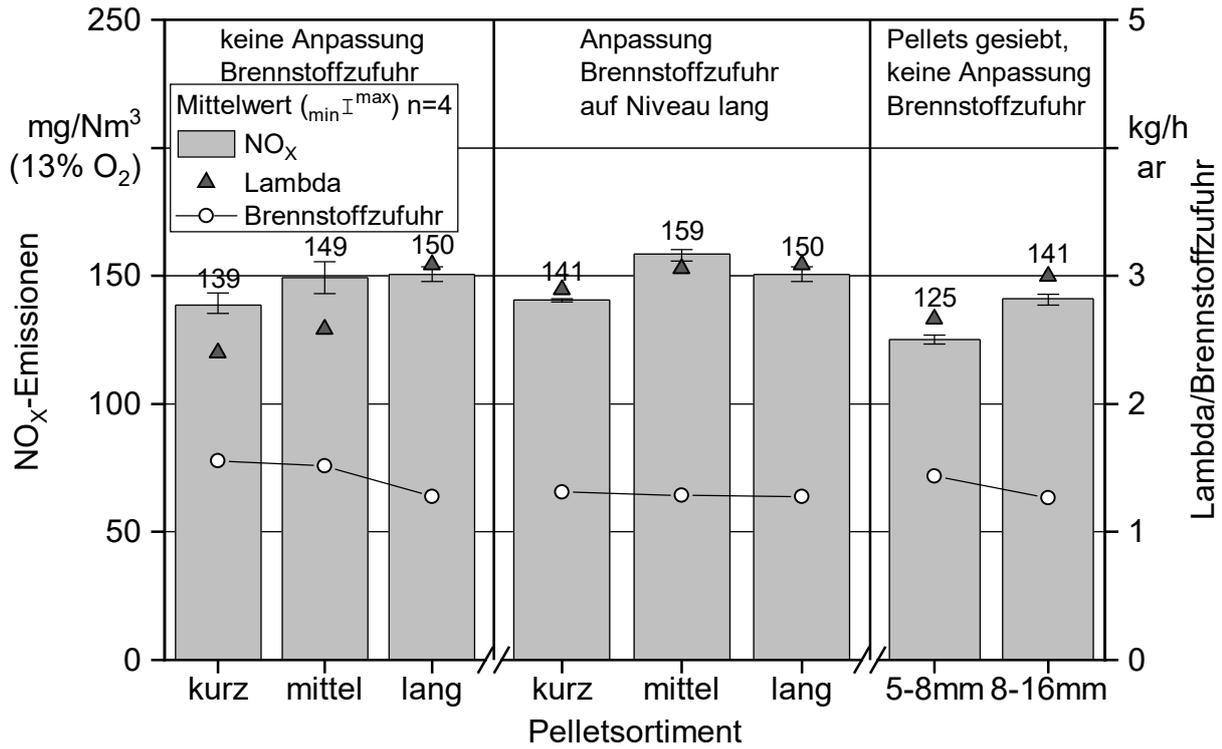


Abbildung 121: NO_x-Emissionen, Lambda und Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

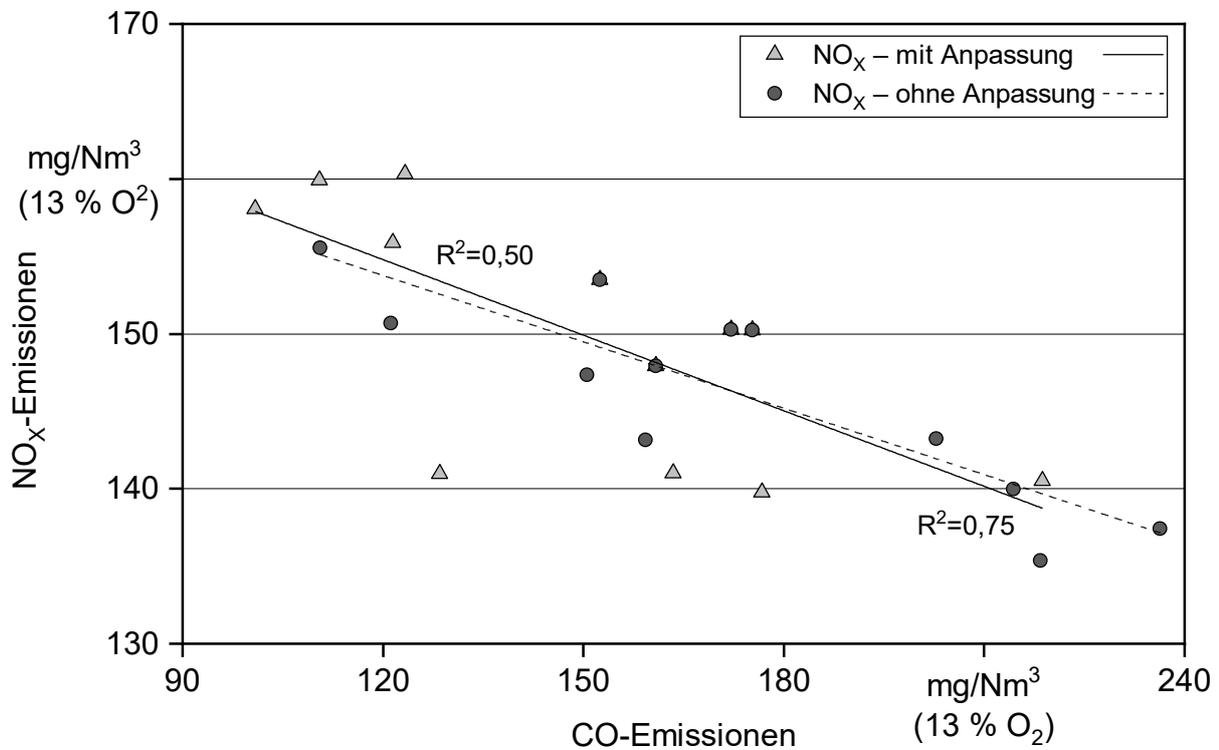


Abbildung 122: Abhängigkeit der CO-Einzelmessungen von den NO_x-Einzelmessungen für die Sortimente kurz, mittel und lang; getrennt mit und ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr an Pelletofen 2

Bei WÖHLER ET AL. [95] ergaben sich für den einen Pelletofen sinkende und für den anderen Pelletofen steigende NO_x-Emissionen mit der Pelletlänge und bei KHALSA ET AL. [53] stiegen die NO_x-Emissionen mit der Pelletlänge an. Da bei allen Untersuchungen der Brennstoffmassenstrom sowie die Temperatur mit Zunahme der Pelletlänge sanken, scheint die Richtung (sinkend oder steigend) des Einflusses der Pelletlänge auf die NO_x-Emissionen von der verwendeten Pelletfeuerung (vermutlich der Gestaltung des Brennertopfs) abhängig zu sein.

Für Pelletkessel 1 liegen die NO_x-Emissionen zwischen 145 mg/Nm³ für die langen Pellets und 168 mg/Nm³ für die kurzen Pellets (Abbildung 123). Signifikant unterscheiden sich nur die langen Pellets von kurz und mittel. Anders als beim Pelletofen liegen hier die kurzen Pellets nicht niedriger als die mittleren bzw. die langen ohne Anpassung des Brennstoffinputs. Auch der Stickstoffgehalt (Anhang 2 Tabelle 84) liegt im Rahmen der Analysengenauigkeit für die Sortimente „lang“ und „kurz“ exakt auf dem gleichen Niveau von 0,064 m-% und bei Pellets „mittel“ bei 0,054 m% (jeweils bestimmt nach der Kjeldahlschen Stickstoffbestimmung [12]), was die Unterschiede zwischen lang und mittel bzw. kurz nicht erklärt. Demnach scheint der Effekt hier auf der Pelletlänge und damit wahrscheinlich auf strukturellen Unterschieden im Glutbett zu beruhen, während die Unterschiede zum Pelletofen in der effektiveren Leistungsregelung zu suchen sind.

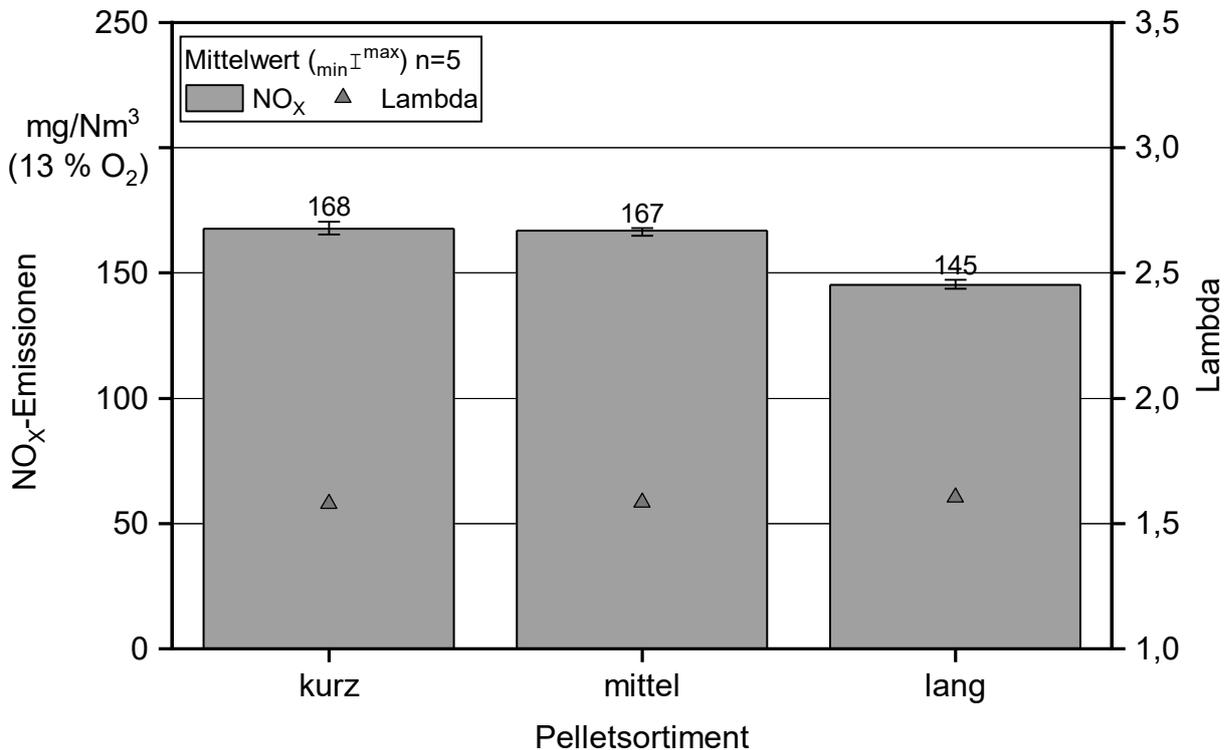


Abbildung 123: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletkessel 1 (n = 5)

7.2.1.2 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen zur Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge an Pelletofen 2 sind in Abbildung 124 dargestellt. Aufgrund der relativ hohen Streuung der Einzelmessungen (siehe Fehlerbalken) unterscheiden sich die Mittelwerte nicht signifikant ($p > 0,05$) und die folgenden Beobachtungen beschreiben lediglich Tendenzen. Die Gesamtstaubemissionen liegen für Pelletofen 2 zwischen 30 mg/Nm^3 (kurz bzw. lang) und 33 mg/Nm^3 (mittel) ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr. Durch die Anpassung der Brennstoffzufuhr auf das Niveau der langen Pellets steigen die Emissionen für das kurze Sortiment von 30 auf 33 mg/Nm^3 leicht an, während die des mittleren Sortiments von 33 auf 25 mg/Nm^3 abfallen. Die Ergebnisse der gesiebten Sortimente $5\text{--}8 \text{ mm}$ (33 mg/Nm^3) und $8\text{--}16 \text{ mm}$ (28 mg/Nm^3) bestätigen aufgrund der ähnlichen Pelletlängen die Ergebnisse der Sortimente mittel und lang ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr und sie legen die Vermutung nahe, dass für Pelletofen 2 die Staubemissionen mit der Pelletlänge tendenziell abnehmen, was im Widerspruch zu den Beobachtungen von WÖHLER ET AL. [95] steht. Unter Berücksichtigung der mittleren Pelletlängen der untersuchten Pellets deckt sich der beobachtete Effekt jedoch mit den Ergebnissen der Untersuchung nach KHALSA ET AL. [53]. Hier nahmen die Gesamtstaubemissionen von der kürzesten Längensklasse 6 bis zur Längensklasse 18, die ungefähr den hier untersuchten langen Pellets entspricht, deutlich ab. Erst bei einer weiteren Erhöhung der Pelletlänge stiegen die Gesamtstaubemissionen wieder an. Da das gesiebte Sortiment $8\text{--}16 \text{ mm}$ von der mittleren Pelletlänge nochmals um ca. 3 mm länger ist als das lange Sortiment, liegen hier die Gesamtstaubemissionen noch etwas niedriger. Das kurze Sortiment müsste demnach höhere Gesamtstaubemissionen aufweisen als das mittlere, was nicht der Fall ist. Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 diskutiert weisen die zur Untersuchung des Einflusses der Pelletlänge verwendeten Sortimente durch Inhomogenität des verwendeten Rohstoffs tendenziell unterschiedlich hohe Gehalte aerosolbildender Elemente (K, Na, Pb und Zn) auf. Ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr scheint es hier keinen Zusammenhang ($R^2 = 0,11$) zu geben, gleicht man jedoch die Brennstoffzufuhr auf ein vergleichbares Niveau an, zeigt sich ein mäßig ausgeprägter Zusammenhang der Gesamtstaubemissionen mit den aerosolbildenden Elementen ($R^2 = 0,48$), wie Abbildung 125 veranschaulicht. Dass die Variation der Pelletlänge mit den gesiebten Sortimenten (Punkte bei 415 mg/kg) bei gleichem Gehalt aerosolbildender Elemente dennoch tendenzielle Unterschiede bei den Gesamtstaubemissionen zeigt, deutet darauf hin, dass dieser Effekt bei den Sortimenten lang, mittel und kurz lediglich von dem Effekt der aerosolbildenden Elemente überlagert wird. Ein linearer Zusammenhang zwischen den Gesamtstaubemissionen und dem Anteil an Pellets $< 10 \text{ mm}$ ($R^2 = 0,01$) oder der Pelletlänge ($R^2 = 0,10$) wie bei den gasförmigen Emissionen ist nicht erkennbar (siehe Abbildung 126). Dieser könnte allerdings von einem Einfluss der Änderungen bei den Aerosolbildnern überlagert worden sein. Wie bereits erwähnt liegen die Gesamtstaubemissionen unter Berücksichtigung der Streuung der Einzelwerte sowie die bei der Staubbemessung zu erwartenden Messunsicherheiten statistisch gesehen auf einem einheitlichen Niveau. Um den Einfluss der Pelletlänge auf die Gesamtstaubemissionen mit höherer Sicherheit bewerten zu können, müssen Pellets aus einem sehr gut homogenisierten Ausgangsmaterial hergestellt und entsprechend der Länge sortiert werden. Bei den Untersuchungen von WÖHLER ET AL. [95] wurde aber der Kaliumgehalt der Pellets

nicht bestimmt und es wurden keine Angaben zur Homogenität des Ausgangsmaterials getroffen. Bei KHALSA ET AL. [53] weisen die untersuchten Längenklassen zwar eine geringe Streuung bei den Aerosolbildnern, jedoch erhebliche Unterschiede im Si/K-Verhältnis auf. Daher ist die Aussagekraft dieser Studien fragwürdig hinsichtlich der Staubemissionen.

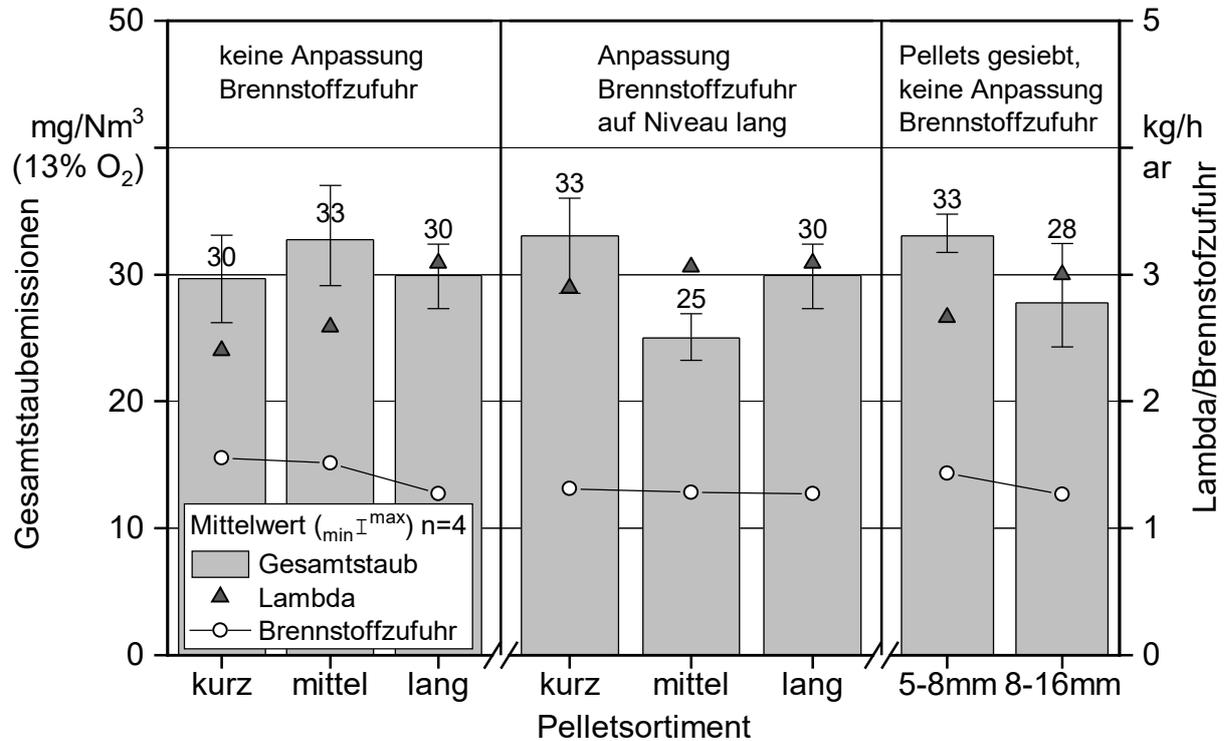


Abbildung 124: Gesamtstaubemissionen, Lambda und Brennstoffinput in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

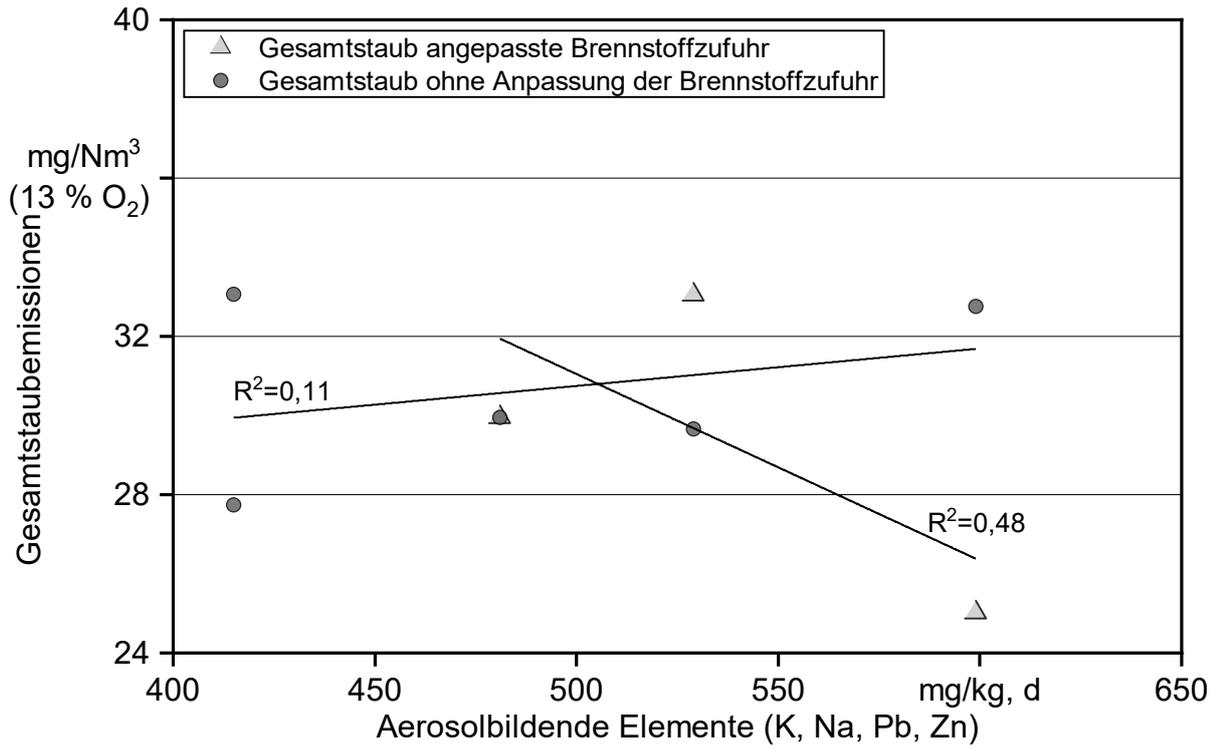


Abbildung 125: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Summe der aerosolbildenden Elemente (K, Na, Pb und Zn) bei verschiedenen Pelletlängen an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

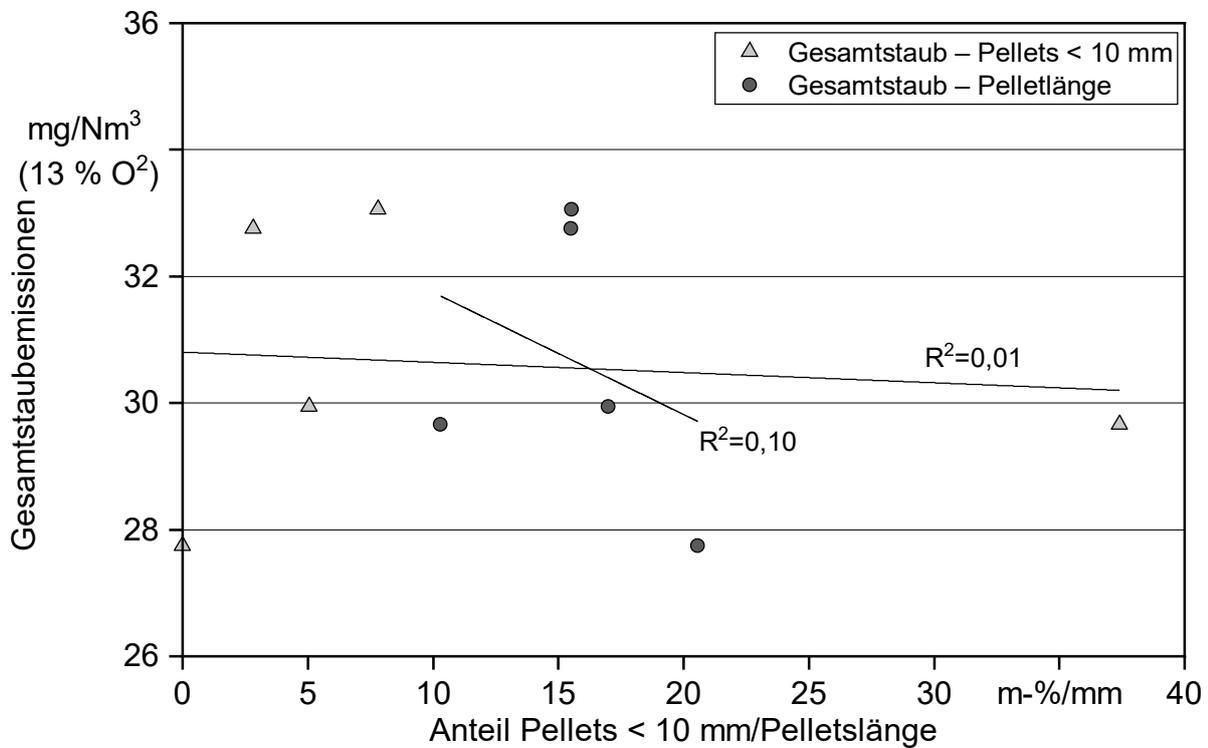


Abbildung 126: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen vom Anteil an Pellets < 10 mm und der mittleren Pelletlänge für die Untersuchung zum Einfluss der Pelletlänge an Pelletofen 2 ohne die Messungen mit angepasster Brennstoffzufuhr (n = 4, ohne Reinigung)

Für Pelletkessel 1 sind die Gesamtstaubemissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge in Abbildung 127 dargestellt. Aufgrund der Streuung der Einzelmesswerte liegt, wie auch bei Pelletofen 2, kein signifikanter Unterschied der Mittelwerte vor. Trotzdem zeigen sich für den Kessel sehr gut vergleichbare Tendenzen mit dem Pelletofen. Die Gesamtstaubemissionen für das kurze (21 mg/Nm³) und lange Sortiment (22 mg/Nm³) liegen dabei auch in etwa gleich hoch, während das mittlere Sortiment mit 24 mg/Nm³ etwas höhere Gesamtstaubemissionen aufweist, was auf den höheren Gehalt aerosolbildender Elemente zurückgeführt werden kann und somit nicht auf den Effekt der Pelletlänge.

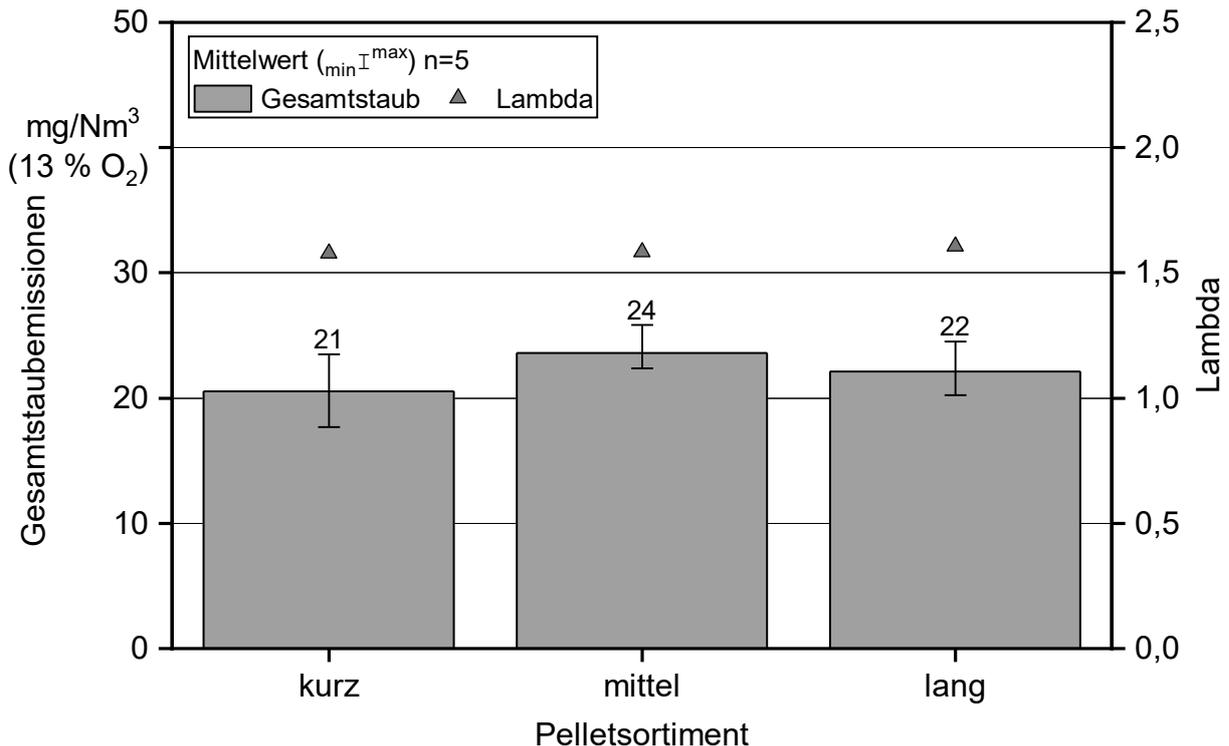


Abbildung 127: Gesamtstaubemissionen in Abhängigkeit von der Pelletlänge am Pelletkessel 1 (n = 5)

7.2.1.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel

Die Partikelanzahlverteilung (Abbildung 128) wurde nur für Pelletofen 2 ermittelt, da das ELPI+ während der Messungen am Pelletkessel 1 nicht zur Verfügung stand. Ohne eine Anpassung der Brennstoffzufuhr ist die Partikelanzahlverteilung der Sortimente kurz und mittel relativ ähnlich. Lediglich die Anzahl der Partikel zwischen 40 nm und 230 nm ist bei den mittleren Pellets etwas höher, dafür ist die der Partikel zwischen 9 nm und 40 nm etwas niedriger. Bei den langen Pellets hingegen gibt es einen deutlichen Unterschied der Partikelanzahl zwischen 9 nm und 40 nm. Diese liegt in etwa eine Zehnerpotenz höher als bei den mittleren oder kurzen Pellets. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der größeren Partikel zwischen 40–230 nm und 230–731 nm ab. Da bei vermutlich ähnlicher Dichte die größeren Partikel deutlich schwerer sind, ergeben sich dennoch niedrigere Gesamtstaubemissionen für die langen Pellets.

Die Anpassung der Brennstoffzufuhr bewirkt für das kurze Sortiment eine deutliche Zunahme an größeren Partikeln 40–230 nm sowie eine leichte Erhöhung bei 230–731 nm, während sich die ultrafeinen Partikel (9–40 nm) etwas verringern. Beim mittleren Sortiment führt die Anpassung der Brennstoffzufuhr zu einer leichten Reduktion der Partikelanzahl in allen drei betrachteten Größenklassen. Damit decken sich auch hier die Ergebnisse gut mit den Beobachtungen bei den Gesamtstaubmessungen. Da die ultrafeinen Partikel (hier 9–40 nm) die Lungen-Blutsschranke überwinden und in den Blutkreislauf gelangen können, stehen diese unter Verdacht, vielfältige Krankheiten auszulösen (u. a. chronische Herz- und Gehirnerkrankungen) [52]. Weitere Messungen zum Einfluss der Pelletlänge auf die Partikelanzahlverteilung wären daher auch eine wichtige Versuchsfrage in weiteren Untersuchungen.

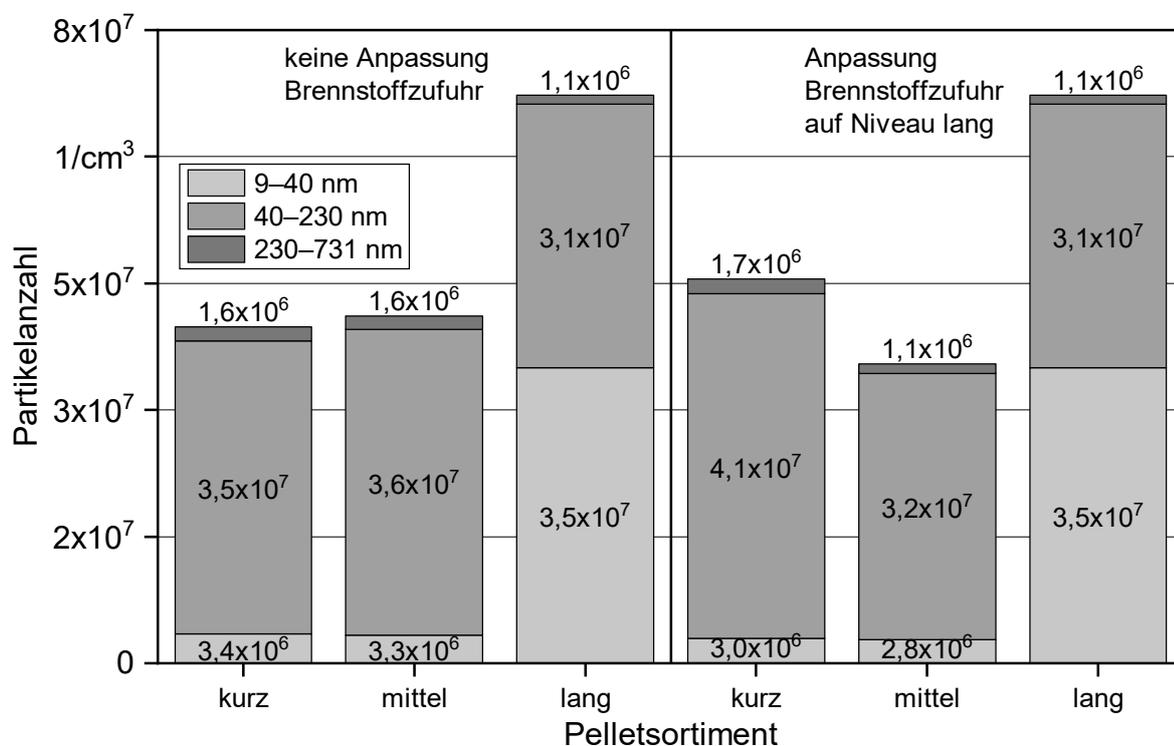


Abbildung 128: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer der Messungen in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2 (1 h)

In Abbildung 129 ist die Zusammensetzung der Filterstäube auf den Messfiltern der Staubprobenahme dargestellt. Ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr zeigen sich die Unterschiede vor allem im Anteil der Salze und Oxide, deren Anteil beträgt für das kurze Sortiment ca. 13 mg/Nm^3 und liegt für das mittlere (22 mg/Nm^3) und lange Sortiment (23 mg/Nm^3) deutlich höher. Außerdem liegt bei den kurzen (10 mg/Nm^3) und mittleren Pellets (7 mg/Nm^3) der Anteil an elementarem Kohlenstoff (EC, vermutlich Ruß) ca. zwei- bis dreimal so hoch wie bei den langen Pellets. Der Anteil an organischem Kohlenstoff (OC) und Karbonaten (IC) durch mitgerissene Aschepartikel nimmt mit der Pelletlänge von kurz nach lang minimal ab. Die Anpassung der Brennstoffzufuhr bewirkt für das kurze Sortiment einen Anstieg des Anteils an Salzen und Oxiden um ca. 2 mg/Nm^3 und des

elementaren Kohlenstoffs um ca. 4 mg/Nm³, während OC und IC sich nicht ändern. Bei den mittleren Pellets reduziert sich EC um 4 mg/Nm³, der Anteil an Salzen und Oxiden um ca. 3 mg/Nm³ sowie OC und IC um je ca. 1 mg/Nm³ im Vergleich zur nicht angepassten Variante. Die Verschlechterungen bei den kurzen Pellets könnten eventuell mit der durch die Anpassung der Brennstoffzufuhr deutlich um 110 K niedrigeren Glutbetttemperatur erklärt werden. Bei dem mittleren Sortiment liegt die Glutbetttemperatur nach der Anpassung dagegen um ca. 37 K höher (Abschnitt 7.2.1).

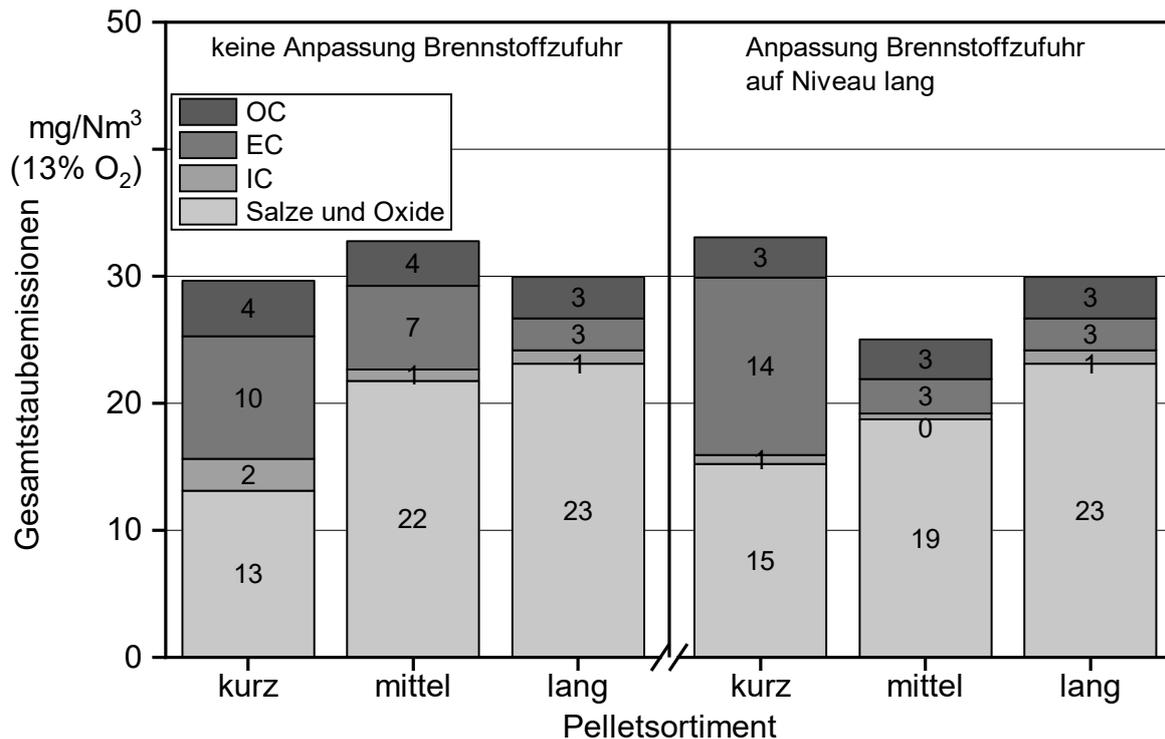


Abbildung 129: Zusammensetzung der Staubbelastung auf den Planfiltern in Abhängigkeit von der Pelletlänge an Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

Für Pelletkessel 1 (Abbildung 130) liegt ebenfalls der Anteil an Salzen und Oxiden der Gesamtstaubemissionen aus der dritten Messung bei dem kurzen Sortiment am niedrigsten mit 19 mg/Nm³. Anders als beim Pelletofen liegt hier der Anteil an Salzen und Oxiden am Gesamtstaub für die mittleren Pellets am höchsten (23 mg/Nm³) und für die langen Pellets in der Mitte mit 21 mg/Nm³. Der Anteil karbonathaltiger Aschepartikel liegt für die kurzen und langen Pellets auf einem niedrigen Niveau (ca. 1 mg/Nm³) und für die mittellangen Pellets etwas niedriger (< 1 mg/Nm³). Der Anteil organischen Kohlenstoffs liegt für die kurzen Pellets (ca. 3 mg/Nm³) etwas höher als für die anderen beiden Sortimente (ca. 2 mg/Nm³).

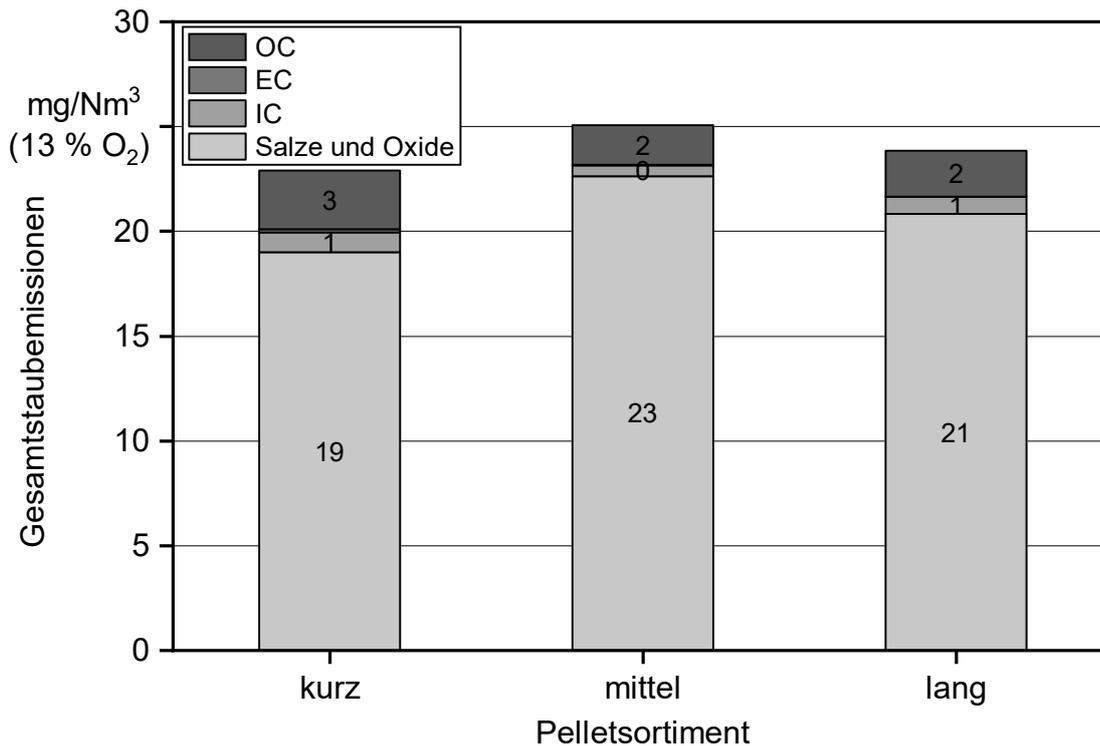


Abbildung 130: Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern der dritten Staubbemessung in Abhängigkeit von der Pelletlänge für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC sowie Salze und Oxide

Stellt man den Anteil an Salzen und Oxiden der Gesamtstaubemissionen den aerosolbildenden Elementen gegenüber (siehe Abbildung 131) fällt auf, dass dieser nicht – wie zu erwarten – mit dem Anteil an Aerosolbildnern ansteigt. Für den Pelletofen fallen die mineralischen Staubbemissionen von lang nach mittel leicht ab, während diese für den Pelletkessel geringfügig zunehmen. Berücksichtigt man die Messgenauigkeit der Staubbemessung, der Elementgehaltsanalysen sowie des Kohlenstoffanalysators, kann man aber sagen, dass die mineralischen Staubbemissionen für die langen und mittleren Pellets auf einem Niveau liegen, obwohl bei den Aerosolbildnern ein Unterschied von ca. 118 mg/kg vorliegt. Bei den kurzen Pellets scheint es einen weiteren Effekt zu geben, der den Ausstoß an mineralischen Staubbemissionen im Vergleich zu den mittleren und langen Pellets deutlich verringert. Hier ist auch der Unterschied zwischen Pelletofen und Pelletkessel wesentlich größer als bei den mittleren und langen Pellets. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Unterschiede bei den mineralischen Staubbemissionen durch die Pelletlänge sowie den Anteil an Pellets < 10 mm im Glutbett (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Turbulenzen, Druckdifferenzen) hervorgerufen werden und dieser Effekt teilweise – wie schon erwähnt – durch den Gehalt aerosolbildender Elemente überlagert wird. Eine andere mögliche Erklärung wären Unterschiede im Si/K-Verhältnis. Da für alle drei der hier untersuchten Sortimente der Siliziumgehalt unter der Bestimmungsgrenze des Labors für die Elementaranalytik liegt, kann hierzu aber keine Aussage gemacht werden.

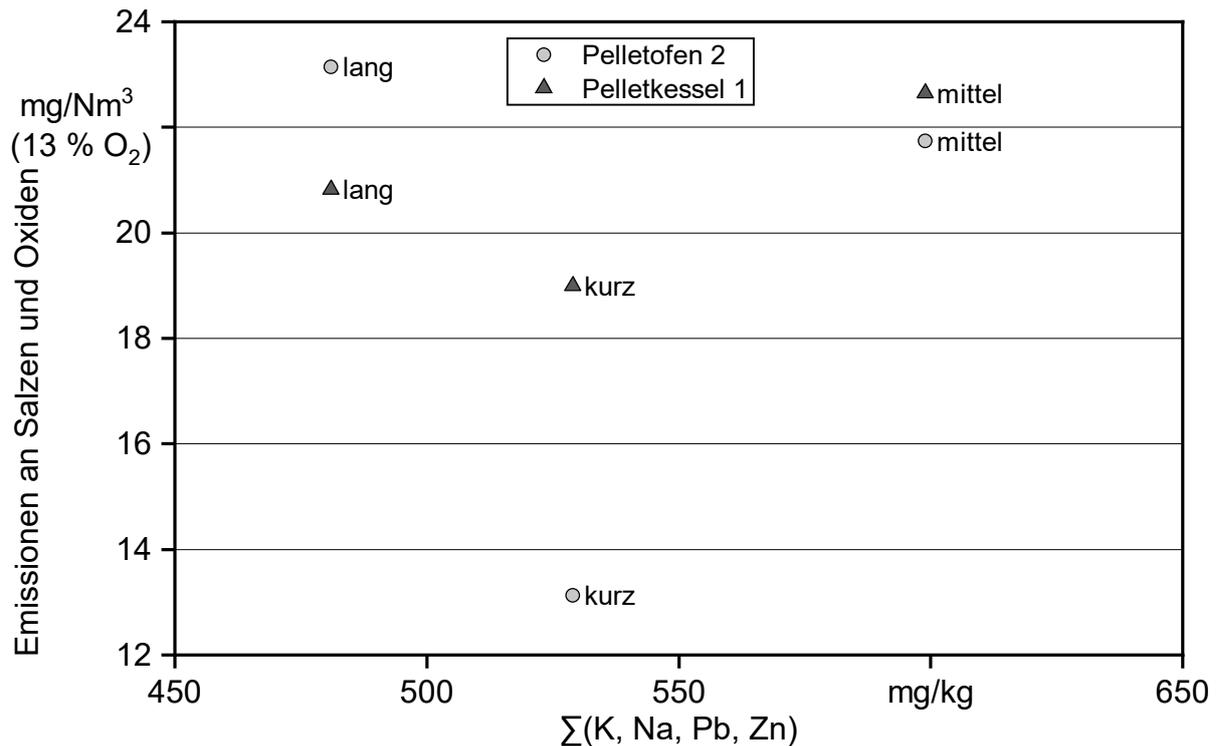


Abbildung 131: Gegenüberstellung der Emissionen an Salzen und Oxiden mit den aerosolbildenden Elementen für die Sortimente kurz, mittel und lang an Pelletofen 2 (mit Anpassung der Brennstoffzufuhr) und Pelletkessel 1

7.2.1.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Da bei den gesiebten Sortimenten (5–8 mm und 8–16 mm) keine gesonderte Elementaranalyse durchgeführt wurde und daher der Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf das Ascheschmelzverhalten nicht abgeschätzt werden kann, wird hier nur auf die Sortimente kurz, mittel und lang eingegangen.

Der Anteil der Aschepartikel > 2 mm an der gesamten Aschemenge nach dem Verbrennungsversuch ist in Abbildung 132 und der Anteil der Aschepartikel > 1 mm in Abbildung 133 für die Messungen an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 für die drei untersuchten Pelletlängen gegenübergestellt.

Bei Pelletofen 2 ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr sieht man tendenziell einen Abfall des Anteils an Partikeln > 2 mm ($R^2 = 0,50$) wie auch > 1 mm ($R^2 = 0,64$) mit zunehmender Pelletlänge. Bei den Messungen mit angepasster Brennstoffzufuhr steigt der Anteil an Partikeln > 2 mm sowie > 1 mm für die mittlere Pelletlänge deutlich an, während für das kurze Sortiment der Anteil an Partikeln > 2 mm geringfügig und der Anteil > 1 mm deutlich abfällt. Ein Zusammenhang zwischen Pelletlänge und Partikeln > 2 mm ($R^2 = 0,22$) sowie Partikeln > 1 mm ($R^2 = 0,20$) kann für diese Versuchsvariante nicht festgestellt werden. Dies deckt sich auch mit der für das kurze Pelletsortiment bei Anpassung der Brennstoffzufuhr fallenden und dem mittleren Pelletsortiment steigenden Glutbetttemperaturen (Abschnitt 7.2.1). In der Praxis wird teilweise von zu kurzen Pellets für die Verbrennung in einem Pelletofen abgeraten, da sich dann ein kompakteres Aschebett im Brennertopf mit

verringertes Durchströmung ausgebildet. Der Pelletofen versucht dann, die Primärluft zu erhöhen und bewirkt so einen Anstieg der Glutbetttemperatur, was wiederum die Verschlackung begünstigen kann [40].

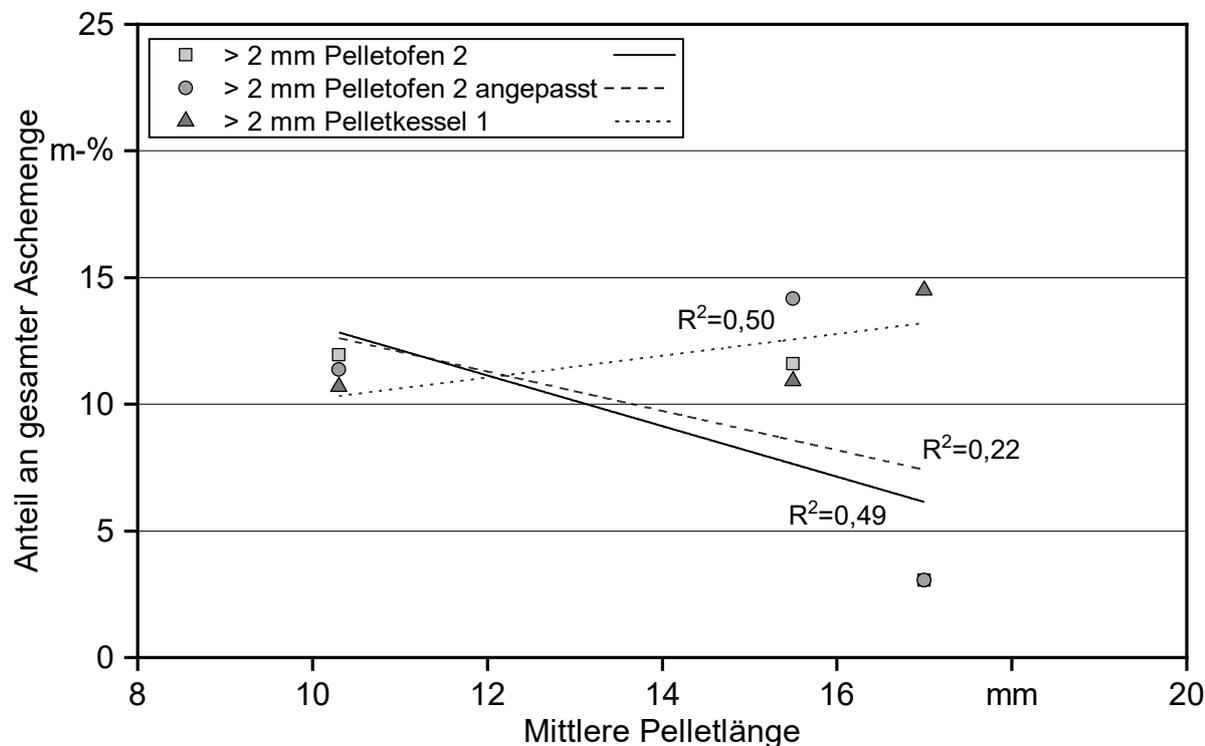


Abbildung 132: Anteil der Aschepartikel > 2 mm an der gesamten Aschemenge in Abhängigkeit von der mittleren Pelletlänge bei den Messungen mit den Sortimenten kurz, mittel und lang an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Für Pelletkessel 1 besteht ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen den Partikeln > 2 mm ($R^2 = 0,50$) sowie > 1 mm ($R^2 = 0,56$) und der mittleren Pelletlänge. Allerdings führt für Pelletkessel 1 im Gegensatz zu Pelletofen 2 ein Anstieg der Pelletlänge zu einer Erhöhung des Anteils größerer Aschepartikel und damit der Verschlackung. Da der Pelletkessel den Brennstoffmassenstrom für alle drei getesteten Sortimente durch die Leistungsregelung näherungsweise konstant hält, könnte die Glutbetttemperatur, wie auch bei Pelletofen 2 bei angepasster Brennstoffzufuhr, mit steigender Pelletlänge ansteigen. Dies würde den umgekehrten Effekt der Pelletlänge auf die Verschlackung möglicherweise erklären. Hinzu kommt ein bei gleicher Brennstoffmenge kompakteres und damit auch niedrigeres Glutbett.

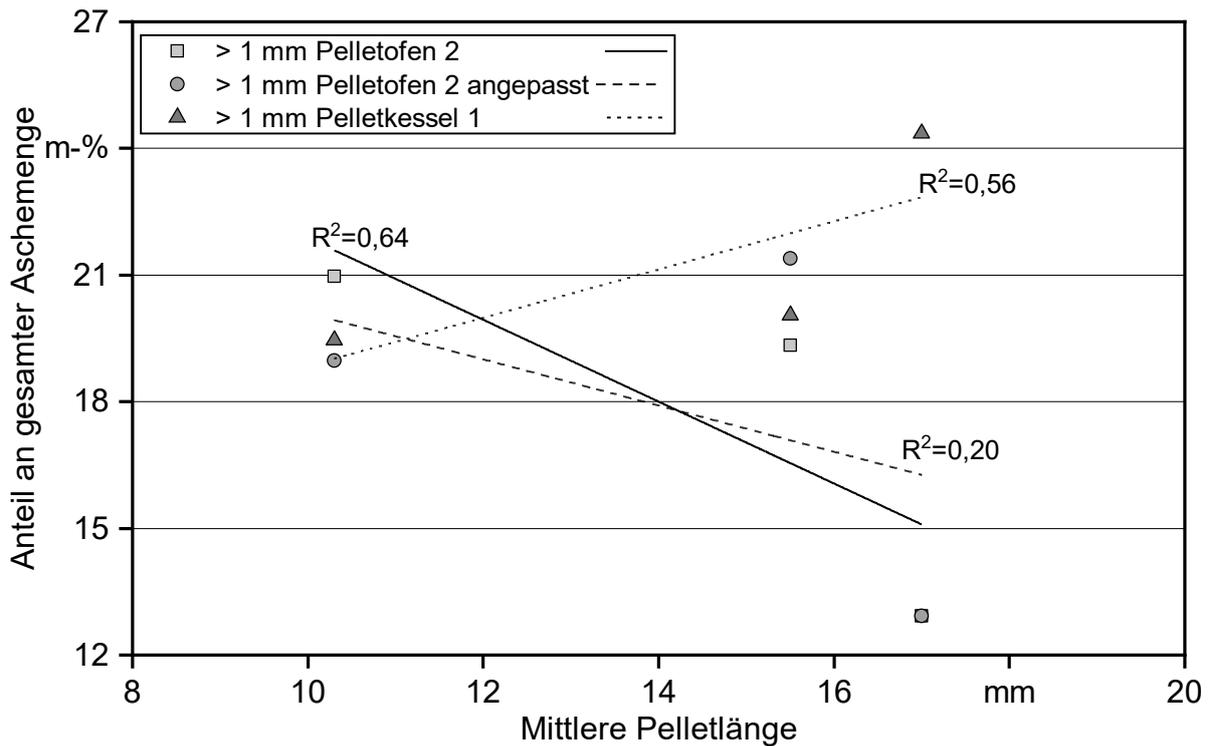


Abbildung 133: Anteil der Aschepartikel > 1 mm an der gesamten Aschemenge in Abhängigkeit von der mittleren Pelletlänge bei den Messungen mit den Sortimenten kurz, mittel und lang an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

7.2.1.5 Schlussfolgerungen

Die Pelletlänge kann bei Pelletöfen einen signifikanten Einfluss auf die gasförmigen Emissionen haben. Hier wirken sich sowohl sehr kurze als auch sehr lange Pellets negativ aus. Bei den Staubemissionen liegen keine signifikanten Unterschiede vor. In der Tendenz wirken sich längere Pellets eher positiv aus. Eine Anpassung der Brennstoffzufuhr, wie dies in vielen Bedienungsanleitungen empfohlen wird, kann sich sowohl positiv (gasförmige Emissionen und Staubemissionen bei der mittleren Pelletlänge) als auch negativ (Staubemissionen bei den kurzen Pellets) auswirken. Für den untersuchten Pelletkessel waren hingegen signifikante Unterschiede weder bei den gasförmigen noch bei den Gesamtstaubemissionen zu beobachten.

Hinsichtlich der Partikelanzahl zeigen lange Pellets einen sehr hohen Anteil an ultrafeinen Partikeln im Gegensatz zu mittleren und kurzen Pellets. Die wesentlichen Unterschiede bei der Zusammensetzung der Stäube entstehen durch unterschiedlich hohe Freisetzungen der Mineralien, vermutlich temperaturbedingt oder durch Inhomogenität des Brennstoffs, und elementaren Kohlenstoffs (Ruß). Bei nicht leistungsgeregelten Pelletöfen führen kürzere Pellets zu einer höheren Verschlackungsanfälligkeit durch höhere Glutbetttemperaturen. Dieser Effekt ist bei leistungsgeregelten Pelletöfen und Pelletkesseln vermutlich umgekehrt. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Pelletlänge an einer größeren Anzahl an Pelletöfen sowie mit Pellets aus homogenerem Rohstoff könnten hier differenziertere Informationen liefern, um auch Effekte wie z. B. die Änderung der Partikelanzahlverteilung belastbar zu klären. Die Ergebnisse widersprechen teilweise den Ergebnis-

sen aus der Literatur [95] [53], wobei die dort verwendeten Pelletsortimente wesentlich länger waren als die hier verwendeten Sortimente und auch wesentlich länger als die marktverfügbaren Pellets (Abschnitt 5.1.1). Vergleicht man aus der Untersuchung von KHALSA ET AL. [53] die Sortimente mit vergleichbarer mittlerer Pelletlänge zu dieser Untersuchung, ergeben sich ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Gesamtstaubemissionen der kurzen Pellets verglichen mit den langen Pellets. Bei den mittleren Pellets ergeben sich zwischen den Untersuchungen jedoch starke Abweichungen. Beide Studien weisen entweder keine Angaben (WÖHLER ET AL. [95]) oder starke Schwankungen (KHALSA ET AL. [53]) bei den mit der Aerosolbildung in Verbindung stehenden Elementgehalten auf.

7.2.2 Einfluss des Wassergehalts auf die Emissionen

Zur Untersuchung des Wassergehaltseinflusses auf die Emissionen wurden je 15 kg der Holzpellets „Fichte Nullprobe“ (siehe Abschnitt 4.2.3), die einen natürlichen Wassergehalt von 6,8 m-% aufwiesen (Abschnitt 5.2.1, Abbildung 54), einmal in einem Trockenschrank (Binder GmbH, FED720-02-42004) auf 3,3 m-% getrocknet und weitere 15 kg in einem Klimaschrank (ESPEC Corp., Klimaprüfschrank Typ PR-4 KT) langsam auf 10,2 m-% befeuchtet. In Pelletofen 2 wurden alle drei Wassergehaltsstufen untersucht, während bei Pelletkessel 1 nur die Nullprobe mit 6,8 m-% und die getrockneten Pellets bei 3,3 m-% verbrannt wurden.

Tabelle 35 zeigt die wichtigsten feuerungstechnischen Parameter sowie die relevanten vom Wassergehalt beeinflussten Brennstoffparameter (bezogen auf feuchten Brennstoff, ar) für Pelletofen 2 und Tabelle 36 für Pelletkessel 1. Bei einer Erhöhung des Wassergehalts auf 10,2 m-% steigt die Schüttdichte von 668 kg/m³ auf 719 kg/m³ an. Gleichzeitig sinkt die Energiedichte von 12,12 GJ/m³ auf 12,00 GJ/m³ um ca. 1 %.

Bei Pelletofen 2 liegt der mittlere Brennstoffmassenstrom bei 3,3 m-% Wassergehalt mit 1,48 kg/h, ar tendenziell (nicht signifikant) am höchsten und sinkt mit steigendem Wassergehalt auf 1,39 kg/h bei 10,2 m-% Wassergehalt trotz der eigentlich steigenden Schüttdichte. Ein möglicher Grund könnte das bei der Berechnung der Schüttdichten nicht betrachtete Schrumpfen bzw. Quellen der Pellets beim Trocknen bzw. Befeuchten sein. Der Lambda-Wert liegt für die trockenen Pellets bei 2,6 und steigt (signifikant) mit dem Wassergehalt bis auf 3,0 an. Die Brennraumtemperatur liegt bei 3,3 m-% Wassergehalt um 76 °K signifikant höher als bei 10,2 m-% Wassergehalt (w) und um 29 °K signifikant höher als bei w = 6,8 m%. Auch die Glutbetttemperatur wird durch den zunehmenden Wassergehalt signifikant reduziert aufgrund des kühlenden Effekts. Ein deutlicher Einfluss auf den Druckverlust über das Glutbett ist nicht erkennbar. Die Ergebnisse zeigen, dass die relativ einfache Leistungsregelung des Pelletofens, die nur oberhalb einer Grenztemperatur im Brennraum die Schneckendrehzahl um eine Stufe reduziert (Abschnitt 4.4.1), nicht ausreicht, um Schwankungen innerhalb des Normbereichs komplett auszuregulieren, wie die Schwankungen bei Lambda, Brennstoffmassenstrom und Brennraumtemperatur zeigen.

Tabelle 35: *Feuerungstechnische Parameter und Brennstoffeigenschaften der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses des Wassergehalts in Pelletofen 2*

Wassergehalt m-%	Schüttdichte kg/m ³ , ar	Energiedichte GJ/m ³ , ar	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda –	Brennraumtemperatur °C	Glutbetttemperatur °C	Druckverlust über Glutbett Pa
3,3	668	12,12	1,48 ± 0,05	2,6 ± 0	635 ± 11,6	871 ± 9	29,8 ± 0,8
6,8	693	12,06	1,42 ± 0,05	2,8 ± 0	606 ± 8,1	830 ± 23,6	28,2 ± 0,3
10,2	719	12,00	1,39 ± 0,03	3 ± 0,1	559 ± 7,8	811 ± 5	28,2 ± 0,4

Bei den Messungen an Pelletofen 2 wurde zusätzlich untersucht, ob sich der Wassergehalt während der gesamten Versuchsdauer von ca. 2 h (inkl. Anheizen) im Pelletvorratsbehälter verändert. Dabei wurde vor dem jeweiligen Versuch und am Versuchsende der Wassergehalt bestimmt. Nach Versuchsende erfolgte die Probenahme im oberen Bereich des Vorratsbehälters und durch Fördern nach dem Versuch aus der Schnecke bzw. dem unteren Bereich des Vorratsbehälters. Die Ergebnisse sind in Abbildung 134 dargestellt. Bei einem Wassergehalt von 3,3 m-% änderte sich der Wassergehalt während der Versuchsdauer nicht. Bei 6,8 m-% nahm der Wassergehalt während der Versuchsdauer minimal im unteren Teil des Behälters etwas stärker ab. Bei 10,2 m,-% Wassergehalt zeigte sich der Effekt am deutlichsten, hier nahm der Wassergehalt im unteren Bereich des Vorratsbehälters um ca. 1 m-% während der zweistündigen Versuchsdauer ab.

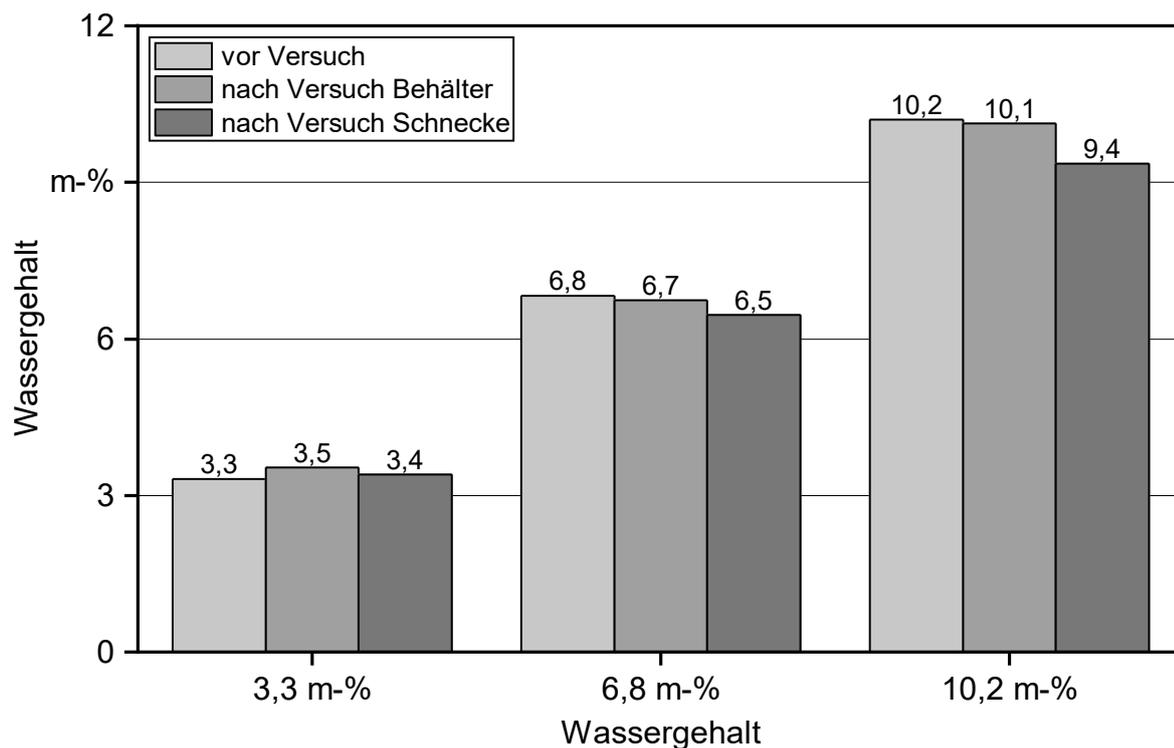


Abbildung 134: Wassergehalt vor und nach dem Feuerungsversuch zum Einfluss des Wassergehalts im Behälter und am Pelletabwurf nach der Schnecke für Pelletofen 2

Bei Pelletkessel 1 scheint die Regelung des Kessels die Brennstoffmenge beim trockeneren Brennstoff automatisch zu reduzieren, wodurch der Brennstoffmassenstrom für 3,3 m-% Wassergehalt (w) signifikant niedriger liegt als bei $w = 6,8$ m-%. Der Lambda-Wert ändert sich mit dem Wassergehalt nicht, die Wärmeleistung nimmt mit zunehmendem Wassergehalt nur geringfügig ab. Insgesamt scheint der Pelletkessel Schwankungen im Wassergehalt im Vergleich zum Pelletofen sehr gut zu kompensieren.

Tabelle 36: Feuerungstechnischen Parameter und Brennstoffeigenschaften der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses des Wassergehalts in Pelletkessel 1

Wassergehalt m-%	Schüttdichte, ar kg/m ³	Energiedichte, ar GJ/m ³	Brennstoffverbrauch kg/h	Lambda –	Abgastemperatur °C	Wärmeleistung kW
3,3	668	12,12	3,11 ± 0,04	1,6 ± 0	114 ± 1,5	14,4 ± 0,1
6,8	693	12,06	3,24 ± 0,08	1,6 ± 0	117 ± 1,2	14,3 ± 0,1

7.2.2.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt sind für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 in Abbildung 135 dargestellt. Während es bei Pelletkessel 1 keinen Einfluss auf die CO-Emissionen zu geben scheint, liegen die CO-Emissionen für Pelletofen 2 bei einem Wassergehalt von 3,3 m-% mit 217 mg/Nm³ signifikant höher als mit 6,8 m-% Wassergehalt. Zwischen 6,8 m-% und 10,2 m-% Wassergehalt gibt es keinen signifikanten Unterschied der mittleren CO-Emissionen. Auffallend ist auch die deutlich höhere Spreizung der Einzelwerte bei 3,3 m-% Wassergehalt beim Pelletofen 2. Hier liegen vor allem der erste und zweite Messwert auf einem deutlich höheren Niveau. Dies lässt sich wahrscheinlich durch die Leistungsregelung des Ofens, die bei einer Überschreitung einer bestimmten Brennraumtemperatur die Drehzahl der Schnecke reduziert, zurückführen. Dadurch wurde während der ersten beiden Messungen zu viel Brennstoff in den Brennraum gefördert. Übertrocknete Pellets sollten bei der Verbrennung in Pelletöfen somit vermieden werden. Bei den Untersuchungen von DÖHLING ET AL. [39] wurde ein ähnlicher Effekt mit zu trockenen Pellets auf die CO-Emissionen an einem Pelletkessel festgestellt.

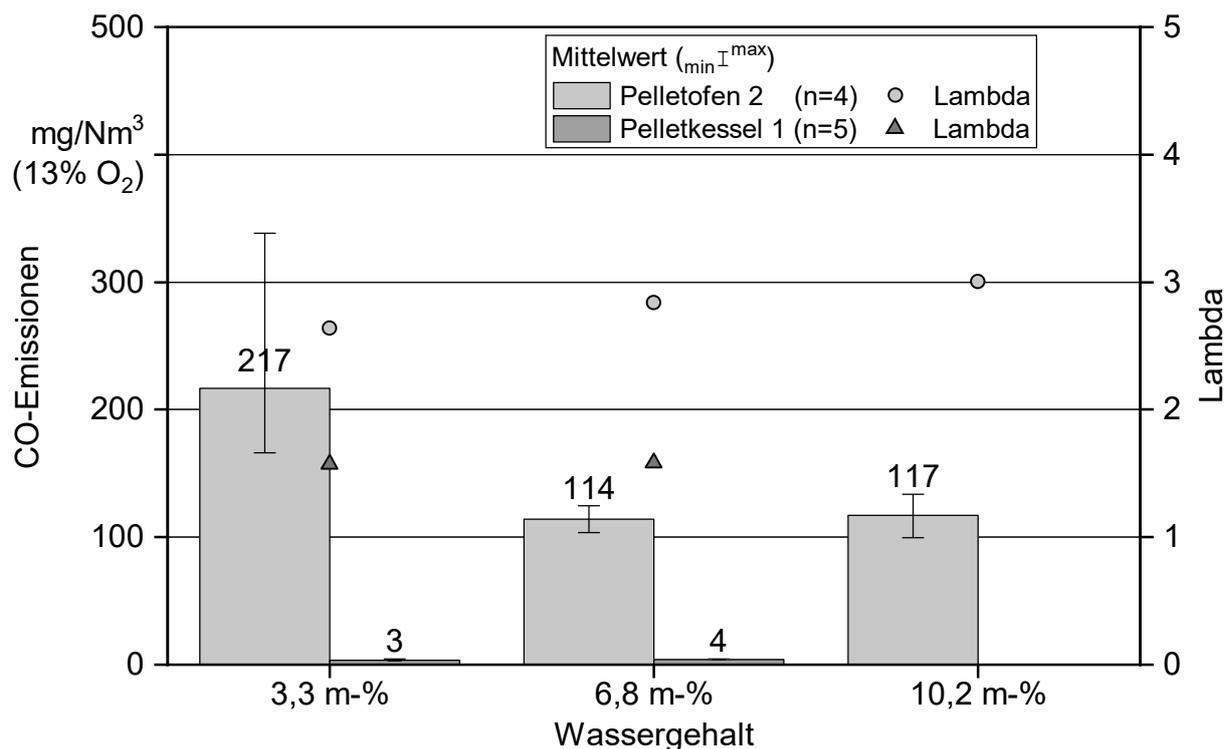


Abbildung 135: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 ($n = 5$)

Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen (org.-C). Die mittleren org.-C-Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 sind in Abbildung 135 dargestellt. Für den Pelletkessel 1 liegen diese mit 0,4–0,6 mg/Nm³ schon im Bereich der Messtoleranz. Für den Pelletofen 2 wurden wieder die höchsten (signifikant) org.-C-Emissionen für 3,3 m-% Wassergehalt gemessen. Die org.-

C-Emissionen scheinen tendenziell auch mit höheren Wassergehalten wieder anzusteigen, dieser Unterschied ist allerdings nicht signifikant. Das Optimum zeigt sich hinsichtlich der org.-C-Emissionen beim Pelletofen bei dem mittleren Wassergehalt von 6,8 m-%.

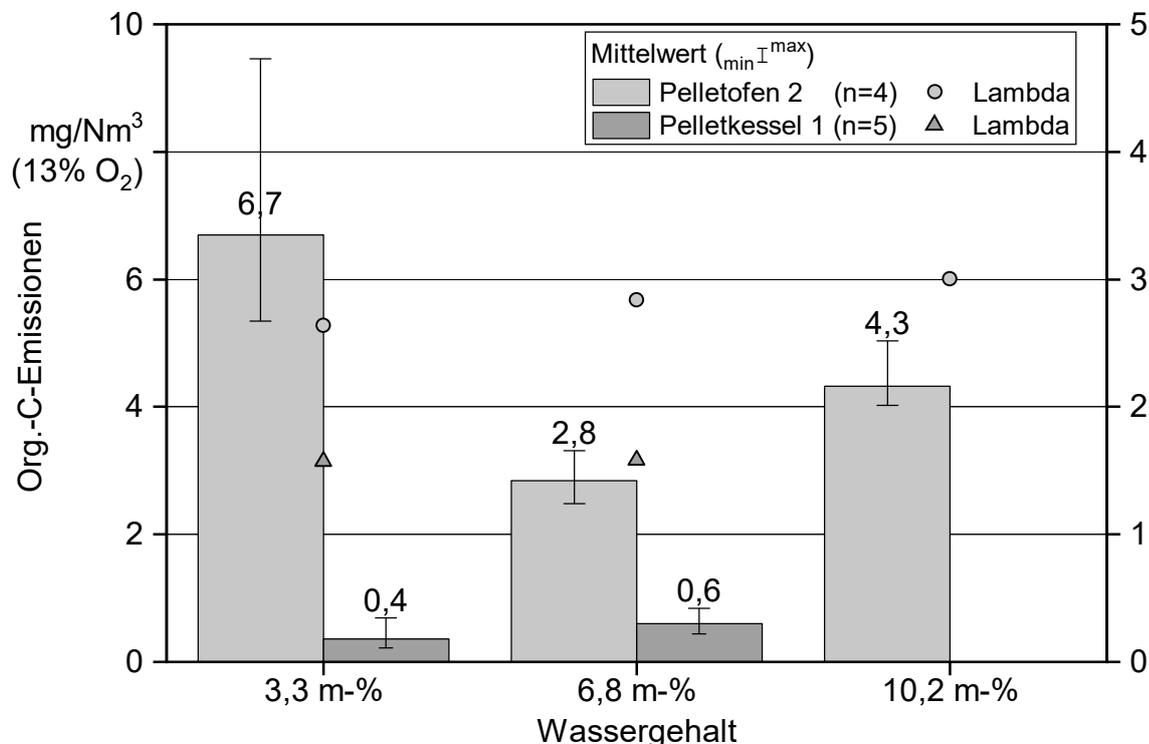


Abbildung 136: Org.-C-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 ($n = 5$)

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen liegen beim Pelletkessel 1 etwas höher als beim Pelletofen 2 (siehe Abbildung 137), wie auch schon bei den marktverfügbaren Holzpellets. Bei Pelletofen 2 liegen die NO_x-Emissionen für 3,3 m-% Wassergehalt signifikant niedriger als für die restlichen untersuchten Wassergehälte. Dies könnte mit den gleichzeitig höheren CO-Emissionen zusammenhängen, durch homogene NO-verbrauchende Reaktionen wird, bei gleichzeitiger Anwesenheit, CO zu CO₂ aufoxidiert und gleichzeitig NO zu N₂ reduziert [52].

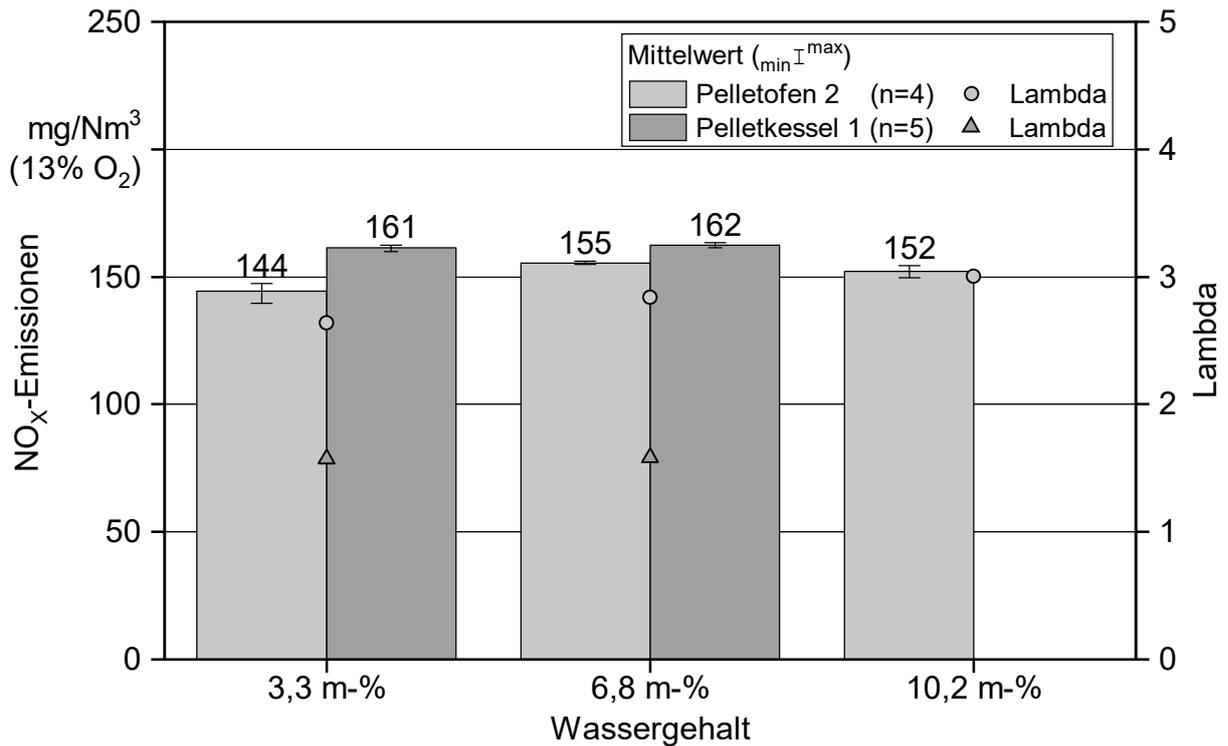


Abbildung 137: NO_x-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 (n = 5)

7.2.2.2 Gesamtstaubemissionen

Bei den Gesamtstaubemissionen zeigt Pelletofen 2 einen ähnlichen Einfluss auf den Wassergehalt wie bei den CO-Emissionen (siehe Abbildung 138). Diese liegen auch hier für 3,3 m-% Wassergehalt (w) signifikant höher als für w = 6,8 m-% oder w = 10,2 m-%. Auch bei den Gesamtstaubemissionen scheint der Pelletofen 2 innerhalb der ersten zwei Messungen (siehe Fehlerbalken) zu viel Brennstoff zuzuführen und reagiert erst verspätet, indem er die Schneckendrehzahl reduziert.

Für Pelletkessel 1 liegen die Gesamtstaubemissionen für 3,3 m-% Wassergehalt tendenziell etwas höher als für 6,8 m-%, der Unterschied ist allerdings nicht statistisch signifikant. Damit decken sich die Untersuchungen nicht mit den Beobachtungen von DÖHLING ET AL. [39], wonach die Gesamtstaubemissionen bei einem Pelletkessel bei Zunahme des Wassergehalts von 2,9 m-% auf 7 m-% anstiegen.

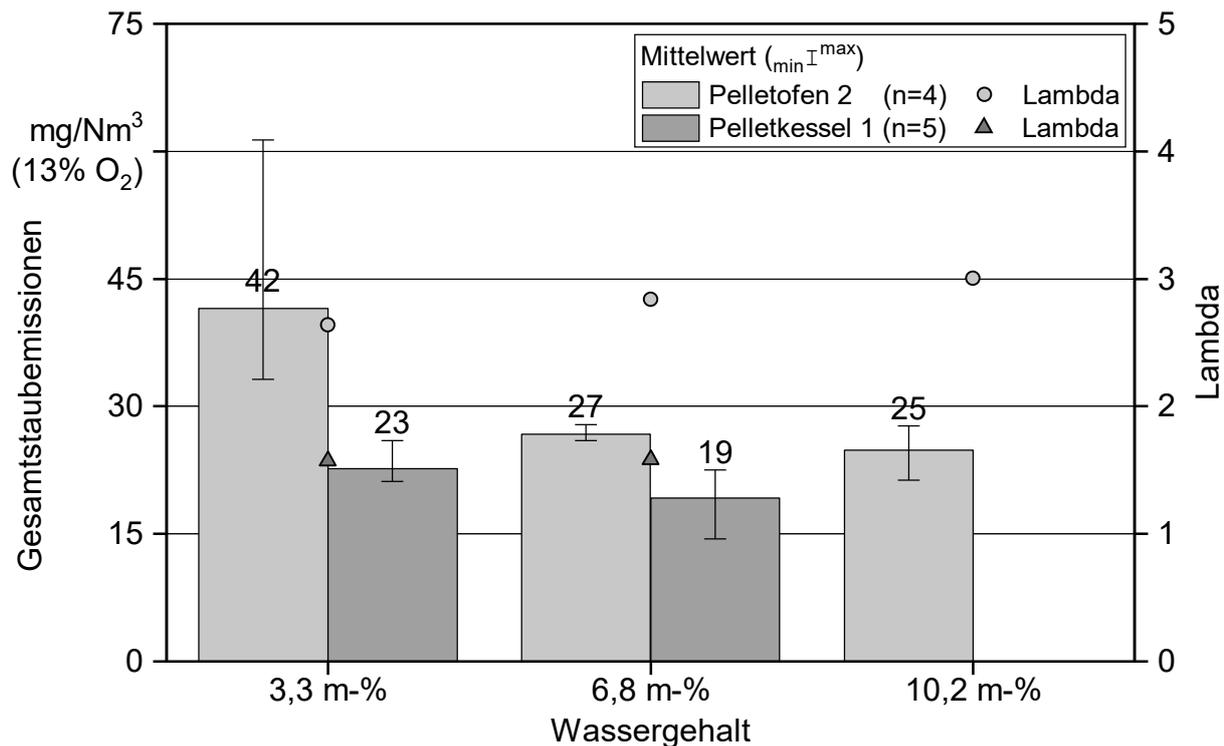


Abbildung 138: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1 ($n = 5$)

7.2.2.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel

Partikelanzahl und Anzahlverteilung. Die Partikelanzahlverteilung wurde nur bei den Messungen mit Pelletofen 2 gemessen und ist in Abbildung 139 dargestellt. Die Gesamtanzahl der Partikel liegt für 3,3 m-% Wassergehalt mit $5,7 \times 10^7/\text{cm}^3$ deutlich höher als bei 6,8 m-% Wassergehalt mit $3,8 \times 10^7/\text{cm}^3$ und 10,2 m-% Wassergehalt mit $4,1 \times 10^7/\text{cm}^3$. Diese Werte decken sich im Rahmen der Messgenauigkeit sehr gut mit den Gesamtstaubemissionen. Der größte absolute Unterschied ist bei Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser zwischen 40 und 230 nm zu beobachten. Hier liegt die Partikelanzahl der trockenen Holzpellets (3,3 m-%) ca. 30 % höher als für die anderen Wassergehaltsstufen. Bei diesem Partikelgrößenbereich könnte es sich größtenteils um Ruß handeln, dessen Bildung durch die schnelle Umsetzung des trockenen Brennstoffs und den damit einhergehenden lokalen Sauerstoffmangel begünstigt wird [89]. Bei den Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von 230 bis 731 nm liegt der Unterschied zwar bei ca. 50 %, allerdings ist die Partikelanzahl hier um eine Zehner-Potenz kleiner. Bei den kleinsten Partikeln zwischen 9 und 40 nm liegt der Unterschied zwischen ca. 8 % bei 10,2 m-% Wassergehalt und 22 % bei 6,8 m-% Wassergehalt.

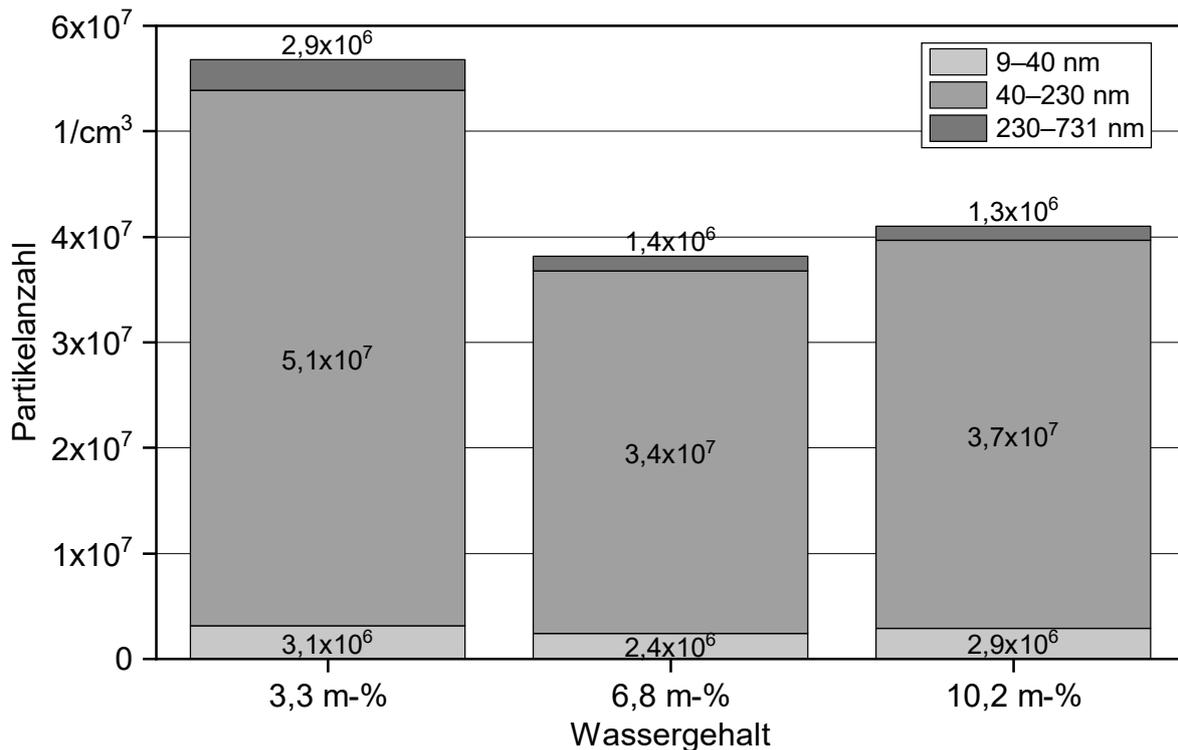


Abbildung 139: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten im Pelletofen 2, gemittelt (1 h)

Zusammensetzung der Staubpartikel. Die Zusammensetzungen der Filterbeladungen sind für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 in Abbildung 140 dargestellt. Bei Pelletofen 2 liegen die Emissionen an Salzen und Oxiden dabei auf einem mit der Messgenauigkeit vergleichbaren Niveau zwischen 20 mg/Nm^3 und 25 mg/Nm^3 und bei Pelletkessel 1 zwischen 18 mg/Nm^3 und 22 mg/Nm^3 . Bei beiden Feuerungen scheint der Wassergehalt einen Einfluss auf die Freisetzung der Mineralien (z. B. K-Verbindungen) in die Gasphase zu haben, vermutlich durch die bei trockenerem Brennstoff etwas höheren Temperaturen im Glutbett. Beim Pelletofen steigt auch der IC-Gehalt mit sinkendem Wassergehalt von ca. 1 mg/Nm^3 auf 4 mg/Nm^3 an, vermutlich bedingt durch mitgerissene Aschepartikel aufgrund der rascheren Zündung und intensiveren Gasfreisetzung. Beim Pelletkessel 1 bleibt dieser Anteil konstant. Der Hauptunterschied zwischen den Gesamtstaubemissionen von Pelletofen 2 bei den verwendeten Wassergehalten liegt im Anteil an elementarem Kohlenstoff (EC, vermutlich Ruß) begründet. Dieser liegt bei $3,3 \text{ m-%}$ Wassergehalt mit 25 mg/Nm^3 etwa viermal so hoch wie bei den übrigen untersuchten Wassergehalten mit $4\text{--}7 \text{ mg/Nm}^3$. Diese Beobachtung deckt sich auch mit den bereits erwähnten Vermutungen bei der Partikelanzahlverteilung. Beim Pelletkessel wurde kein elementarer Kohlenstoff auf den Filtern nachgewiesen. Die Gehalte organischen Kohlenstoffs (OC) liegen wieder sehr vergleichbar beim Pelletofen zwischen 11 und 13 mg/Nm^3 und scheinen demnach mit steigendem Wassergehalt und damit sinkenden Temperaturen tendenziell minimal anzusteigen. Beim Pelletkessel liegt der OC-Anteil dagegen für beide Messungen bei 2 mg/Nm^3 .

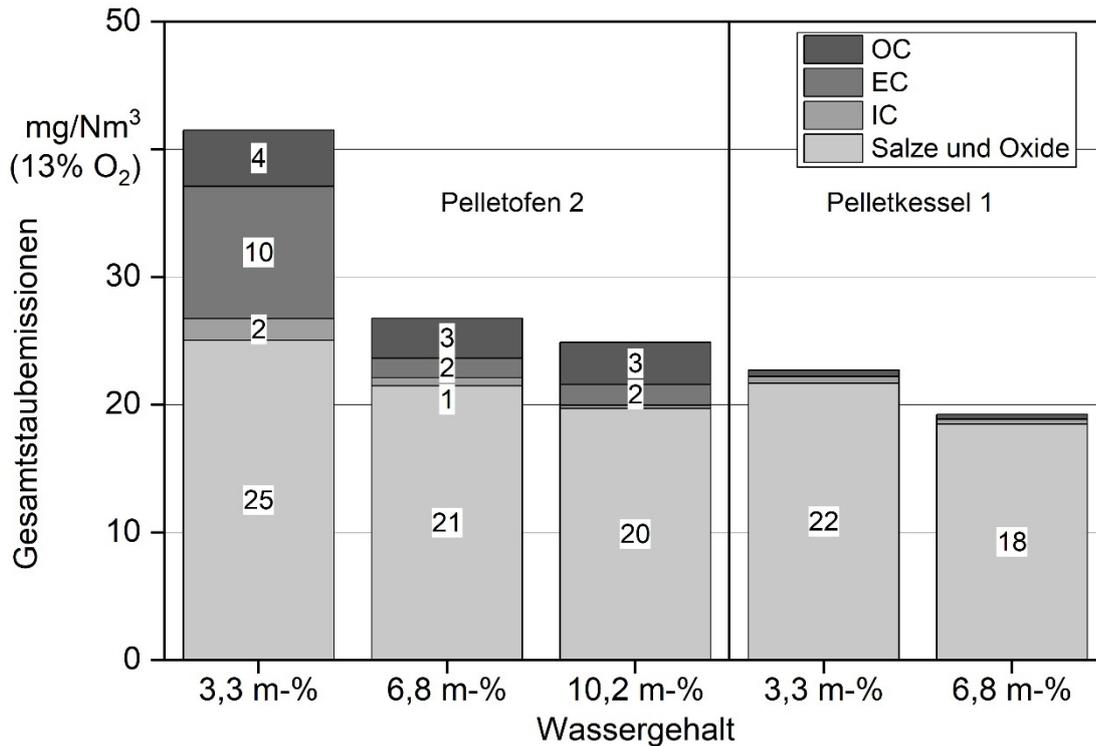


Abbildung 140: Zusammensetzung der Staubbelastung bei unterschiedlichen Brennstoff-Wassergehalten für Pelletofen 2 und Pelletofen 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

7.2.2.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Bei der Untersuchung der Verbrennungsrückstände ergibt sich hinsichtlich des Anteils von Partikeln > 2 mm sowie > 1 mm ein gegensätzliches Bild beim Vergleich zwischen Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 (siehe Abbildung 141). Bei Pelletofen 2 kommt es bei einem Anstieg des Wassergehalts zu einem geringfügigen Anstieg von Schlackepartikeln > 2 mm und > 1 mm, was bei Berücksichtigung der sinkenden Glutbetttemperatur nicht so zu erwarten ist. Bei Pelletkessel 1 sinkt der Anteil an gröberen Schlackepartikeln mit zunehmendem Wassergehalt. Allerdings sind die Unterschiede beim Kessel ausgeprägter. Der Einfluss des Wassergehalts auf die Verschlackung bei sonst einheitlichen Brennstoffeigenschaften scheint also stark von der Feuerung abzuhängen. Eine höhere Verschlackungswahrscheinlichkeit bei sehr trockenen Pellets scheint aber aufgrund der dadurch höheren Glutbetttemperaturen wahrscheinlicher.

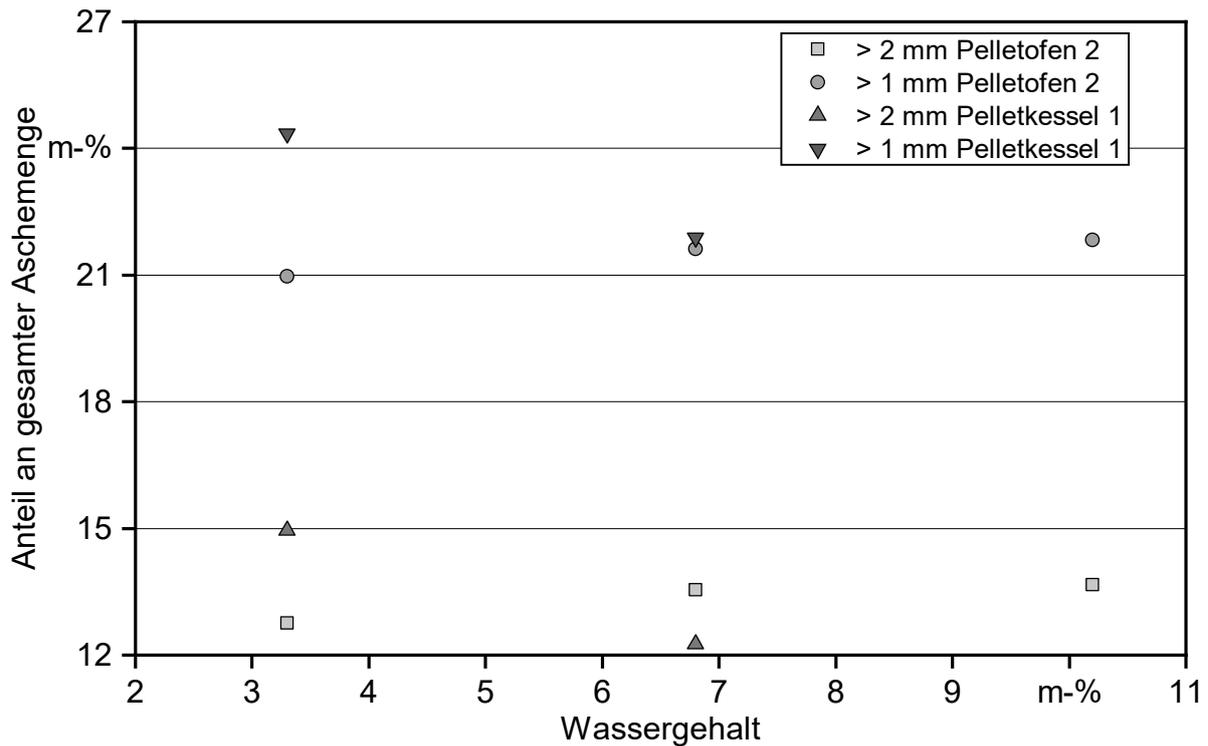


Abbildung 141: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

7.2.2.5 Schlussfolgerungen

Insgesamt scheinen sehr niedrige Wassergehalte zu erhöhten Emissionen zu führen. Dies gilt vor allem für Feuerungen mit einer sehr einfachen oder sogar ganz fehlenden Leistungsregelung (v. a. Einzelraumfeuerungen). Zur Erhöhung der Gesamtstaubemissionen bei sehr trockenen Pellets tragen vor allem Partikel zwischen 40 und 127 nm aus elementarem Kohlenstoff bei. Dabei handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach vor allem um Rußpartikel, die durch die schnellere Brennstoffumsetzung sowie zu viel Energieeintrag in die Feuerungen (fehlende Leistungsregelung) und damit lokalen Sauerstoffmangel gebildet werden. Der Effekt des Wassergehalts auf die Verschlackung war für den untersuchten Pelletofen und Pelletkessel gegenläufig. Hier ist keine feuerungsübergreifende Aussage möglich. Wassergehalte um 3 m-% kamen bei den marktverfügbaren Holzpellets einmal und Wassergehalte von 4 bis 5 m-% dreimal vor, sie sind damit praxisrelevant. Dennoch sollten Pelletsortimente mit einem Wassergehalt von unter 5 m-% nicht zum Einsatz kommen, vor allem nicht bei Pelletöfen.

7.2.3 Einfluss des Feinanteils auf die Emissionen

Der Einfluss des Feinanteils wurde nur an Pelletofen 2 untersucht, da der Einfluss auf die Emissionen bei einer Abwurf-Feuerung (wie die meisten Pelletöfen) durch den von oben auf das Glutbett fallenden Feinanteil als wesentlich größer erachtet wird als bei Feuerungen mit seitlichem Einschub oder Unterschub. Als Ausgangsmaterial für die Untersuchung des

Feinanteils wurden wieder die Fichtenpellets „Fichte Nullprobe“ (Abschnitt 4.2.3) verwendet. Um „realistischen Feinanteil“ herzustellen, wie er z. B. durch Abrieb entsteht, wurde dieser nicht durch Aufmalen der Probe, sondern im Abriebtester durch längeres „Tumeln“ der Pellets in den vorgesehenen Prüfbehältern hergestellt. Dieser Feinanteil wurde dann zu je 3 m-% und 10 m-% zur Referenz „Fichte Nullprobe“ zugemischt und vor dem Einfüllen in den Pelletvorratsbehälter durch Auf- und Abrollen in einem Kunststoff-Fass ausreichend homogenisiert. Die Referenzpellets hatten einen ursprünglichen Feinanteil von 0,07 m-%. Die zugegebenen Feinanteile in dieser Größenordnung können entweder durch Sedimentation in schlecht gereinigten Lagerräumen und Pelletvorratsbehältern oder durch Abrieb in der Förderschnecke (Unterkapitel 5.3) entstehen.

Hinsichtlich der feuerungstechnischen Parameter für Pelletofen 2 ist zu beobachten, dass der Feinanteil keinen signifikanten Einfluss auf den Brennstoffmassenstrom hat (siehe Tabelle 37). Tendenziell fallen die Lambda-Werte mit steigendem Feinanteil etwas ab, jedoch ist dieser Unterschied nicht signifikant. Auch die Brennraumtemperatur sinkt in der Tendenz (nicht signifikant) von 606 °C (0,07 m-%) auf 599 °C (10 m-%). Bei der Glutbetttemperatur ist dieser Effekt wesentlich deutlicher, die Temperatur fällt hier von 830 °C (0,07 m-%) auf 763 °C (10 m-%) ab und der Unterschied der Glutbetttemperaturen bei 0,07 m-% und 10 m-% Feinanteil ist signifikant. Auch sind die Schwankungen der Temperaturen um den Mittelwert sowohl für die Brennraumtemperatur als auch die Glutbetttemperatur wesentlich höher, sobald der Feinanteil im Brennstoff steigt. Während der Feuerungsversuche wurde beobachtet, dass der Feinanteil immer wieder schwallweise aus dem Pelletabwurf in den Brennertopf fiel und bei 10 m-% Feinanteil sogar die Flamme kurzzeitig zum Erlöschen brachte. Ein Einfluss auf den Druckverlust über das Glutbett konnte jedoch nicht festgestellt werden. Eventuell wirkt sich der Feinanteil bei einer Abwurf-Feuerung nicht sichtbar aus, da er von oben und wahrscheinlich durch das geringere Gewicht auch langsamer herabfällt als die Pellets. Somit werden dadurch keine oder nur wenige Hohlräume der Schüttung mit Feinanteil belegt.

Tabelle 37: Feuerungstechnische Parameter der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses des Feinanteils in Pelletofen 2

Feinanteil m-%	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda –	Brennraum- temperatur °C	Glutbett- temperatur °C	Druckverlust über Glutbett Pa
0,07	1,42 ± 0,05	2,84 ± 0,01	606 ± 8,1	830 ± 23,6	28 ± 0,3
3,0	1,44 ± 0,08	2,73 ± 0,07	599 ± 10,8	782 ± 9,6	28 ± 0,4
10,0	1,42 ± 0,04	2,72 ± 0,08	599 ± 16,9	763 ± 33,7	28 ± 0,4

7.2.3.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen liegen für die Fichte-Nullprobe mit 0,07 m-% Feinanteil bei durchschnittlich 114 mg/Nm^3 (siehe Abbildung 142). Bei einer Erhöhung des Feinanteils auf 3 m-% steigen die CO-Emissionen auf 265 mg/Nm^3 und bei einer Erhöhung des Feinanteils auf 10 m-% auf 518 mg/Nm^3 . Die Mittelwerte der CO-Emissionen unterscheiden sich für alle untersuchten Feinanteile signifikant. Der Grund für die Erhöhung der CO-Emissionen ist vermutlich ein durch den Feinanteil verursachter lokaler Sauerstoffmangel. Bei 10 m-% Feinanteil erlosch die Flamme kurzzeitig. Der Grenzwert der 1. BImSchV, Stufe 2 von 250 mg/Nm^3 für Pelletöfen ohne Wassertasche wird bereits ab einem Feinanteil von 3 m-% überschritten, jedoch handelt es sich hierbei schon um einen nicht mehr nach ENplus zertifizierbaren Brennstoff. Damit decken sich die Beobachtungen bei den CO-Emissionen grundsätzlich mit den vorherigen Ergebnissen am TFZ bei einem Pelletkessel mit Unterschubfeuerung [42].

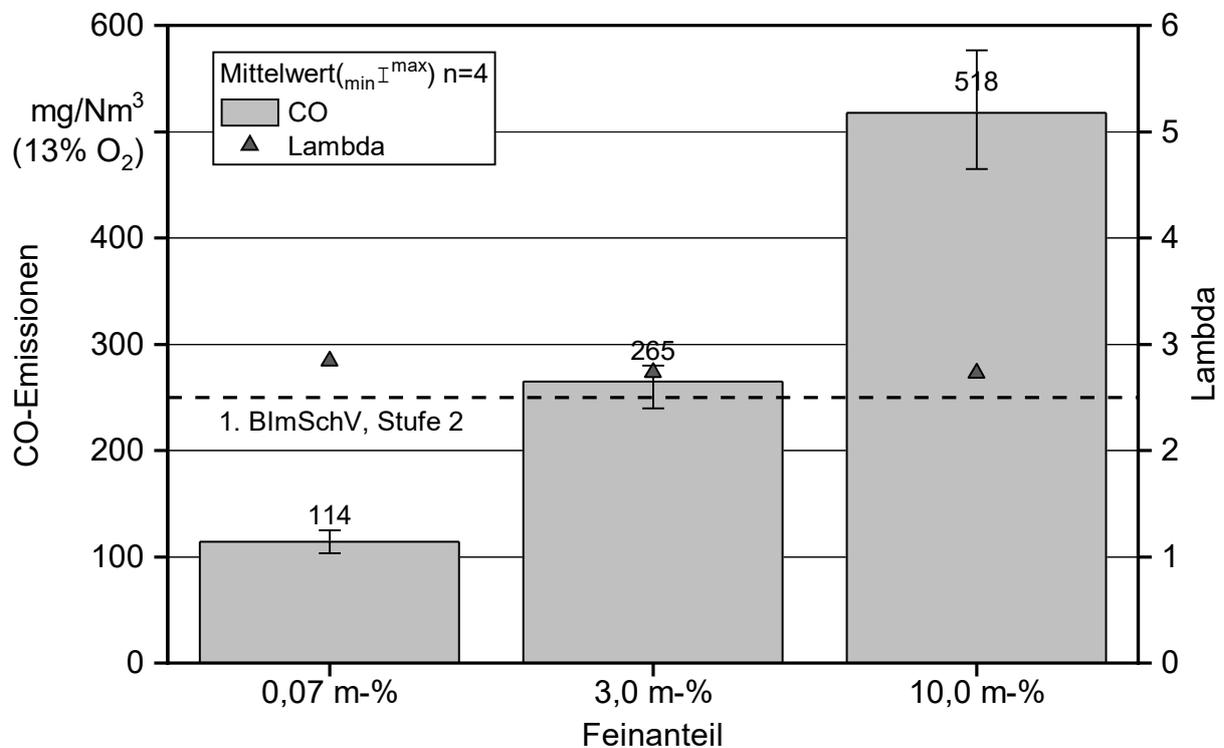


Abbildung 142: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen (org.-C). Die Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen in Abhängigkeit vom Feinanteil sind in Abbildung 143 dargestellt. Wie die CO-Emissionen steigen auch die org.-C-Emissionen von $2,8 \text{ mg/Nm}^3$ bei 0,07 m-% Feinanteil auf $7,5 \text{ mg/Nm}^3$ bei 3 m-% Feinanteil bzw. $22,8 \text{ mg/Nm}^3$ bei 10 m-% Feinanteil an. Die Mittelwerte unterscheiden sich auch hier für alle drei Feingehaltsstufen signifikant. Allerdings ist der Anstieg von 3 m-% auf 10 m-% wesentlich stärker als der von 0,07 m-% auf 3 m-%. Auch hier dürfte der Grund

am beobachteten Ersticken der Flamme liegen. Die Streuung der Einzelwerte ist bei 10 m-% Feinanteil wesentlich höher als bei den anderen untersuchten Feingehaltsstufen.

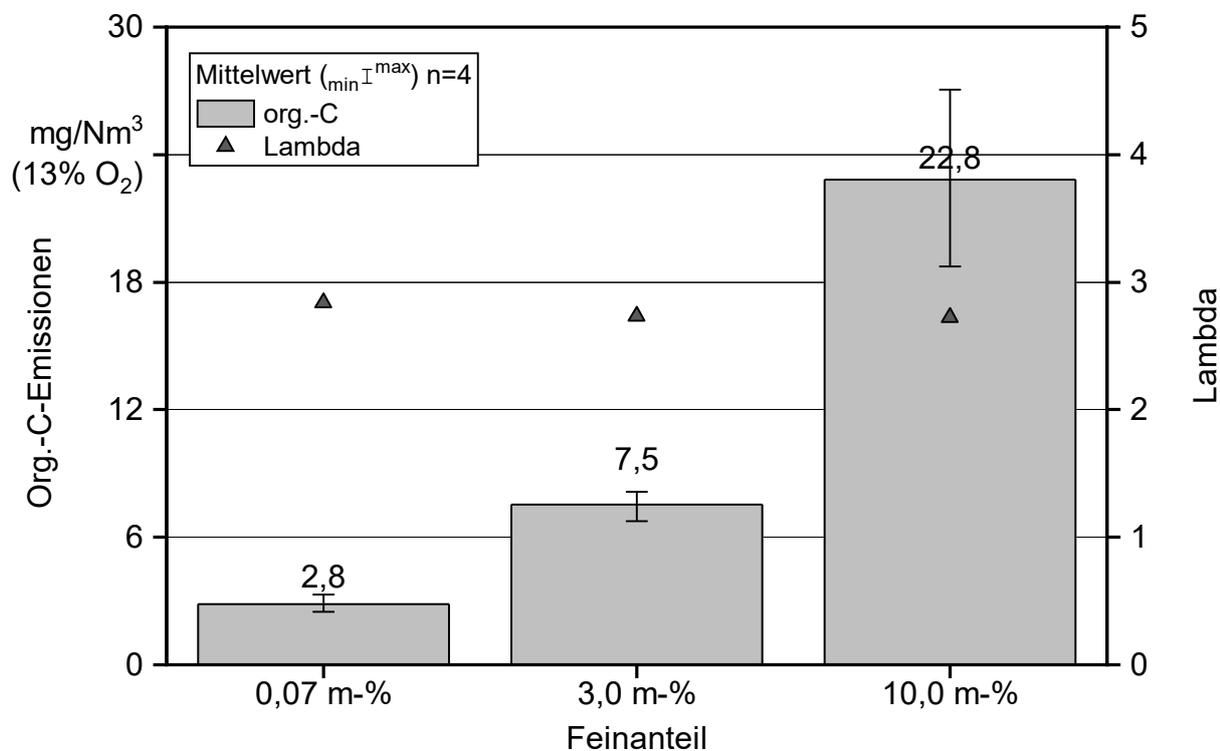


Abbildung 143: Org.-C-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen (Abbildung 144) scheinen mit der Erhöhung des Feinanteils geringfügig abzunehmen, was eventuell mit den mit steigendem Feinanteil sinkenden Temperaturen im Glutbett und dem gleichzeitig höheren Angebot an CO zusammenhängen könnte. Die Unterschiede der Mittelwerte sind allerdings nur im Vergleich zwischen 0,07 m-% und 3 m-% bzw. 0,07 m-% und 10 m-% signifikant. Damit stehen die hier im Pelletofen mit Abwurffeuering erzielten Resultate im Gegensatz zu bisherigen Ergebnissen am TFZ mit einem Pelletkessel mit Unterschubfeuerung, bei dem die NO_x-Emissionen mit steigendem Feinanteil (bis 20 m-%) anstiegen [42].

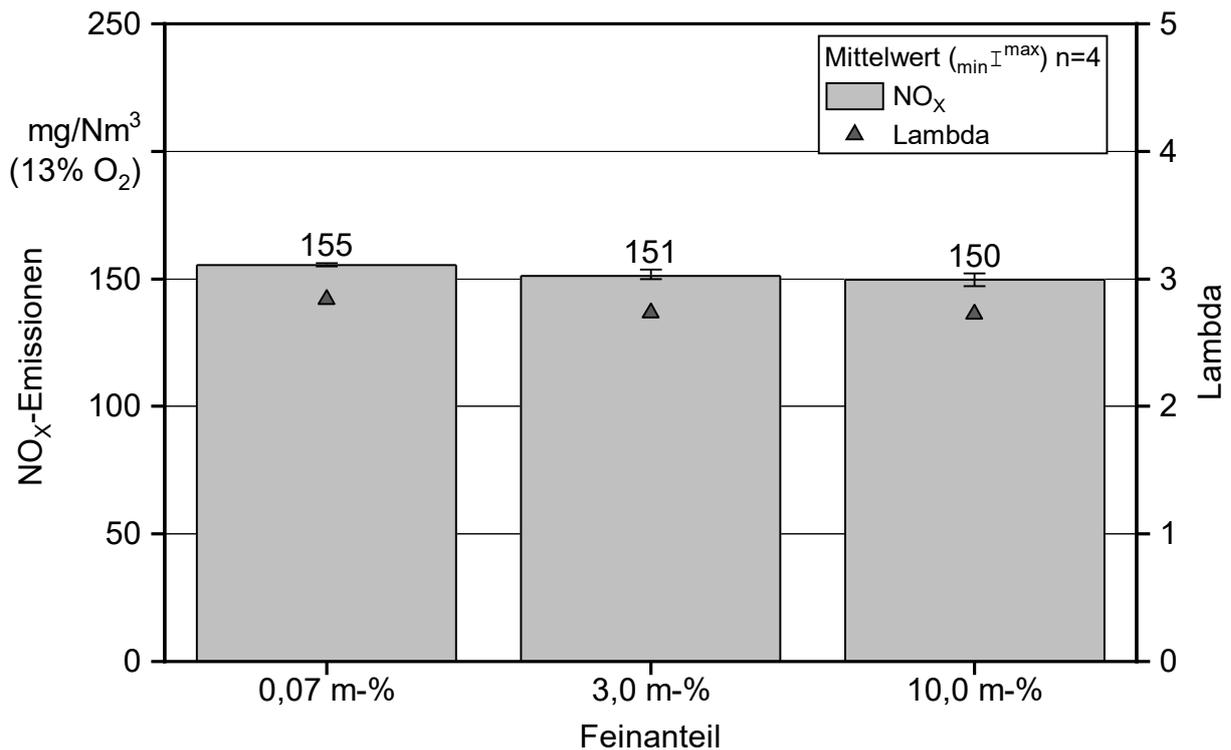


Abbildung 144: NO_x-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

7.2.3.2 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen liegen für die Nullprobe mit 0,07 m-% Feinanteil mit 27 mg/Nm³ knapp unterhalb des derzeit gültigen Grenzwerts (1. BImSchV, Stufe 2) von 30 mg/Nm³. Bei Erhöhung des Feinanteils auf 3 m-% steigen die Gesamtstaubemissionen signifikant auf 30 mg/Nm³ an und erreichen den Grenzwert. Bei einer Erhöhung auf 10 m-% liegen die Gesamtstaubemissionen bei 37 mg/Nm³ und damit nochmals signifikant höher als bei 3 m-% Feinanteil. Bei bisherigen Untersuchungen am TFZ mit einem Pelletkessel mit Unterschubfeuerung war im Gegensatz zum hier untersuchten Pelletofen mit Abwurfteuerung kein Anstieg der Gesamtstaubemissionen festgestellt worden [42].

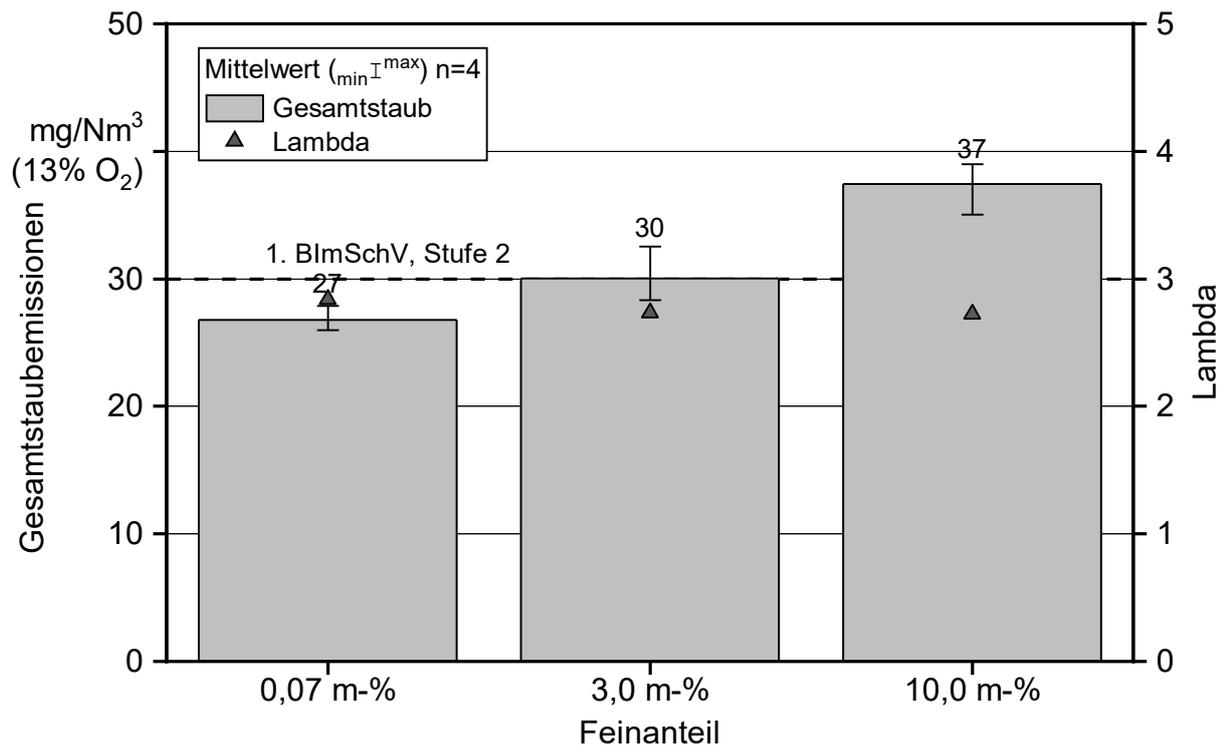


Abbildung 145: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen im Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

7.2.3.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel

Bei den Messungen zur Untersuchung des Einflusses des Feinanteils auf das Emissionsverhalten bei Pelletofen 2 stand das ELPI+ nicht zur Verfügung, daher können hier keine Aussagen zu Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung gemacht werden.

Die Untersuchungen der Filterstäube (Abbildung 146) zeigt eine leichte Zunahme des Anteils an Salzen und Oxiden von 21 mg/Nm³ auf 24 mg/Nm³ bei einer Erhöhung des Feinanteils von 0,07 m-% auf 3,0 m-%. Eine weitere Erhöhung des Feinanteils auf 10,0 m-% führt allerdings zu keinem weiteren Anstieg dieser anorganischen Fraktion. Der Karbonatanteil (IC) der Gesamtstaubemissionen bleibt näherungsweise konstant. Vermutlich erhöht der Feinanteil den Austrag mineralischer Aschepartikel z. B. durch Funkenflug, jedoch nicht den Anteil an Karbonaten, da diese vornehmlich im Glutbett (d. h. hohe Temperaturen + CO₂) entstehen [91]. Die größte Änderung findet beim Anteil elementaren Kohlenstoffs (EC) statt. Hier ist vor allem bei der Erhöhung des Feinanteils von 3 m-% auf 10 m-% eine Erhöhung des Anteils, um den Faktor 4,5 zu beobachten. Dieser Anteil dürfte zum einen durch Rußbildung aufgrund des lokalen Sauerstoffmangels sowie zum anderen durch Holzkohlepartikel, die als Funkenflug sichtbar sind, beim Abwurf des Feinanteils auf das Glutbett entstehen und mit dem Abgasstrom mitgerissen werden. Der Anteil organischen Kohlenstoffs steigt nur geringfügig von 3 mg/Nm³ (0,07 m-% Feinanteil) auf 4 mg/Nm³ (3 – 10 m-% Feinanteil), damit entwickeln sich die partikelförmigen OC-Emissionen in gleicher Weise wie die gasförmigen org.-C-Emissionen (Abschnitt 7.2.3.1, Abbildung 143).

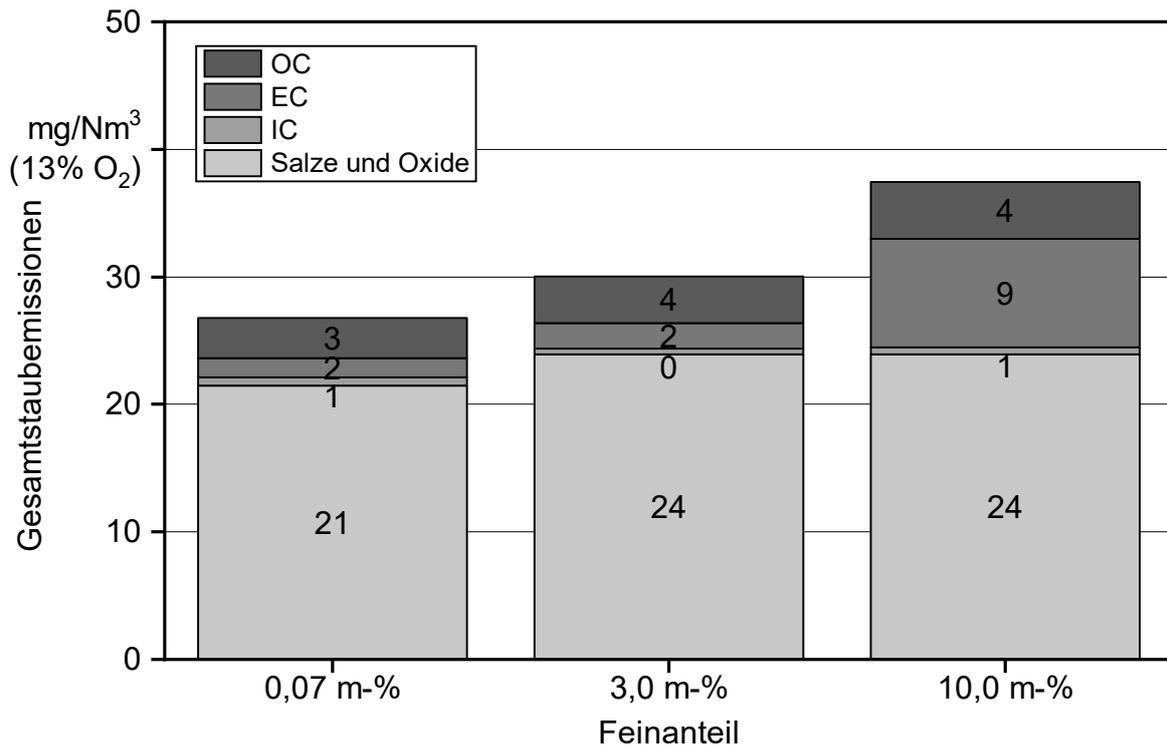


Abbildung 146: Zusammensetzung der Staubbelastung auf den Planfiltern bei unterschiedlichen Brennstoff-Feinanteilen für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

7.2.3.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Die granulometrische Untersuchung der Verbrennungsrückstände aus den Versuchen zum Einfluss des Feinanteils (siehe Abbildung 147) zeigt keinen eindeutigen Trend des Anteils an Partikeln > 2 mm bzw. > 1 mm an der Gesamtaschemenge. Sowohl der Anteil an Partikeln > 2 mm als auch > 1 mm scheint sich bei einer Erhöhung des Feinanteils von 0,07 m-% auf 3 m-% etwas zu erhöhen. Bei einer weiteren Erhöhung des Feinanteils auf 10 m-% sinkt der Anteil an Partikeln > 1 mm wieder unter den Wert bei 0,07 m-% Feinanteil, der Anteil an Partikeln > 2 mm liegt dann zwischen dem Wert bei 0,07 m-% und 3 m-% Feinanteil. Das Absinken des Anteils an Verschlackungen liegt vermutlich am überlagerten Effekt der bei hohem Feinanteil sinkenden Glutbetttemperatur (Abschnitt 7.2.3).

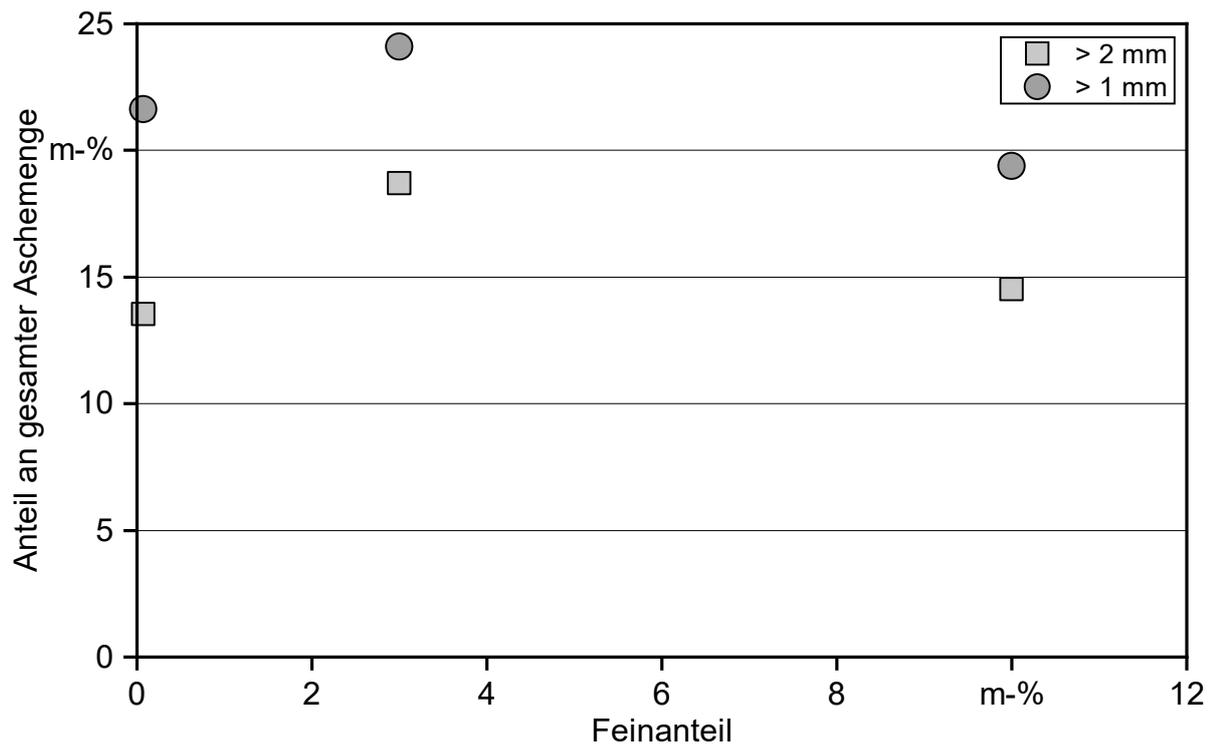


Abbildung 147: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände in Abhängigkeit vom Feinanteil für Pelletofen 2

7.2.3.5 Schlussfolgerungen

Hohe Feinanteile können einen deutlich negativen Effekt auf die gasförmigen Emissionen (CO bis fünffach, org.-C bis zehnfach) und die Gesamtstaubemissionen haben (bis 1,4-fach). Dies gilt vor allem für Abwurff Feuerungen (die meisten Pelletöfen), da hier der Feinanteil von oben auf das Glutbett fällt, teilweise direkt als Funkenflug aufwirbelt und unverbrannte Partikel mit dem Abgasstrom mitgerissen werden oder die Flammen erstickt bzw. die Sauerstoffzufuhr zum Glutbett behindert wird. Der Effekt äußert sich bei Feinanteilen um 3 m-% und steigert sich mit zunehmendem Feinanteil. Ein geringfügiger Effekt auf die Verschlackung scheint bei 3 m-% Feinanteil gegeben, wird aber bei höheren Feinanteilen von dem abkühlenden Effekt auf das Glutbett überlagert. Feinanteile von 3 m-% und darüber stammen meist entweder vom Abrieb in der Förderschnecke oder aus der Entmischung in Pelletbunkern und -vorratsbehältern, vor allem wenn diese nicht regelmäßig gereinigt werden. Dieser Anteil des Feinanteils wird von den derzeitigen Normvorgaben nicht berücksichtigt, da hier nur der Feinanteil im Auslieferungszustand limitiert ist.

7.2.4 Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung von Fichtenpellets auf die Emissionen

Alle zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen hergestellten Versuchspellets wurden in Pelletofen 2 hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens untersucht. Unter Einfluss der Rohstoffaufbereitung fallen in dieser Untersuchung die verwendete Zerkleinerungstechnik (Hammermühle (HM), Kollermühle (KM)),

das eingesetzte Pelletierverfahren (Flachmatrize (Flach), Ringmatrize (Ring)) sowie gezielte Änderungen der Einstellungen an der Pelletieranlage (hier Änderung der Presskanallänge ($< PD$)). Der Einfluss der Rohstofflagerung wurde durch Lagerung feuchter Sägespäne über sieben Monate (Anfang Oktober 2019 bis Ende April 2020) unter Einfluss der Witterung im Freien als Miete ohne Abdeckung (siehe Abbildung 148) und im Bigbag (siehe Abbildung 149) untersucht; diese Späne wurden erst im Anschluss an die Lagerung pelletiert. Die Pelletierbarkeit des gelagerten Materials kann nach Einschätzung des Anlagenführers der Pelletieranlage am TFZ als schwierig im Vergleich zu den nicht gelagerten Rohstoffen eingestuft werden. Für alle hergestellten Fichtensortimente wurde dieselbe Rohstoffcharge (Fichte ohne Rinde) verwendet, wobei die Charge nicht homogenisiert wurde. Die Ergebnisse der Brennstoffanalytik zeigen die Bandbreite der verwendeten Rohstoffe der anfallenden Späne von Stamm zu Stamm auf (Abschnitte 4.2.3 und 5.2.1). Um den Einfluss der Pelletiertechnik untersuchen zu können, musste dem Sortiment am TFZ 0,5 m-% Weizenstärke vor der Pelletierung zugegeben werden, da dieser Anteil auch bei den vom DEPI zur Verfügung gestellten Pellets (Ringmatrize) eingesetzt wurde. Dabei wurde vom DEPI dieselbe Stärke zur Verfügung gestellt.

Tabelle 38 zeigt die zur Diskussion wichtigsten und von der Rohstoffaufbereitung abhängigen Brennstoffparameter sowie erneut die verwendete Pelletiertechnik (Abschnitt 4.2.2, Tabelle 9). Für den Einfluss der gewählten Zerkleinerungstechnik wurden Holzhackschnitzel, die dem Ausgangsmaterial der Sägespäne entsprechen, an das TFZ geliefert und vor Ort mit der Kollermühle auf unter 6 mm zerkleinert. Die gelieferten Sägespäne wurden mit der Hammermühle zerkleinert.



Abbildung 148: Rohmaterial, Sägespan (feucht), sieben Monate im Freien als Miete gelagert



Abbildung 149: Rohmaterial, Sägespan (feucht), sieben Monate im Freien im Bigbag gelagert

Tabelle 38: Übersicht der wichtigsten Brennstoffeigenschaften sowie verwendete Pelletiertechnik der Feuerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung der hergestellten Pellets

Bezeichnung	Energiedichte	Mittlere Pelletlänge	Anteil Pellets < 10 mm	Partikeldichte	Matrizenart	Pressweg Matrize
–	GJ/m ³ , ar	mm	m-%	kg/m ³ , ar	–	mm
Flach HM	12,1	17,0	7,4	1.312	Flachmatrize	24,0
Flach KM/HS	12,6	15,5	8,1	1.342	Flachmatrize	24,0
Flach < PD	11,6	13,9	14,2	1.301	Flachmatrize	18,0
Ring 0,5 WS	12,2	15,3	7,3	1.309	Ringmatrize mit HD-Technik	37,0
Flach 0,5 WS	11,8	17,3	5,1	1.310	Flachmatrize	24,0
Flach Miete	11,9	21,7	2,0	1.299	Flachmatrize	18,0
Flach Bigbag	11,9	19,3	3,6	1.299	Flachmatrize	18,0

Flach = pelletiert mit Flachmatrize; Ring = pelletiert mit Ringmatrize; HM = Ausgangsmaterial Sägespan, zerkleinert mit Hammermühle; KM/HS = Ausgangsmaterial Hackschnitzel, zerkleinert mit Kollermühle; < PD = Versuch, durch Pelletiereinstellung Pellets mit niedriger Partikeldichte herzustellen; WS = Weizenstärke; Miete = Rohmaterial Sägespan, sieben Monate gelagert als kleine Miete; Bigbag = Rohmaterial Sägespan, sieben Monate gelagert in Bigbag im Freien

Tabelle 39 stellt die wesentlichen feuerungstechnischen Parameter zusammen, die zur Diskussion der Ergebnisse aus den Emissionsmessungen dienen. Im direkten Vergleich liegen bei den Brennstoffen teilweise größere Unterschiede in der Energiedichte (12,6–11,6 GJ/m³) vor. Niedrigere Energiedichten lassen sich in den meisten Fällen durch die gleichzeitig größere Pelletlänge (13,9–21,7 mm) erklären. Der Anteil an Pellets < 10 mm

liegt dabei zwischen 2,0 m-% und 14,2 m-%. Die Ausnahme bietet hier das Sortiment „Flach < PD“. Hier wurde durch Reduzierung der Presskanallänge versucht, die Partikeldichte zu beeinflussen, wodurch sich auch die Schüttdichte und damit die Energiedichte trotz insgesamt kürzerer Pellets verringern. Die Partikeldichte liegt bei den untersuchten Sortimenten für das aus Hackgut hergestellte Sortiment („Flach KM/HS“) mit 1.342 kg/m³ im Vergleich am höchsten. Die restlichen Sortimente liegen mit 1.299 kg/m³ bis 1.310 kg/m³ im Schwankungsbereich der Einzelbestimmungen der Partikeldichtebestimmung. Die höhere Partikeldichte der Pellets aus Hackgut lässt im Zusammenhang mit den restlichen Ergebnissen der Brennstoffanalytik (Abschnitt 5.2.1) darauf schließen, dass es bei dem Hackgut Schwankungen der Rohstoffzusammensetzung gegeben hat. Zugleich lässt sich ablesen, dass die verwendete Pelletiertechnik sowie die Lagerung des Rohstoffs kaum Einfluss auf die Partikeldichte haben (siehe Unterschied „Flach HM“ und „Flach < PD“ sowie Flach- und Ringmatrize). Die Pelletlänge hängt in erster Linie von der Homogenität des Rohstoffs, dem Pressweg und der Einstellung der Abscher-Einrichtung ab. Daneben spielen auch die Eigenschaften des Rohmaterials eine Rolle. Hier sind aber vonseiten des Pelletierers nur der Wassergehalt und der Zerkleinerungsgrad des Ausgangsmaterials beeinflussbar. Der Anteil an Pellets < 10 mm lässt sich zudem durch geeignete Siebtechnik regulieren.

Tabelle 38 zeigt, dass bei gleichem Pressweg, aber unterschiedlicher Aufbereitung (Hammermühle oder Kollermühle, Lagerung im Bigbag oder Miete) sowie durch Unterschiede in der eingesetzten Pelletiertechnik (Flachmatrize oder Ringmatrize, HD-Technik oder konventionell, 18–36 mm Pressweg) die Pelletlänge beeinflusst wird.

Hinsichtlich des Brennstoffmassenstroms weisen die mit 0,5 m-% Weizenstärke pelletierten Sortimente mit 1,56 kg/h („Ring 0,5 WS“) bzw. 1,51 kg/h („Flach 0,5 WS“) den höchsten und die Pellets aus gelagertem Material mit 1,30 kg/h („Flach Bigbag“) bzw. 1,32 kg/h („Flach Miete“) den niedrigsten Brennstoffmassenstrom auf. Die restlichen Sortimente liegen mit 1,42–1,48 kg/h eng beieinander. Signifikant unterscheiden sich hier auch nur die beiden Sortimente mit Weizenstärke zu den beiden Sortimenten aus gelagertem Rohstoff. Bei den Lambda-Werten liegt das Sortiment „Ring 0,5 WS“ mit 2,5 am niedrigsten und ist signifikant niedriger als die Lambda-Werte für „Flach KM/HS“ (2,89), „Flach HM“ (2,84), „Flach 0,5 WS“ (2,81), „Flach Miete“ (3,05) und „Flach Bigbag“ (3,05). Außerdem liegt noch ein signifikanter Unterschied der Lambda-Werte zwischen „Flach 0,5 WS“ und „Flach Miete“ vor. Die Unterschiede im Lambda-Wert resultieren zum Großteil aus Unterschieden der mittleren Pelletlänge ($R^2 = 0,51$, siehe Abbildung 150).

Tabelle 39: *Feuerungstechnische Parameter und Brennstoffeigenschaften der Feuerungsversuche in der Untersuchung zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2*

Bezeichnung	Brennstoffverbrauch kg/h	Lambda	Brennraumtemperatur °C	Glutbetttemperatur °C	Druckverlust über Glutbett Pa
Flach HM	1,42 ± 0,05	2,84 ± 0,01	606 ± 8,1	830 ± 23,6	28 ± 0,31
Flach KM/HS	1,43 ± 0,06	2,89 ± 0,09	599 ± 13,7	843 ± 12,5	28 ± 0,59
Flach < PD	1,48 ± 0,10	2,56 ± 0,02	622 ± 7,5	803 ± 4,0	27 ± 0,53
Ring 0,5 WS	1,56 ± 0,05	2,50 ± 0,15	629 ± 15,3	815 ± 9,2	28 ± 0,48
Flach 0,5 WS	1,51 ± 0,12	2,81 ± 0,07	606 ± 2,8	805 ± 11,7	29 ± 0,86
Flach Miete	1,32 ± 0,08	3,05 ± 0,1	580 ± 9,4	784 ± 8,3	25 ± 0,29
Flach BigBag	1,30 ± 0,02	3,08 ± 0,13	572 ± 10,7	769 ± 8,4	25 ± 0,32

Flach = pelletiert mit Flachmatrize; Ring = pelletiert mit Ringmatrize; HM = Ausgangsmaterial Sägespan, zerkleinert mit Hammermühle; KM/HS = Ausgangsmaterial Hackschnitzel, zerkleinert mit Kollermühle; < PD = Versuch, durch Pelletiereinstellung Pellets mit niedriger Partikeldichte herzustellen; WS = Weizenstärke; Miete = Rohmaterial Sägespan, sieben Monate gelagert als kleine Miete; Bigbag = Rohmaterial Sägespan, sieben Monate gelagert in Bigbag im Freien

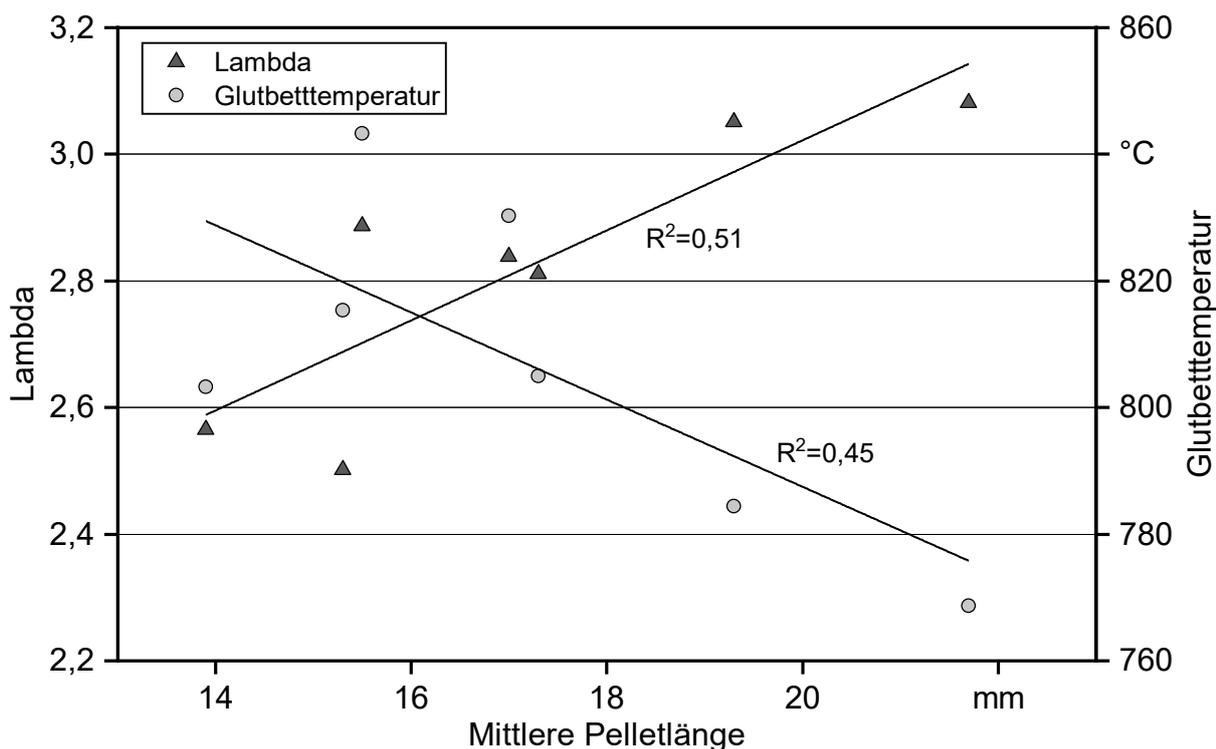


Abbildung 150: *Abhängigkeit der Lambda-Werte und der Glutbetttemperatur von der mittleren Pelletlänge in der Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)*

Die Brennraumtemperatur liegt für die untersuchten Sortimente zwischen 629 °C („Ring 0,5 WS“) und 572 °C („Flach Bigbag“) und damit für die mit der Ringmatrize pelletierten Pellets signifikant höher als für „Flach KM/HS“, „Flach Bigbag“ und „Flach Miete“. Für Sor-

timent „Flach Miete“ liegen die Brennraumtemperaturen außerdem signifikant niedriger als für „Fichte Flach HM“ und „Flach 0,5 WS“. Die Glutbetttemperatur liegt zwischen 843 °C („Flach KM/HS“) und 769 °C („Flach Bigbag“). Hier sind die Pellets aus gelagertem Ausgangsmaterial signifikant niedriger als bei allen anderen Sortimenten bis auf „Flach < PD“. Außerdem unterscheiden sich noch die Sortimente „Flach KM/HS“ und „Flach 0,5 WS“ signifikant. Der Zusammenhang zwischen Glutbetttemperatur und Brennkammertemperatur ($R^2 = 0,31$, nicht dargestellt) ist nur schwach ausgeprägt. Die Glutbetttemperatur ist, wie auch der Lambda-Wert, von der mittleren Pelletlänge abhängig (siehe Abbildung 150). Auch der Anteil an Pellets < 10 mm hat einen zur Pelletlänge vergleichbaren Einfluss auf den Lambda-Wert ($R^2 = 0,52$) und zu einem etwas geringeren Teil auf die Glutbetttemperatur ($R^2 = 0,35$, siehe Abbildung 151). Außerdem wirkt sich auch die Energiedichte auf die Glutbetttemperatur ($R^2 = 0,41$, nicht dargestellt) aus. Zu einem Großteil ($R^2 = 0,81$, nicht gezeigt) bedingen sich diese Parameter gegenseitig. Dieser Zusammenhang ist aber vermutlich beim Einsatz von Siebtechnik nicht mehr gegeben.

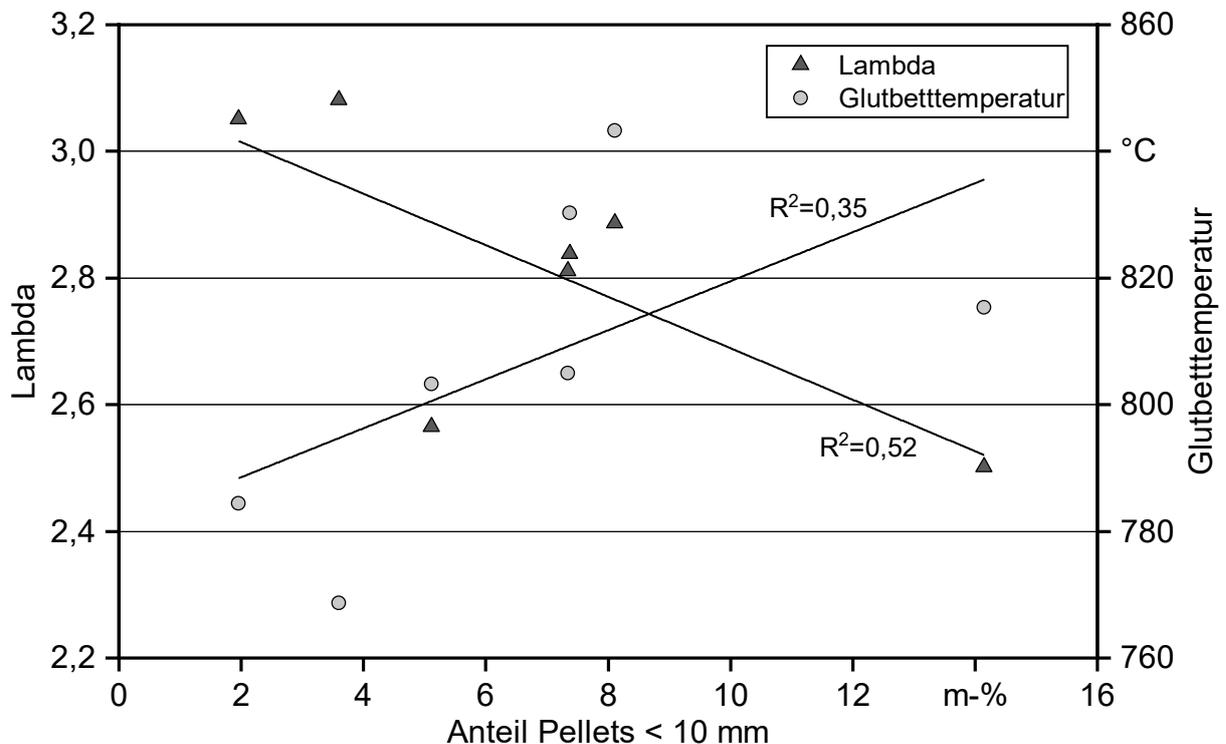


Abbildung 151: Abhängigkeit der Lambda-Werte und der Glutbetttemperatur mit Anteil an Pellets < 10 mm zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen für Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

Die Druckdifferenz über das Glutbett liegt für die untersuchten Sortimente zwischen 29 Pa für „Flach 0,5 WS“ und 25 Pa für die Sortimente aus gelagertem Rohmaterial und ist auch im Wesentlichen von der Pelletlänge abhängig ($R^2 = 0,69$, nicht dargestellt)

7.2.4.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung sind in Abbildung 152 dargestellt. Sie liegen zwischen 97 mg/Nm³ („Flach KM/HS“) und 144 mg/Nm³ („Ring 0,5 WS“), dies sind auch die einzigen Sortimente, die sich signifikant unterscheiden. Da hier die Vermutung nahe liegt, dass es sich nicht um den gleichen Rohstoff handelt, kann dies nicht eindeutig der unterschiedlichen Zerkleinerungstechnik zugeschrieben werden. Ein Zusammenhang der CO-Emissionen mit der Pelletlänge wie in Abschnitt 7.2.1 kann hier aufgrund der sehr ähnlichen CO-Emissionen nicht nachgewiesen werden ($R^2 = 0,03$, nicht dargestellt). Ebenso führt eine Rohstofflagerung nicht zu einer Erhöhung der CO-Emissionen.

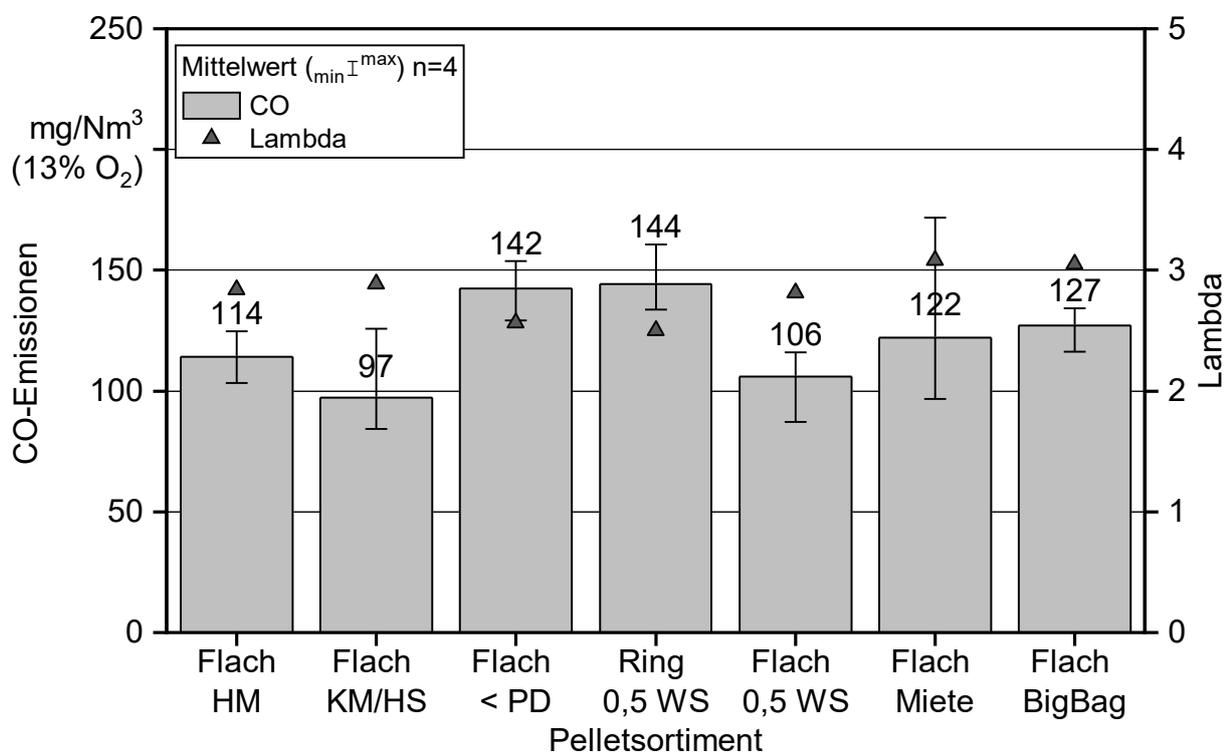


Abbildung 152: CO-Emissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen (org.-C). Die Emissionen gasförmiger organischer Kohlenwasserstoffe liegen zwischen 2,4 mg/Nm³ „Flach 0,5 WS“ und 6 mg/Nm³ „Ring 0,5 WS“ (Abbildung 153). Dabei sind die org.-C-Emissionen der mit der Ringmatrize pelletierten Pellets signifikant höher als die der anderen Sortimente, wengleich sich hierfür keine plausible Erklärung anbietet. Die restlichen Sortimente weisen hinsichtlich der org.-C-Emissionen keine signifikanten Unterschiede auf.

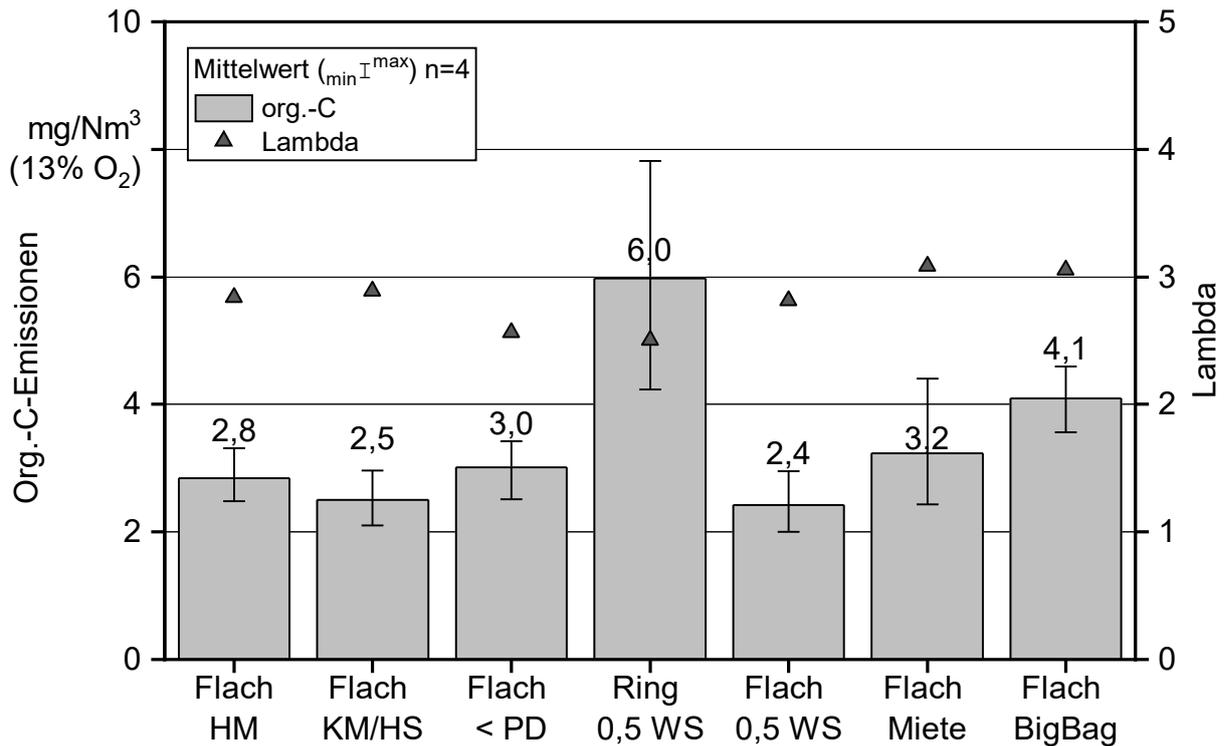


Abbildung 153: Org.-C-Emissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen (Abbildung 154) liegen zwischen 122 mg/Nm³ („Flach Bigbag“) und 165 mg/Nm³ („Flach 0,5 WS“). Die Unterschiede zwischen den mittleren NO_x-Emissionen sind zwischen allen untersuchten Sortimenten signifikant und lassen sich eindeutig durch natürliche Schwankungen beim Stickstoffgehalt im Brennstoff erklären, wie die lineare Regression ($R^2 = 0,92$) in Abbildung 155 zeigt. Auch die Zugabe von Bindemitteln kann den Stickstoffgehalt und damit die NO_x-Emissionen beeinflussen (Anhang 2, Tabelle 84 und Abschnitt 7.2.5.1). Ein direkter Einfluss der Rohstoffaufbereitung auf die NO_x-Emissionen ist hier nicht erkennbar und ist auch nicht erwartet worden. Die Werte für die Pellets aus gelagertem Sägespan sind mit am niedrigsten, allerdings liegen diese so nah an den Stickstoffgehalten der restlichen Sortimente, dass hier aufgrund des natürlichen Schwankungsbereichs kein Effekt der Lagerung auf die NO_x-Emissionen erkennbar ist.

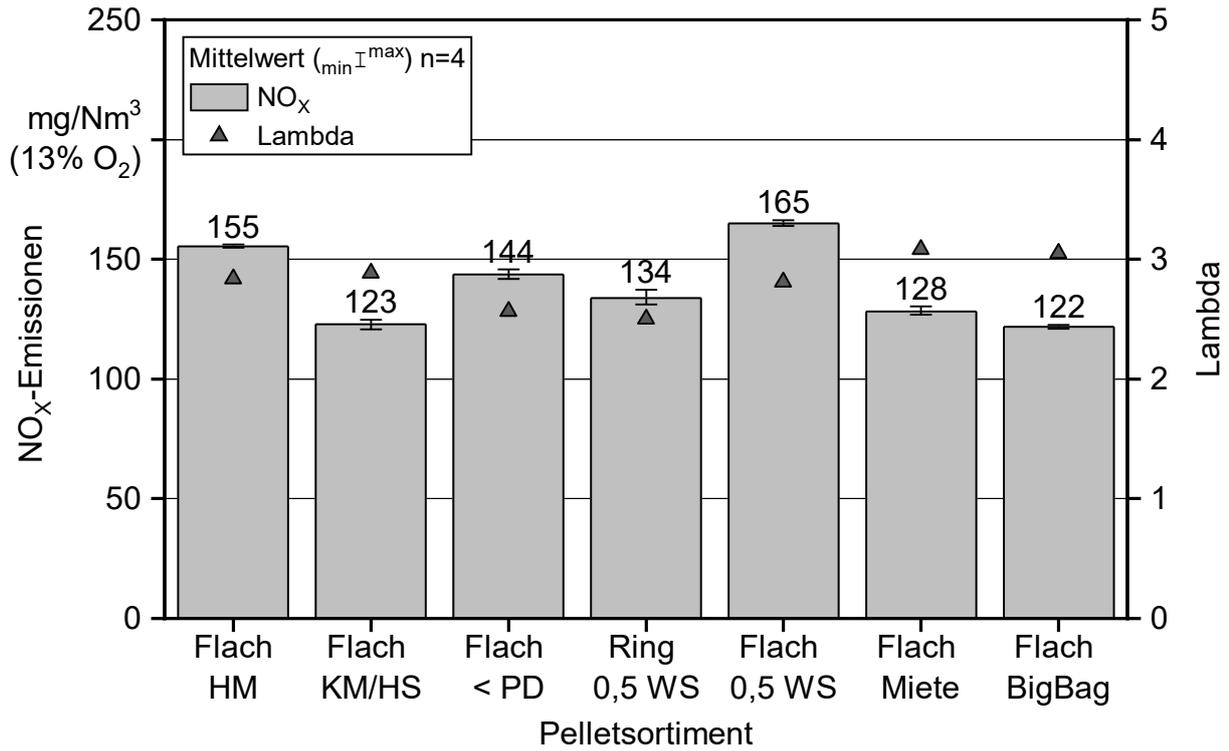


Abbildung 154: NO_x-Emissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

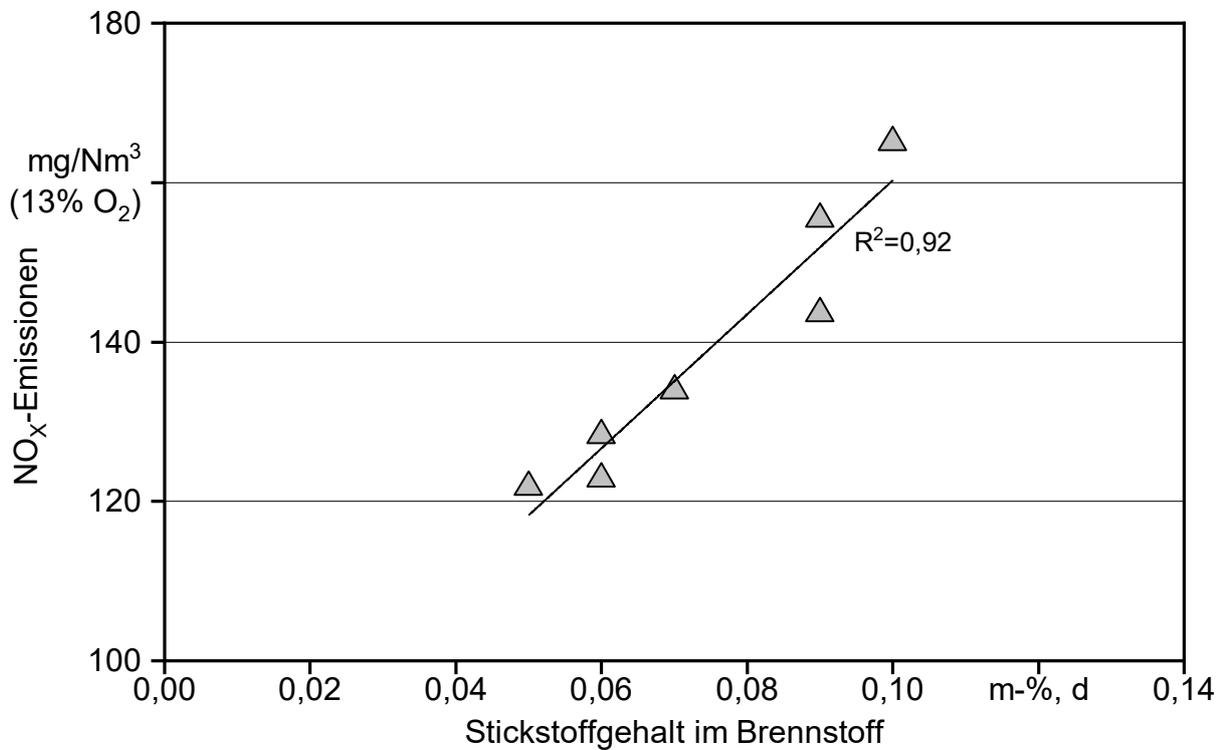


Abbildung 155: Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom Stickstoffgehalt der Brennstoffe zur Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Emissionen für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

7.2.4.2 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen (siehe Abbildung 156) liegen für die untersuchten Sortimente auf einem vergleichbaren Niveau zwischen 23 mg/Nm³ („Flach KM/HS“) und 28 mg/Nm³ („Flach HM < PD“). Die Mittelwerte der Gesamtstaubemissionen unterscheiden sich dabei in keinem Fall statistisch signifikant. Auffällig ist, dass die zwei mit Weizenstärke pelletierten Sortimente im Vergleich mit den anderen Sortimenten eine wesentlich höhere Streuung der Einzelwerte aufweisen (Abschnitt 7.2.5). Ein Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung auf die Gesamtstaubemissionen kann ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei Untersuchungen am TFZ zur Lagerung von Hackgut in Silos und Mieten ein negativer Effekt (höhere Emissionen) auf die CO- und Gesamtstaubemissionen [57]. Allerdings ist bei Hackgut auch der Rindenanteil höher, wodurch wahrscheinlich mehr Nährstoffe für die zum Abbau der Biomasse erforderlichen Mikroorganismen und Pilze zur Verfügung stehen und somit die Veränderungen im Lager andersartig sind.

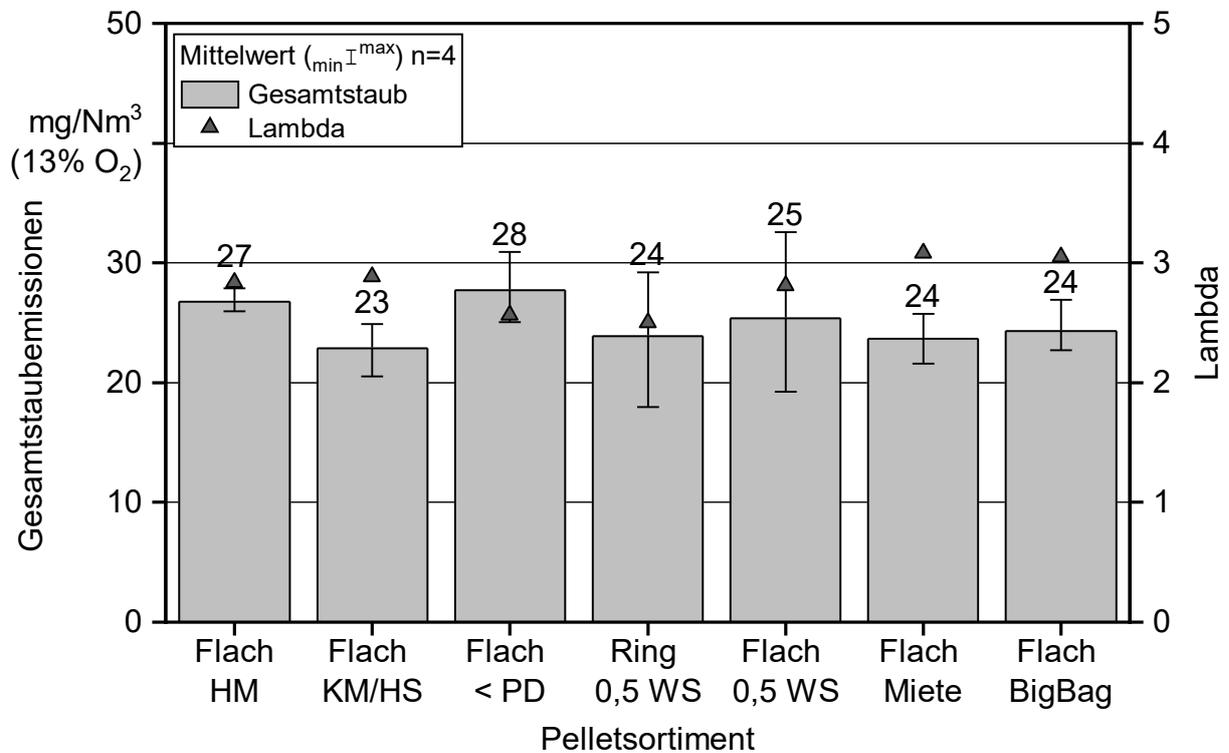


Abbildung 156: Gesamtstaubemissionen und Lambda-Werte der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

7.2.4.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel

Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung. Während der Messungen mit den Pellets aus gelagertem Sägespan stand das ELPI+ nicht zur Verfügung, daher fehlen für diese zwei Sortimente hier die Partikelanzahl und die Anzahlverteilung. Die gesamte Partikelanzahl der gemessenen Sortimente liegt mit $3,5 \times 10^7/\text{cm}^3$ („Ring 0,5 WS“) bis $4,5 \times 10^7/\text{cm}^3$ („Flach 0,5 WS“) wie die Gesamtstaubemissionen auf einem vergleichbaren Niveau. Auch

hinsichtlich der Partikelanzahlverteilung (Abbildung 157) sind die Sortimente gut vergleichbar. Hier liegt der größte Unterschied in der Größenklasse 40–230 nm mit ca. $1,0 \times 10^7/\text{cm}^3$ zwischen „Ring 0,5 WS“ und „Flach 0,5 WS“. Die restlichen drei Sortimente liegen auch hier auf einem sehr gut vergleichbaren Niveau.

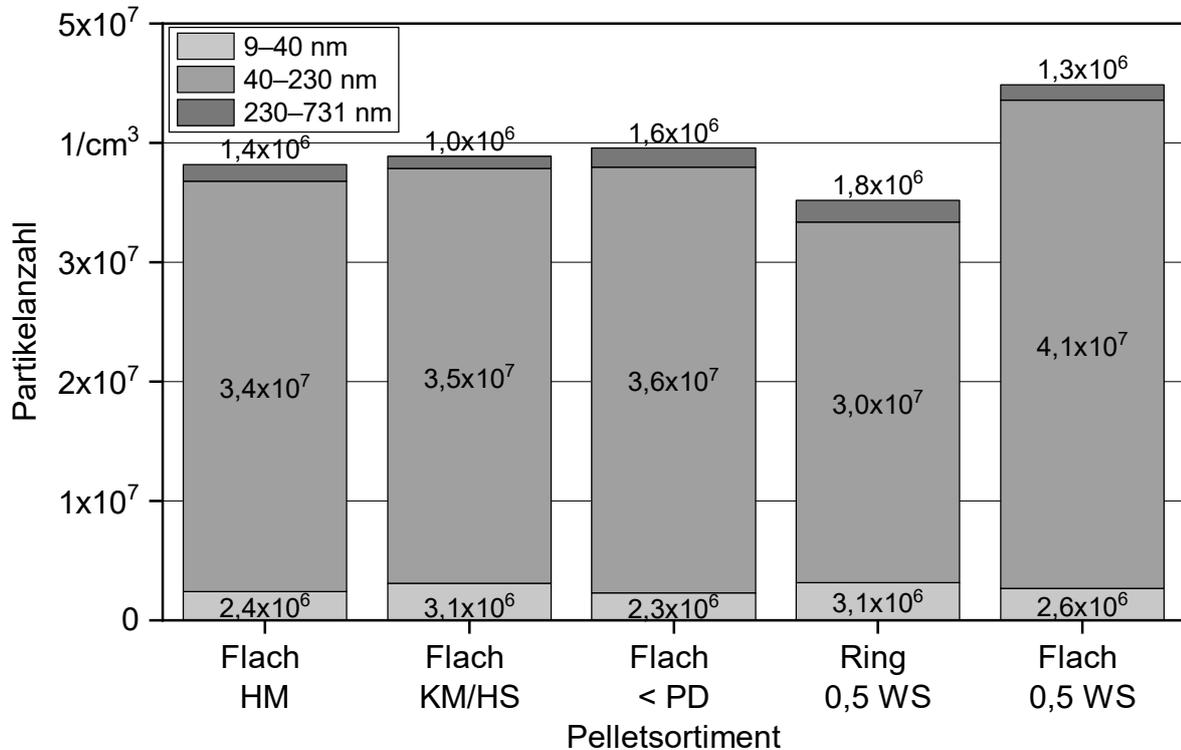


Abbildung 157: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer der Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2 gemittelt (1 h)

Zusammensetzung der Staubpartikel. Vergleicht man die Gesamtstaubemissionen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung bezüglich der unterschiedlichen Kohlenstoffformen (siehe Abbildung 158), so fallen hier doch Unterschiede auf. Der Anteil von Salzen und Oxiden an den Gesamtstaubemissionen liegt zwischen $16 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ („Ring 0,5 WS“) und $27 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ („Flach HM < PD“).

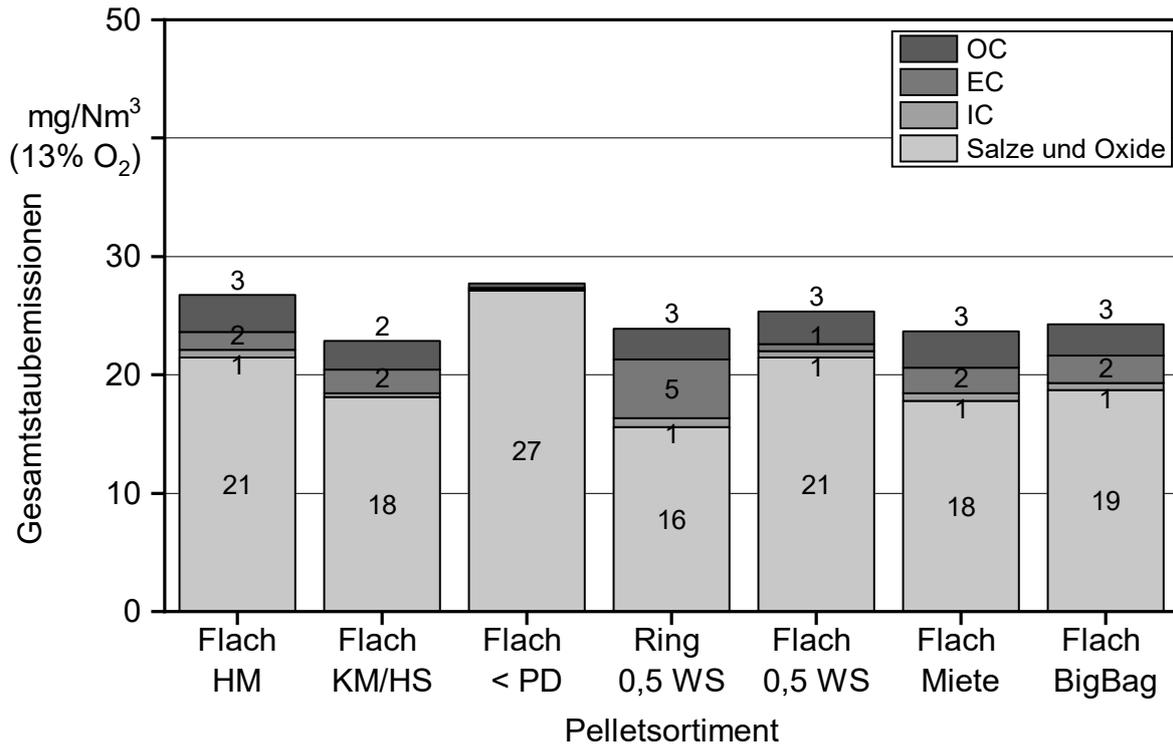


Abbildung 158: Zusammensetzung der Staubbiladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung für Pellet-ofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

Der Anteil an Salzen und Oxiden ist dabei zum Großteil ($R^2 = 0,62$) vom Kaliumgehalt abhängig (siehe Abbildung 159). Dies veranschaulicht zugleich wieder die Problematik der natürlichen Inhomogenität des verwendeten Ausgangsmaterials. Gleichzeitig scheint aber auch die Energiedichte ($R^2 = 0,43$) einen mindernden Effekt auf die Freisetzung der mineralischen Staubemissionen zu haben. Dies ist am auffälligsten für das auf niedrige Partikeldichte hin pelletierte Sortiment, hier liegen gleichzeitig ein höherer Kaliumgehalt und die niedrigste Energiedichte vor. Gleichzeitig ist hier auch die mechanische Festigkeit der Pellets am niedrigsten (Abschnitt 5.2.1). Größere Unterschiede bei der Zusammensetzung der Gesamtstaubemissionen gibt es sonst nur beim elementaren Kohlenstoff (wahrscheinlich Ruß). Die Emissionen an EC liegen hier zwischen ca. 0 mg/Nm^3 („Flach < PD“) und ca. 5 mg/Nm^3 („Ring 0,5 WS“) und scheinen unter anderem von der Energiedichte beeinflusst zu werden ($R^2 = 0,22$, siehe Abbildung 160). Höhere Energiedichten fördern somit die vermutlich durch lokalen Sauerstoffmangel verursachte Rußbildung und somit den Ausstoß elementaren Kohlenstoffs. Die Energiedichte ist allerdings nur bedingt beeinflussbar, z. B. durch die Pelletlänge über die Rohstoffaufbereitung bzw. Pelletierung, sie ist stattdessen eher vom verwendeten Rohmaterial selbst abhängig. Die Emissionen an IC und OC bleiben bis auf „Flach < PD“ relativ konstant.

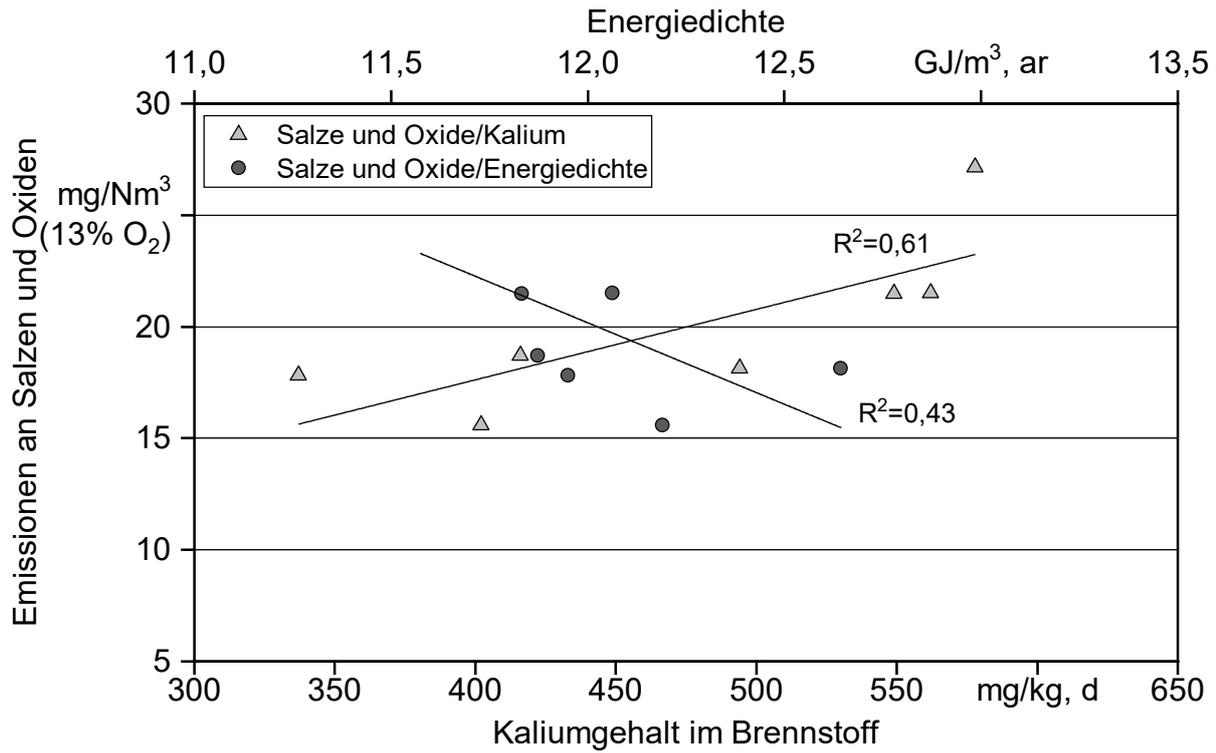


Abbildung 159: Abhängigkeit der Salze und Oxide der Gesamtstaubemissionen vom Kaliumgehalt im Brennstoff und der Energiedichte der Pelletsortimente der Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung an Pelletofen 2

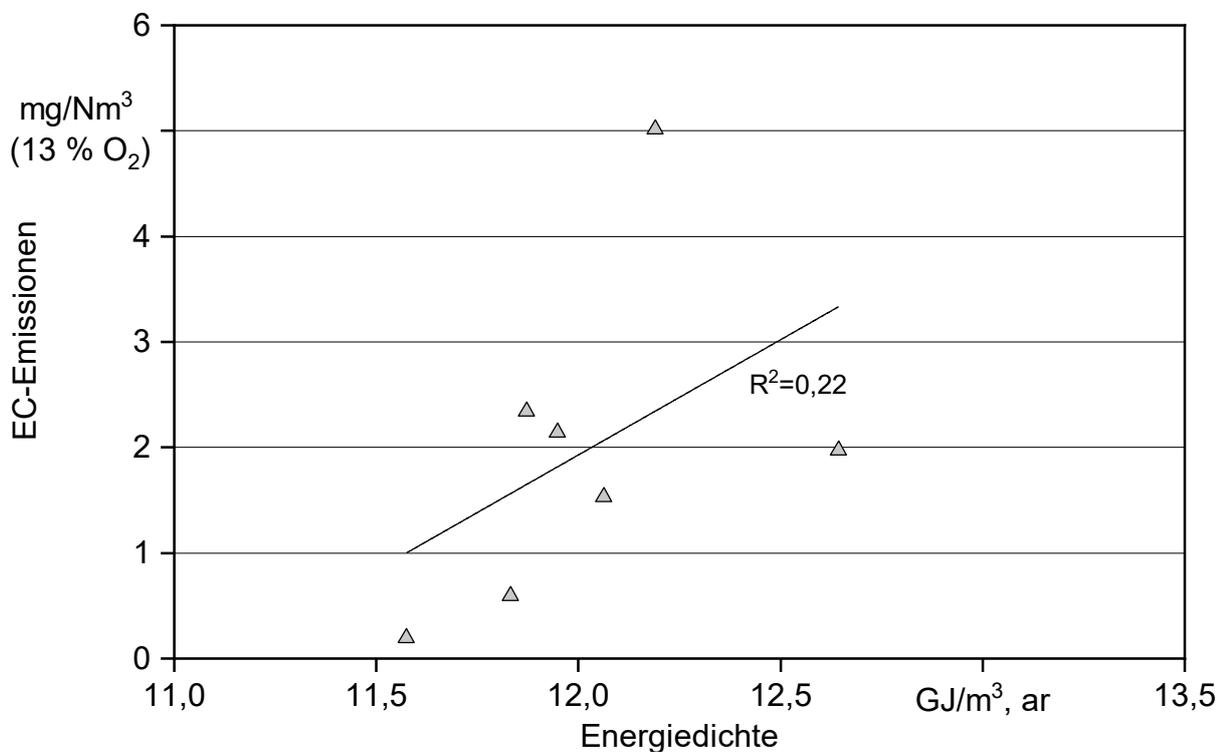


Abbildung 160: Abhängigkeit der Emissionen elementaren Kohlenstoffs von der Energiedichte der Pelletsortimente der Untersuchung des Einflusses der Rohstoffaufbereitung und -lagerung für Pelletofen 2

7.2.4.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Die granulometrische Untersuchung der Verbrennungsrückstände (Abbildung 161) ergibt einen Anteil an Partikeln > 2 mm an der gesamten Aschemenge von 5 m-% („Ring 0,5 WS“) bis 17 m-% („Flach Bigbag“). Der Anteil an Partikeln > 1 mm liegt zwischen 14 m-% („Flach Miete“) und 28 m-% („Flach KM/HS“). Die Betrachtung der Partikel > 2 mm würde für die hier untersuchten Pelletsortimente demnach zu einer anderen Einschätzung hinsichtlich der Verschlackung führen als die der Partikel > 1 mm.

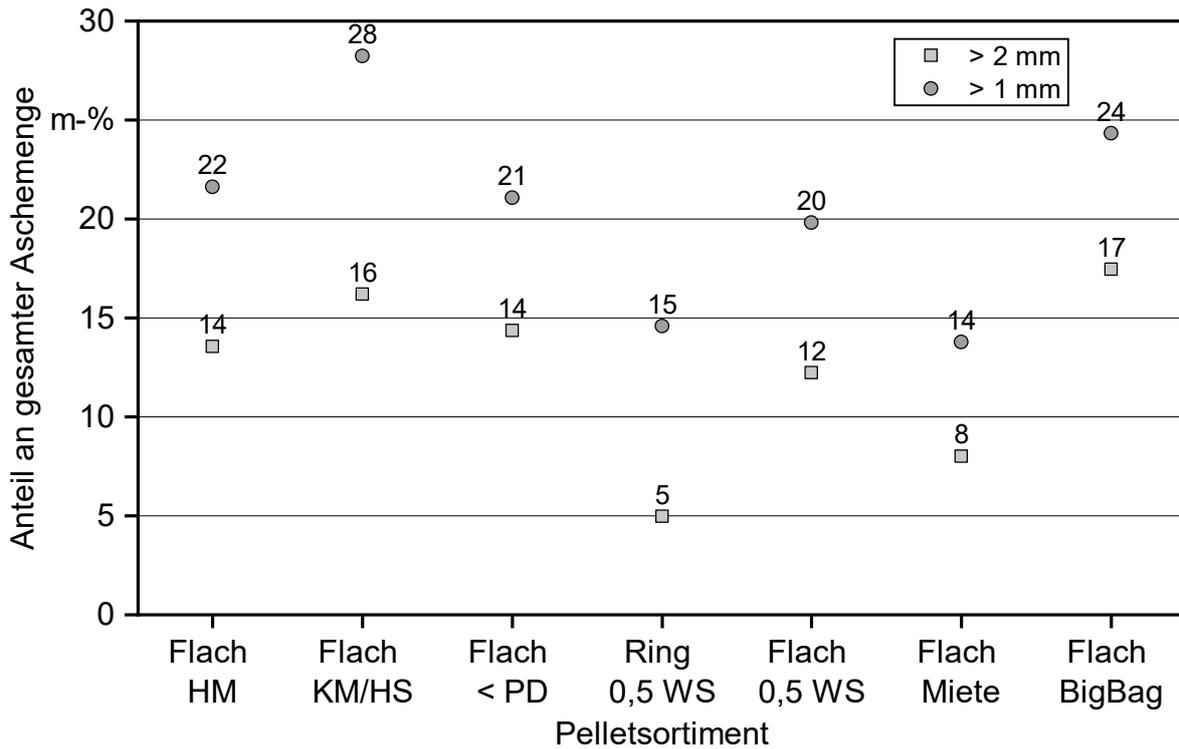


Abbildung 161: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände von den Messungen zum Einfluss der Rohstoffaufbereitung und -lagerung für Pelletofen 2

Tabelle 40 zeigt die Ergebnisse linearer Regressionen mit den Anteilen der Asche an Partikeln > 2 mm und > 1 mm und der gesamten Aschemenge mit der mittleren Pelletlänge, der Energiedichte, dem Schlackeindex $(Si + P + K)/(Ca + Mg)$ und der Glutbetttemperatur. Während der Anteil an Partikeln > 2 mm auf keinen der gewählten Parameter reagiert, scheint der Anteil an Partikeln > 1 mm zum Teil abhängig von allen vier Parametern zu sein, wobei sich die Parameter mittlere Pelletlänge, Energiedichte und Glutbetttemperatur auch untereinander beeinflussen. Der Anteil von Partikeln > 2 mm scheint hier also weniger aussagekräftig zu sein. Die Brennstoffparameter sind größtenteils den Eigenschaften des Rohstoffs (Energiedichte (zum Großteil) und Schlackeindex) zuzuordnen, und nur die mittlere Pelletlänge hängt eindeutig von der Rohstoffaufbereitung ab.

Tabelle 40: Ergebnisse linearer Regressionen ausgewählter Brennstoff- bzw. feuerungstechnischer Parameter mit dem Anteil an Partikeln > 2 mm und > 1 mm an der gesamten Aschemenge an Pelletofen 2

Brennstoffparameter	R ² (> 2 mm)	R ² (> 1 mm)
Mittlere Pelletlänge	0,01	0,10
Energiedichte	0,00	0,12
Schlackeindex	0,00	0,18
Glutbetttemperatur	0,00	0,11

7.2.4.5 Schlussfolgerungen

Es konnten keine signifikanten Einflüsse der gasförmigen Emissionen oder Gesamtstaubemissionen mit der Art der Rohstoffaufbereitung oder -lagerung in Verbindung gebracht werden. Wenn signifikante Unterschiede vorlagen, waren diese in den Inhomogenitäten der verwendeten Rohstoffe begründet. Unterschiede bei der Staubzusammensetzung waren einerseits wieder abhängig von der Inhomogenität der Rohmaterialien hinsichtlich des Kaliumgehalts. Andererseits hatte bei den Emissionen an elementarem Kohlenstoff (Ruß) auch die Energiedichte einen Einfluss, die anteilig auch von der Rohstoffaufbereitung abhängt.

7.2.5 Einfluss von Additiven bei Fichtenpellets auf die Emissionen

Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Additive wurden die Bindemittel weizenstärkehaltiges Mehl (WS), native Kartoffelstärke (KSn) und Kartoffelstärke in abfallender Qualität (KSa) verwendet. Außerdem wurde als Additiv zur Verbesserung des Emissionsverhaltens Kaolin hinzugefügt (Abschnitt 4.2.1). Alle Sortimente wurden in Pelletofen 2 und eine Auswahl in Pelletkessel 1 hinsichtlich des Emissionsverhaltens untersucht. Tabelle 41 zeigt die wichtigsten für die Diskussion der Ergebnisse aus den Emissionsmessungen herangezogenen Brennstoffparameter.

Die mittlere Pelletlänge liegt für die untersuchten Sortimente zwischen 17,0 mm (Fichte) und 23,0 mm (Fichte 1,8 KSn) und nimmt bei der Additivierung im Vergleich zu Fichte für alle Sortimente zu. Allerdings musste durch die vom Additiv veränderten Gleiteigenschaften der Rohstoffmischung teilweise auch eine andere Matrize verwendet werden. Für die mit weizenstärkehaltigem Mehl (WS) und nativer Kartoffelstärke (KSn) additivierten Sortimente steigt die mittlere Pelletlänge auch mit zunehmendem Stärkeanteil an, während sie bei Kartoffelstärke mit abfallender Qualität und Kaolin näherungsweise konstant bleibt. Die Energiedichten liegen zwischen 11,0 GJ/m³ („Fichte 1,8 KSn“ und „Fichte 1,8 KSa“) und 12,3 GJ/m³ („Fichte 1,8 WS“) und werden hier wesentlich durch die mittlere Pelletlänge (R² = 0,71, nicht dargestellt) beeinflusst. Trotzdem weist das Sortiment bei weizenstärkehaltigem Mehl eine steigende Energiedichte trotz steigender Pelletlänge von 0,5 auf 1,8 m-% auf. Bei Kartoffelstärke und Kaolin fallen die Energiedichten leicht ab mit steigendem Additivgehalt. Die Unterschiede lassen sich hier aber durch leichte Unterschiede im

Wassergehalt erklären (Abschnitt 5.2.1, Abbildung 54). Der Gehalt aerosolbildender Elemente liegt zwischen 491 mg/kg („Fichte 0,17 Kao“) und 610 mg/kg („Fichte 1,8 WS“). Durch natürliche Schwankungen im Rohstoff sowie durch Analysenfehler (bis 20 % vom Messwert) liegt der Gehalt an Aerosolbildnern für die additivierten Brennstoffe teilweise niedriger als für die Nullprobe „Fichte“. Trotzdem ist bei allen Sortimenten bei gleichem Additiv eine Zunahme der aerosolbildenden Elemente mit zunehmenden Additivgehalt erkennbar. Am größten fällt diese Zunahme bei Kartoffelstärke mit abfallender Qualität mit ca. 56 mg/kg von 0,5 m-% auf 1,8 m-% Additivgehalt aus. Das Si/K-Verhältnis liegt zwischen 0,3 (alle außer mit Kaolin) und 1,2 („Fichte 0,34 Kao“) und wird nur durch die Additivierung mit Kaolin beeinflusst.

Tabelle 41: Übersicht der wichtigsten Brennstoffparameter der zur Untersuchung des Einflusses von Additiven verwendeten Pelletsortimente

Bezeichnung	Mittlere Pelletlänge	Energiedichte	Summe Aerosolbildner	Si/K
–	mm	GJ/m ³ , ar	mg/kg, d	mol/mol
Fichte	17,0	12,1	578	0,3
Fichte 0,5 WS	17,3	11,8	568	0,3
Fichte 1,8 WS	18,3	12,3	610	0,3
Fichte 0,5 KSn	21,9	11,5	504	0,3
Fichte 1,8 KSn	23,0	11,0	540	0,3
Fichte 0,5 KSa	21,7	11,1	522	0,3
Fichte 1,8 KSa	21,4	11,0	578	0,3
Fichte 0,17 Kao	21,1	11,6	491	0,4
Fichte 0,34 Kao	21,8	11,5	503	1,2

Tabelle 42 zeigt die wichtigsten zur Diskussion der Ergebnisse relevanten feuerungstechnischen Parameter. Der Brennstoffmassenstrom liegt für die untersuchten Sortimente zwischen 1,28 kg/h („Fichte 1,8 KSa“) und 1,51 kg/h („Fichte 0,5 WS“) und scheint im Wesentlichen von der mittleren Pelletlänge ($R^2 = 0,62$) sowie der Energiedichte ($R^2 = 0,53$) beeinflusst zu sein (siehe Abbildung 162). Die Unterschiede der Brennstoffmassenströme sind allerdings statistisch nicht signifikant. Die Lambda-Werte liegen zwischen 2,8 („Fichte“ und „Fichte 0,5 WS“) und 3,2 („Fichte 1,8 KSa“) und werden ebenfalls von der mittleren Pelletlänge ($R^2 = 0,39$) sowie der Energiedichte ($R^2 = 0,60$) beeinflusst (siehe Abbildung 162). Bei den Mittelwerten unterscheiden sich hier nur die Lambda-Werte für „Fichte 0,5 KSa“ signifikant von „Fichte 1,8 WS“ sowie „Fichte 1,8 KSa“ von „Fichte“, „Fichte 0,5 WS“, „Fichte 1,8 WS“, „Fichte 0,17 Kao“ und „Fichte 0,34 Kao“. Die Brennraumtemperatur liegt zwischen 523 °C („Fichte 0,5 KSn“) und 611 °C („Fichte 1,8 WS“) und die Mittelwerte unterscheiden sich in den meisten Fällen signifikant. Die Glutbetttemperatur beträgt zwischen 784 °C („Fichte 0,5 KSn“) und 837 °C („Fichte 0,34 Kao“), wobei sich die Mittelwerte zwischen „Fichte 0,5 KSn“ und „Fichte“, „Fichte 1,8 WS“ und „Fichte 0,34 Kao“ signifikant unterscheiden. Die Glutbetttemperatur und die Brennkammertemperatur hängen dabei

nicht direkt voneinander ab ($R^2 = 0,08$, nicht dargestellt). Der Druckverlust über das Glutbett liegt mit 26 Pa bis 29 Pa in einem engen Bereich.

Tabelle 42: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses von Additiven für Pelletofen 2

Bezeichnung	Brennstoffverbrauch kg/h, ar	Lambda	Brennraum- temperatur °C	Glutbett- temperatur °C	Druckverlust über Glutbett Pa
Fichte	1,42 ± 0,05	2,8 ± 0,01	606 ± 8,1	830 ± 23,6	28 ± 0,31
Fichte 0,5 WS	1,51 ± 0,12	2,8 ± 0,07	606 ± 2,8	805 ± 11,7	29 ± 0,86
Fichte 1,8 WS	1,43 ± 0,13	2,9 ± 0,26	611 ± 13,8	834 ± 13,0	29 ± 1,46
Fichte 0,5 KSn	1,30 ± 0,07	3,0 ± 0,08	523 ± 12,2	784 ± 11,5	27 ± 0,29
Fichte 1,8 KSn	1,31 ± 0,08	3,0 ± 0,12	584 ± 11,7	811 ± 11,7	26 ± 0,76
Fichte 0,5 KSa	1,36 ± 0,22	3,1 ± 0,10	577 ± 5,8	807 ± 16,1	26 ± 0,64
Fichte 1,8 KSa	1,28 ± 0,11	3,2 ± 0,08	588 ± 8,6	798 ± 19,2	27 ± 0,31
Fichte 0,17 Kao	1,42 ± 0,08	2,9 ± 0,12	537 ± 10,1	814 ± 8,4	26 ± 0,06
Fichte 0,34 Kao	1,38 ± 0,05	2,9 ± 0,11	538 ± 11,7	837 ± 20,1	27 ± 0,37

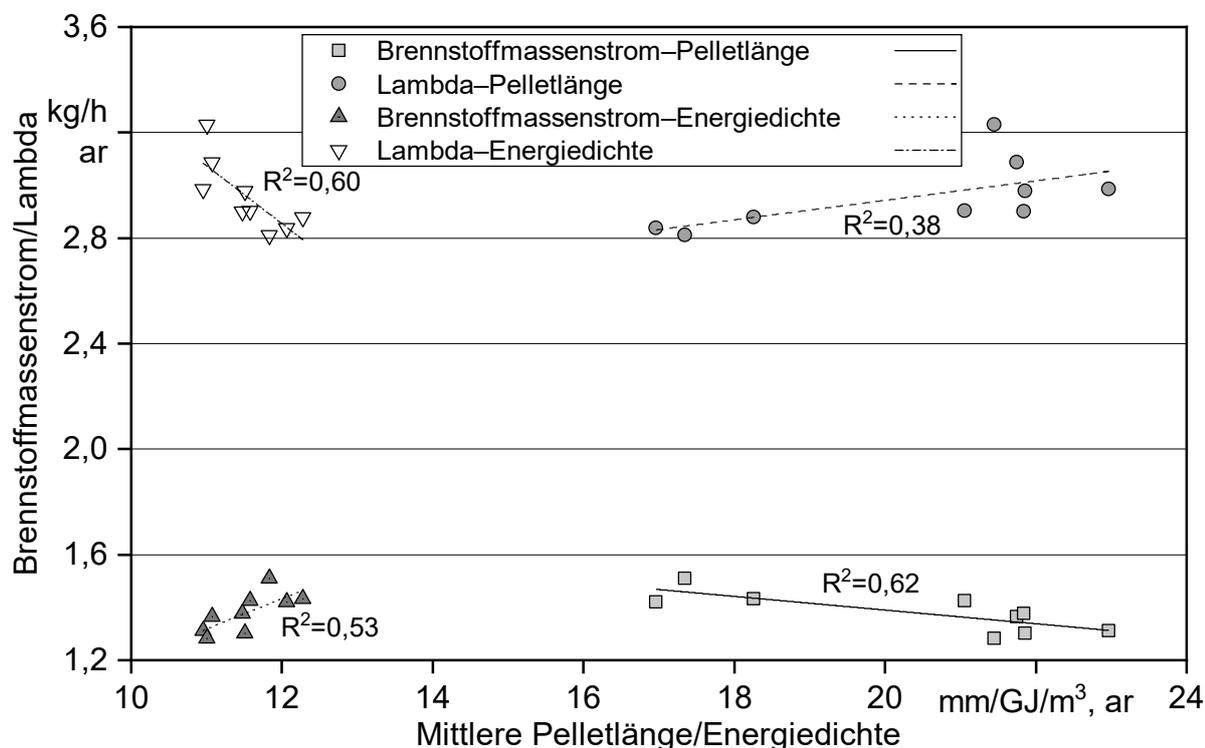


Abbildung 162: Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms und der Lambda-Werte von der mittleren Pelletlänge bzw. der Energiedichte für die Messungen zum Einfluss der Additive an Pelletofen 2

Bei Pelletkessel 1 liegen die Brennstoffmassenströme bedingt durch die Leistungsregelung mit 3,17 kg/h („Fichte 1,8 KSa“) bis 3,30 kg/h („Fichte 0,34 Kao“) auf einem vergleichbaren Niveau. Der Lambda-Wert liegt für alle Sortimente bei 1,6. Auch die Abgastemperatur sowie die Wärmeleistung sind im Rahmen der Streuung der Einzelwerte konstant.

Tabelle 43: *Feuerungstechnische Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses von Additiven für Pelletkessel 1*

Bezeichnung	Brennstoffverbrauch	Lambda	Abgas- temperatur	Wärmeleistung
–	kg/h, ar	–	°C	kW
Fichte	3,24 ± 0,08	1,6 ± 0,01	117 ± 1,2	14,3 ± 0,06
Fichte 1,8 KSa	3,17 ± 0,03	1,6 ± 0,01	117 ± 0,9	13,9 ± 0,06
Fichte 0,17 Kao	3,22 ± 0,03	1,6 ± 0,01	112 ± 0,6	14,3 ± 0,07
Fichte 0,34 Kao	3,30 ± 0,02	1,6 ± 0,00	114 ± 1,5	14,4 ± 0,09

7.2.5.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen in Abhängigkeit von der Additivzugabe sind für Pelletofen 2 in Abbildung 163 dargestellt. Die CO-Emissionen liegen zwischen 73 mg/Nm³ („Fichte 0,34 Kao“) und 178 mg/Nm³ („Fichte 1,8 WS“). Im Vergleich mit der reinen Fichte liegt nur bei „Fichte 1,8 WS“ und bei „Fichte 0,34 Kao“ ein signifikanter Unterschied vor. Tendenziell (nicht signifikant) führt eine Erhöhung des Additivgehalts von 0,5 m-% auf 1,8 m-% für alle verwendeten Bindemittel zu einem leichten – bei Weizenstärke zu einem stärkeren – Anstieg der CO-Emissionen. Die Zugabe von Kaolin führt bei der nach dem Stand des Wissens berechneten Dosierung von 0,17 m-% im Vergleich zur reinen Fichte zu einem leichten Anstieg der CO-Emissionen (nicht signifikant), während bei der doppelten Dosierung mit 0,34 m-% – bei aber dennoch eingehaltener Aschegehaltsvorgabe – eine deutliche Reduzierung der CO-Emissionen (signifikant) stattfindet. Da weder eine Abhängigkeit zur mittleren Pelletlänge ($R^2 = 0,00$) noch zur Energiedichte ($R^2 = 0,01$) besteht (nicht dargestellt), scheinen die Unterschiede bei den CO-Emissionen – wenn auch teilweise nicht signifikant – mit den Bindemitteln in Verbindung zu stehen.

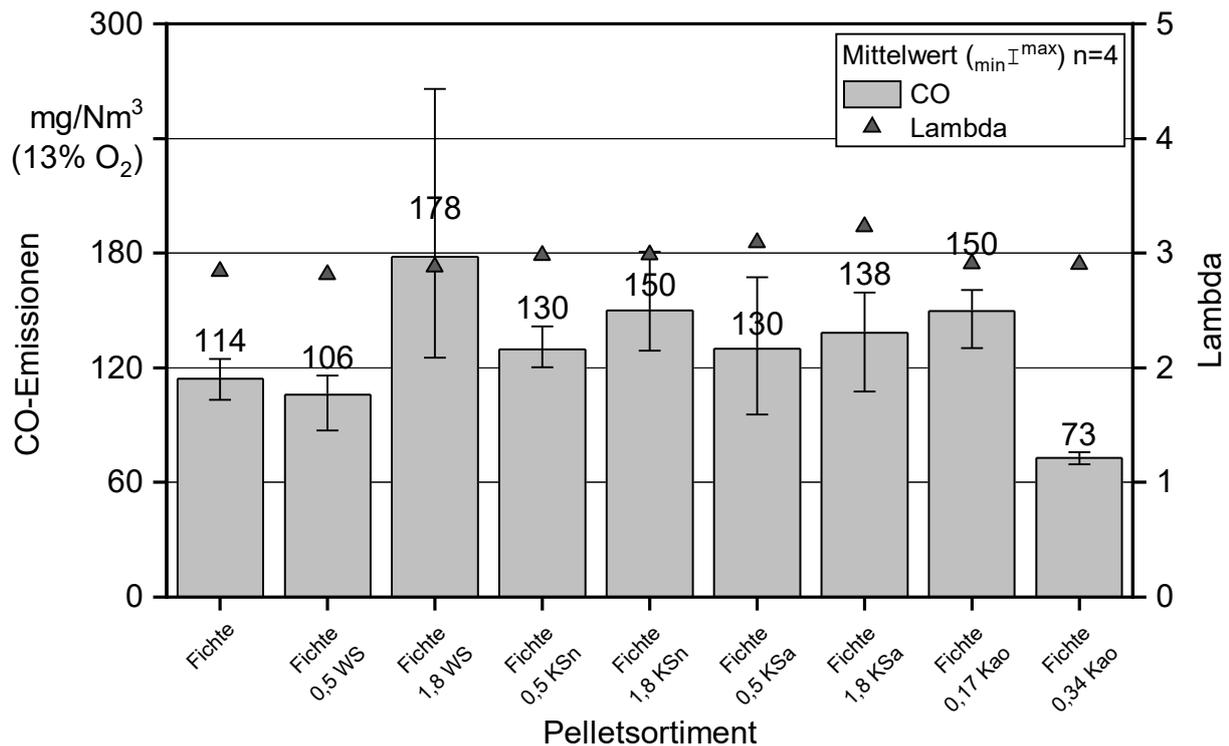


Abbildung 163: CO-Emissionen in Abhängigkeit von der Additivzugabe an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

Für Pelletkessel 1 (Abbildung 164) liegen die CO-Emissionen zwischen 2 mg/Nm³ („Fichte 0,34 Kao“) und 5 mg/Nm³ („Fichte 1,8 KSa“) und sind damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Dennoch lassen sich leichte Tendenzen erkennen, die sich mit den Beobachtungen am Pelletofen decken. So sind die CO-Emissionen für „Fichte 1,8 KSa“ um 1 mg/Nm³ signifikant höher und die für „Fichte 0,34 Kao“ um 2 mg/Nm³ signifikant niedriger als bei Fichte ohne Additive. Es zeigt sich also auch beim Kessel, dass Stärke in höheren Dosierungen sowie Kaolin bei der doppelten Menge einen Effekt auf die CO-Emissionen haben können, allerdings sind diese Effekte wesentlich weniger ausgeprägt als beim Pelletofen. Eine Reduktion der CO-Emissionen bei Zugabe von Kaolin wurde auch in HÜLSMANN und GEHRING beobachtet, als 0,5 -% Kaolin hinzudosiert wurde [48] [47]. Eine weitere Erhöhung der Kaolindosierung auf 2,0 m-% führte bei GEHRING ET AL. zu einem Wiederanstieg der CO-Emissionen.

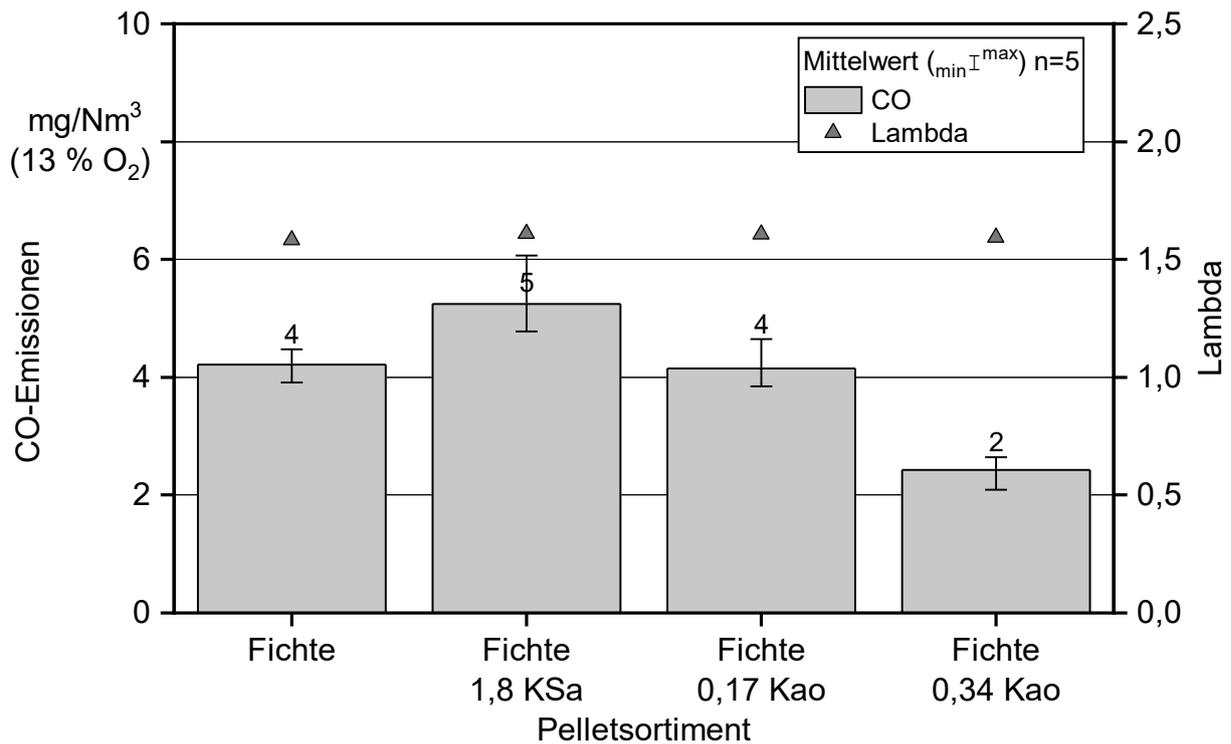


Abbildung 164: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletkessel 1 (n = 5)

Emissionen gasförmiger organischer Kohlenwasserstoffe (org.-C). Die org.-C-Emissionen sind für Pelletofen 2 in Abbildung 165 dargestellt. Sie liegen zwischen 2 mg/Nm³ („Fichte 0,5 WS“) und 6 mg/Nm³ („Fichte 0,17 Kao“). Im Vergleich zur reinen Fichte liegen tendenziell alle org.-C-Emissionen der Sortimente mit Bindemittel bis auf „Fichte 0,5 WS“ signifikant höher als die reine Fichte (außer „Fichte 1,8 KSa“). Eine Erhöhung des Bindemittelgehalts von 0,5 m-% auf 1,8 m-% führt bei Weizenstärke zu einem signifikanten und bei Kartoffelstärke abfallender Qualität zu einem tendenziellen (nicht signifikanten) Anstieg der org.-C-Emissionen. Wie bei CO führt auch bei den org.-C-Emissionen die Additivierung mit nach den Guidelines berechnetem Kaolingehalt (0,17 m-%) zu einem Anstieg (signifikant), während der doppelte Kaolingehalt (0,34 m-%) eine leichte Reduzierung der org.-C-Emissionen gegenüber reiner Fichte bewirkt (nicht signifikant).

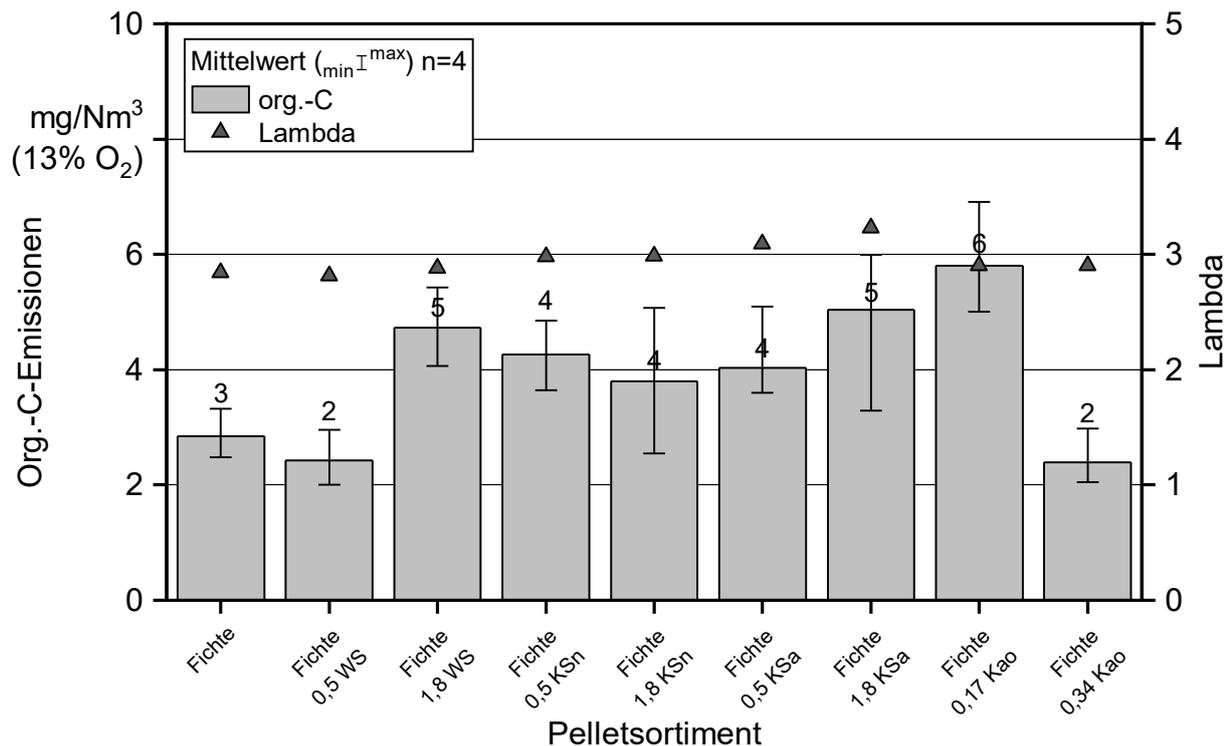


Abbildung 165: Org.-C-Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

Die org.-C-Emissionen für Pelletkessel 1 liegen mit 0,5–0,6 mg/Nm³ auf einem sehr niedrigen Niveau, daher wird hier auf eine Darstellung und Diskussion verzichtet.

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen (Abbildung 166) der untersuchten Sortimente liegen für Pelletofen 2 zwischen 142 mg/Nm³ („Fichte 1,8 KSa“) und 172 mg/Nm³ („Fichte 1,8 WS“). Der Stickstoffgehalt liegt für das weizenstärkehaltige Mehl mit 1,85 m-% (Anhang 2, Tabelle 86) wesentlich höher als bei den reinen Fichtenpellets (Anhang 2, Tabelle 84) mit 0,09 m-%. Daher führt die Zugabe weizenstärkehaltigen Mehls zu einer signifikanten Zunahme der NO_x-Emissionen für beide Additivierungsstufen. Die Stickstoffgehalte der nativen Kartoffelstärke (< 0,05 m-%) und der Kartoffelstärke abfallender Qualität (0,20 m%) unterscheiden sich kaum von dem verwendeten Fichtenrohstoff. Hier liegen die Unterschiede bei den NO_x-Emissionen wohl eher an dem Einfluss der mittleren Pelletlänge bzw. der Energiedichte. Für beide mit Kaolin additvierten Sortimente liegen die NO_x-Emissionen signifikant niedriger als für reine Fichte, obwohl der Stickstoffgehalt im Brennstoff steigt (Tabelle 19). Dieser Effekt nimmt von 0,17 m-% zu 0,34 m-% Kaolin zu. Die Reduzierung der NO_x-Emissionen könnte hier in der größeren mittleren Pelletlänge begründet liegen, wie es auch bei der Pelletlängenvariation beobachtet wurde – das bestätigt sich in Abbildung 167.

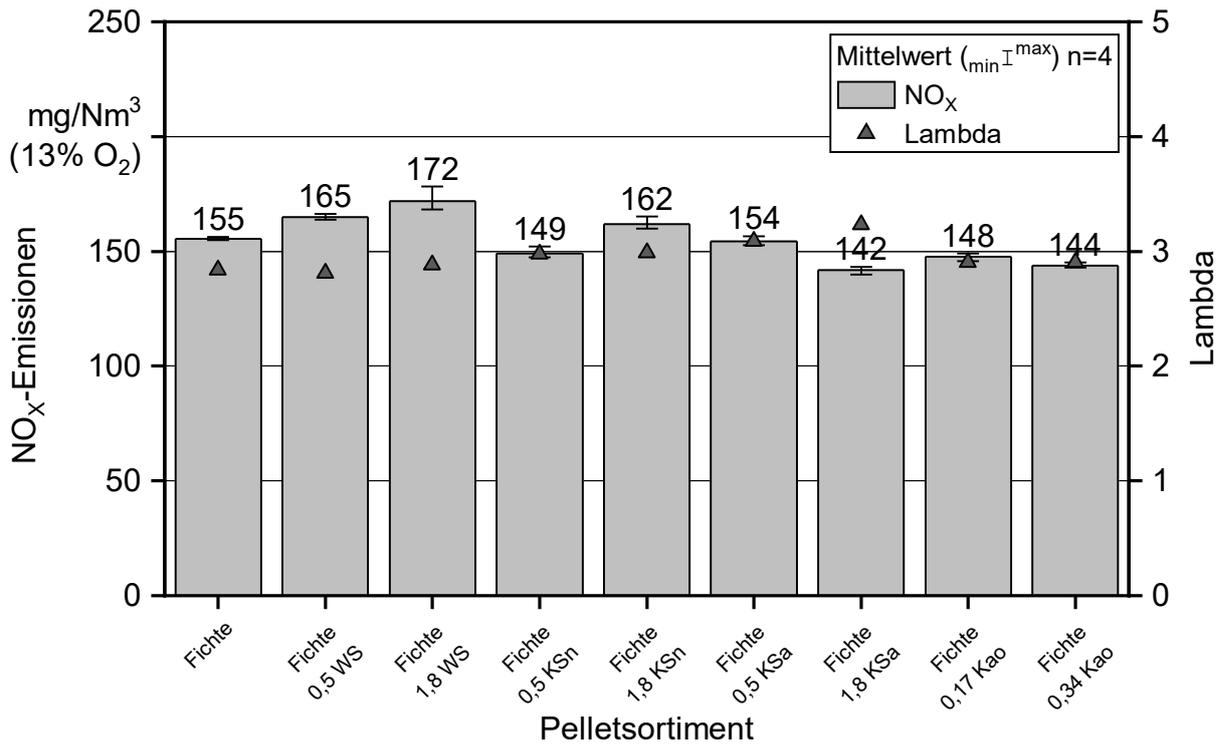


Abbildung 166: NO_x-Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung)

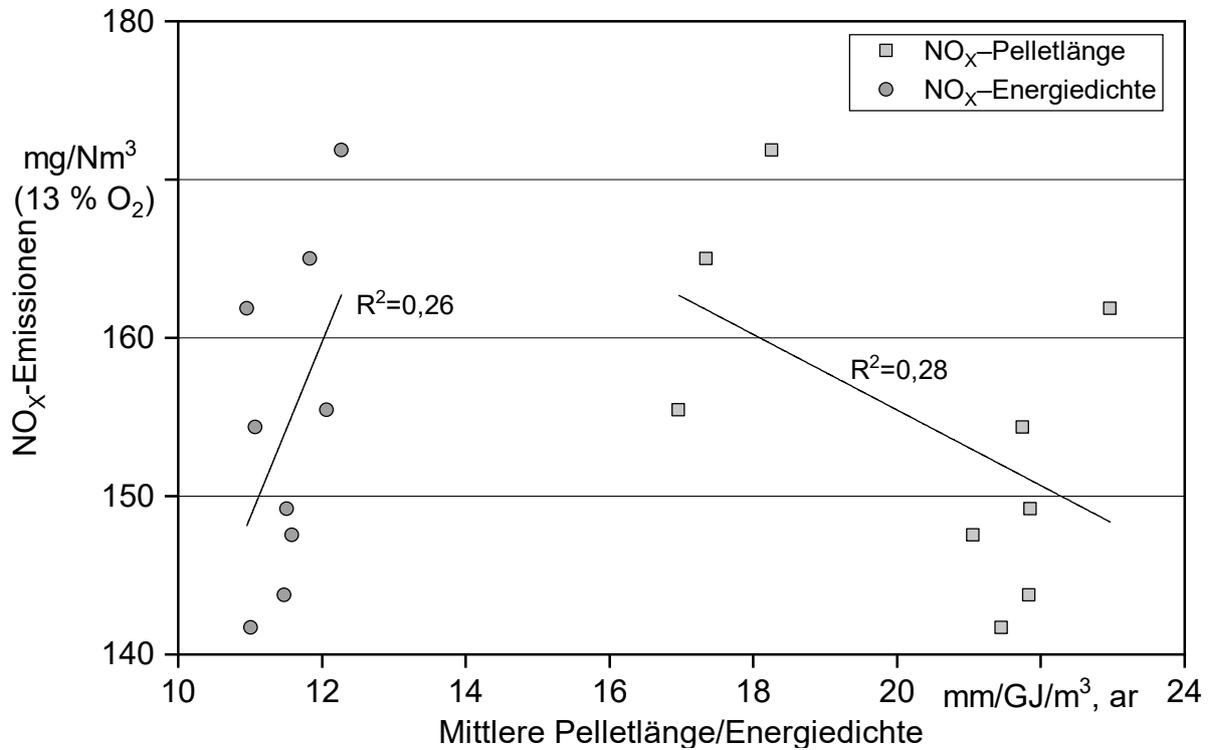


Abbildung 167: Abhängigkeit der NO_x-Emissionen von der mittleren Pelletlänge bzw. der Energiedichte bei unterschiedlicher Additivzugabe an Pelletofen 2

Für Pelletkessel 1 liegen die NO_x -Emissionen zwischen 145 mg/Nm^3 („Fichte 0,34 Kao“) und 176 mg/Nm^3 („Fichte 1,8 KSa“) und damit im Vergleich zum Pelletofen etwas höher, folgen aber denselben Trends zwischen den Brennstoffen. Durch die Zugabe von 1,8 m-% Kartoffelstärke mit abfallender Qualität steigen die NO_x -Emissionen verglichen mit reiner Fichte signifikant an und fallen bei der Zugabe von Kaolin signifikant ab. Bei HÜLSMANN ET AL. [48] wurde ein leichter Anstieg der NO_x -Emissionen im Pelletkessel mit Abwurfheizung bei der Additivierung mit Kaolin festgestellt. Am Pelletofen wurden hier die NO_x -Emissionen nicht bestimmt. Bei GEHRING ET AL. [47] wurde dagegen bei einem Pelletkessel mit Unterschubheizung kein Effekt der Kaolin-Additivierung auf die NO_x -Emissionen festgestellt.

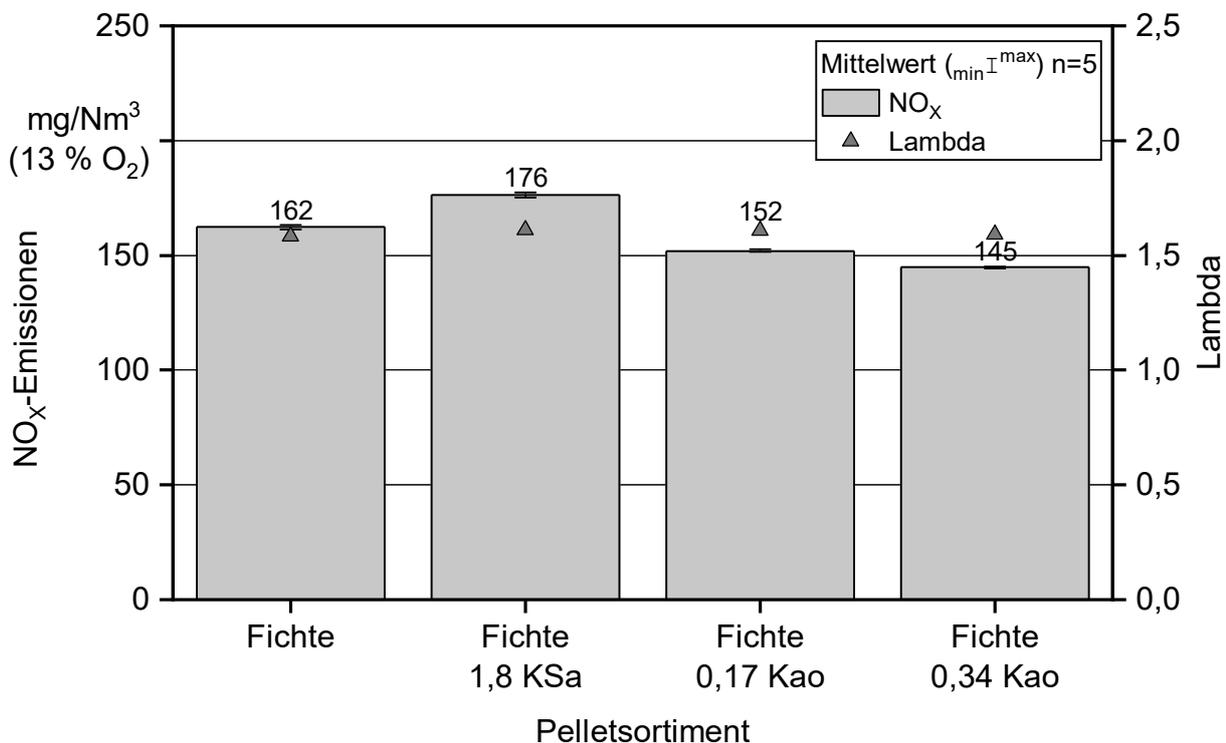


Abbildung 168: NO_x -Emissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletkessel 1 ($n = 5$)

7.2.5.2 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen liegen für Pelletofen 2 zwischen 14 mg/Nm^3 („Fichte 0,34 Kao“) und 41 mg/Nm^3 („Fichte 1,8 KSa“). Verglichen mit der reinen Fichte mit 27 mg/Nm^3 liegt unter Berücksichtigung der Streuung der Einzelmessungen nur „Fichte 1,8 KSa“ signifikant höher und „Fichte 0,34 Kao“ signifikant niedriger. Tendenziell (nicht signifikant) zeigt sich aber für alle untersuchten Bindemittel (bei KSn erst ab 1,8 m-%) ein Anstieg der Staubemissionen gegenüber der reinen Fichte. Durch die Additivierung mit Kaolin sinken die Gesamtstaubemissionen bei 0,17 m-% leicht (nicht signifikant) und bei 0,34 m-% deutlich. Der Anstieg der Gesamtstaubemissionen bei der Zugabe von Bindemitteln lässt sich teilweise durch den in den Bindemitteln erhöhten Gehalt aerosolbildender Elemente (Abschnitt 5.2.1) ($R^2 = 0,48$) erklären (siehe Abbildung 170). Außerdem stehen die Bindemittel

in der Praxis teilweise auch unter dem Verdacht, das Ascheschmelzverhalten negativ zu beeinflussen. Der positive Effekt des Kaolins auf die Staubemissionen durch die Einbindung des Kaliums in Kalium-Aluminium-Silikate wurde bereits in Unterkapitel 3.4 erklärt und zeigt sich auch, wenn man das Si/K-Verhältnis den Gesamtstaubemissionen gegenüberstellt (Abbildung 170).

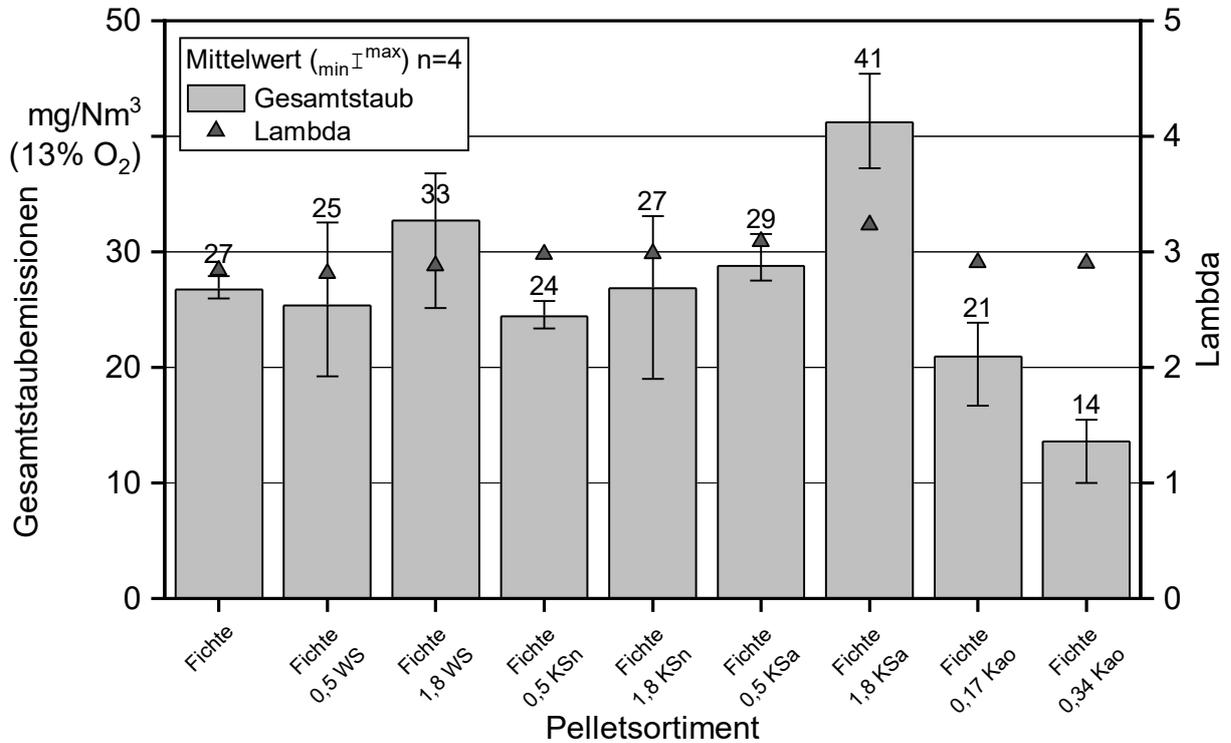


Abbildung 169: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pellet-ofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung)

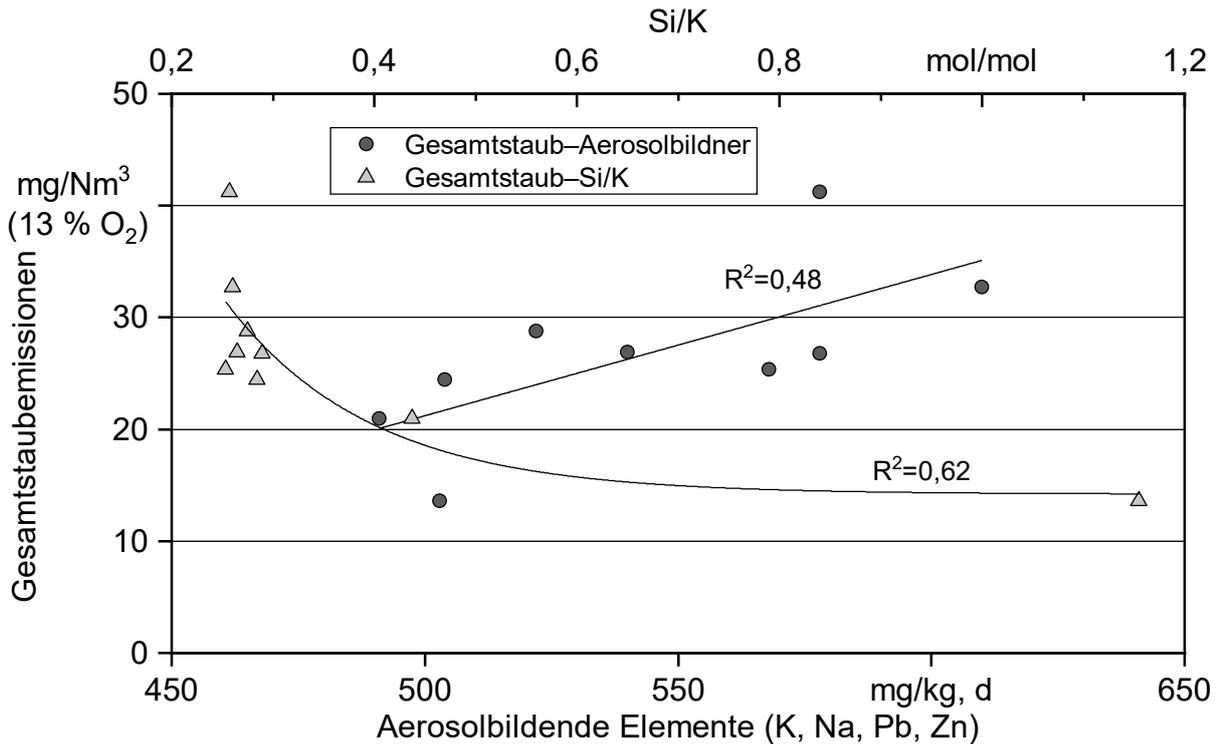


Abbildung 170: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Summe der aerosolbildenden Elemente sowie vom Si/K-Verhältnis für die Messungen zum Einfluss der Additive an Pelletofen 2

Für Pelletkessel 1 liegen die Gesamtstaubemissionen zwischen 13 mg/Nm^3 („Fichte 0,17 Kao“) und 23 mg/Nm^3 („Fichte 1,8 KSa“). Im Vergleich zur reinen Fichte (19 mg/Nm^3) zeigt der Pelletkessel für die Kartoffelstärke abfallender Qualität ebenfalls einen Anstieg der Gesamtstaubemissionen, der hier mit 4 mg/Nm^3 allerdings wesentlich niedriger ausfällt als beim Pelletofen 2 und statistisch nicht signifikant ist. Im Gegensatz zum Pelletofen liegt das Optimum für die Kaolinzugabe hinsichtlich der Staubemissionen nicht bei 0,34 m-%, sondern bei 0,17 m-%, denn hier liegen die Gesamtstaubemissionen signifikant niedriger als für reine Fichte. Bei 0,34 m-% Kaolin steigen die Gesamtstaubemissionen sogar wieder (signifikant zu 0,17 m-%) auf das Niveau reiner Fichte an. Mögliche Gründe hierfür sind einerseits der vollständigere Ausbrand beim Pelletkessel und damit ein geringerer Quereinfluss der Rußbildung als beim Pelletofen und andererseits der durch das Kaolin erhöhte Aschegehalt, der bei 0,34 m-% entsprechend höher liegt. Hierdurch besteht auch die Möglichkeit des Austrags nicht in der Asche eingebundenen Kaolins über das Abgas. Bei HÜLSMANN bzw. GEHRING wurde trotz einer deutlichen Überdosierung des Kaolins im Pelletkessel eine Abnahme der Gesamtstaubemissionen festgestellt und kein Wiederanstieg [48] [47]. Dagegen stellten HÜLSMANN ET AL. beim Einsatz von Buchenpellets mit 1 m-% Kaolin im Pelletofen einen Anstieg der Gesamtstaubemissionen verglichen mit 0,5 m-% Kaolin fest. Es wurden also auch in anderen Untersuchungen unterschiedliche Effekte hoher Kaolindosierungen in Abhängigkeit der verwendeten Feuerungstechnik festgestellt.

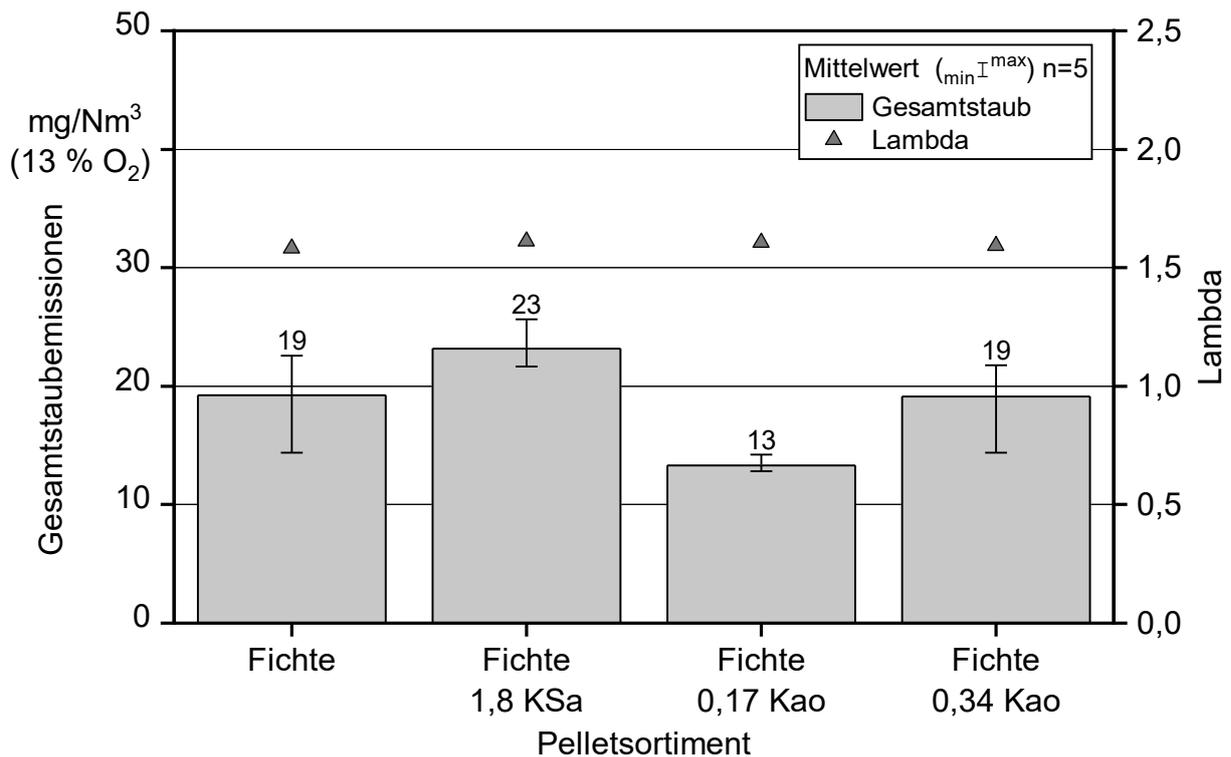


Abbildung 171: Gesamtstaubemissionen bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletkessel 1 ($n = 5$)

7.2.5.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel

Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung. Während der Messungen an Pelletofen 2 mit dem Pelletsortiment „Fichte 1,8 KSa“ sowie während der Messungen mit Pelletkessel 1 stand das ELPI+ nicht zur Verfügung, daher fehlen für diese Messungen die Partikelanzahl und die Anzahlverteilung.

Die Gesamtzahl der gemessenen Partikel liegt für Pelletofen 2 (ohne „Fichte 1,8 KSa“) zwischen $3,3 \times 10^7/\text{cm}^3$ („Fichte 0,5 KSn“ und „Fichte 0,5 KSa“) und $4,8 \times 10^7/\text{cm}^3$ („Fichte 0,34 Kao“). Bei den mit Bindemittel additvierten Sortimenten ändert sich im Vergleich zur reinen Fichte vor allem der Anteil der Partikel im Größenbereich von 40 bis 230 nm und bei Fichte mit 1,8 m-% weizenstärkehaltigem Mehl auch noch der Anteil an größeren Partikeln (230–731 nm) (siehe Abbildung 172). Durch die Additivierung mit Kaolin scheinen sich zwar die Gesamtstaubemissionen zu reduzieren beim Pelletofen 2, jedoch steigt die Partikelanzahl im Vergleich zur reinen Fichte an. Mit zunehmender Dosierung des Kaolins sinken die Anteile der gröbereren Staubpartikel (230–731 nm und 40–230 nm), dafür steigt der Anteil an ultrafeinen Partikeln (9–40 nm) mit dem Kaolingehalt in den Pellets stark an. Dies macht bei 0,34 m-% Kaolin fast einen Unterschied von einer Zehnerpotenz im Vergleich zur reinen Fichte aus. Dieser Trend hin zu ultrafeinen Partikeln bei der Additivierung mit Kaolin wurde für Agrarbrennstoffe schon in [62] beobachtet und für Holzpellets in [48]. Wie bereits in Abschnitt 7.2.1.3 erwähnt sind diese ultrafeinen Partikel aus Sicht des Ge-

sundheitsschutzes besonders kritisch zu sehen. Daher muss dieser wiederholt beobachtete Effekt bei zukünftigem Einsatz von Kaolin zwingend berücksichtigt werden.

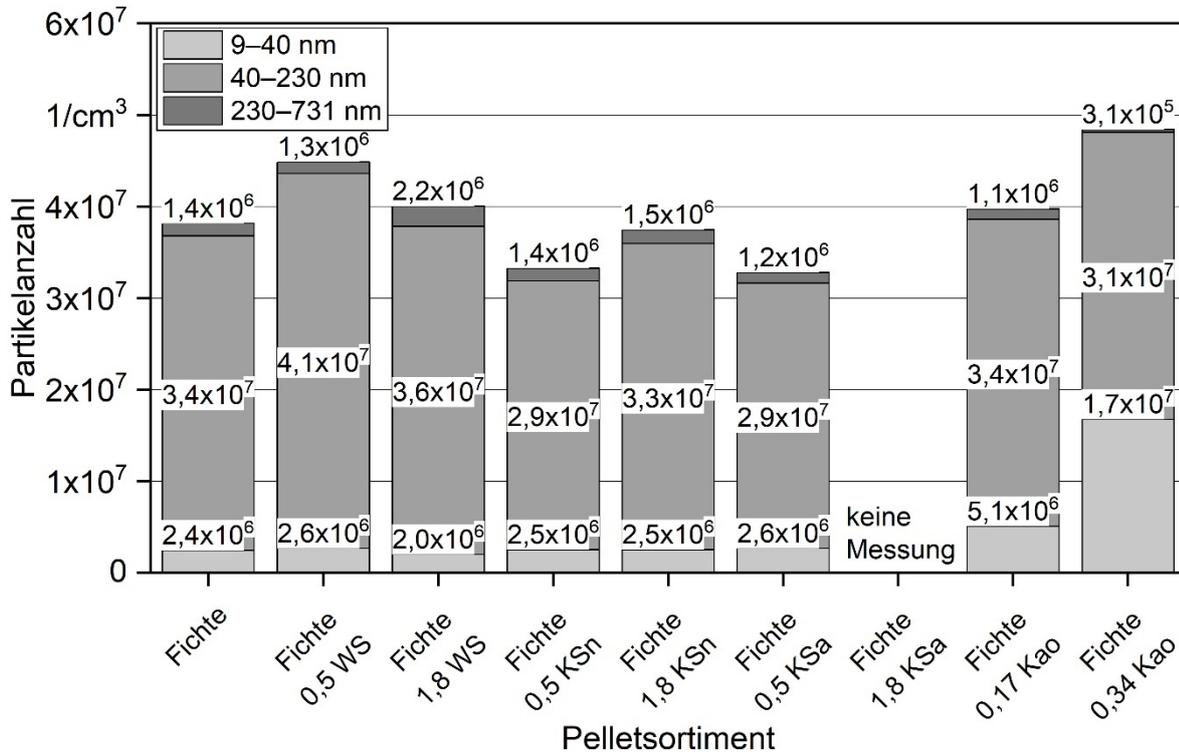


Abbildung 172: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung bei unterschiedlichen Additivzugaben am Pelletofen 2, gemittelt (1 h)

Zusammensetzung der Staubpartikel. Die Kohlenstoffanalyse der Filterstäube von Pelletofen 2 (siehe Abbildung 173) ergibt einen Anteil an Salzen und Oxiden von 6 mg/Nm^3 („Fichte 0,34 Kao“) bis 23 mg/Nm^3 („Fichte 1,8 KSa“). Während dieser Anteil für die mit Bindemittel additvierten Pellets im Vergleich zur reinen Fichte im Rahmen der Messgenauigkeiten relativ konstant ist (Ausnahme „Fichte 1,8 WS“), nimmt er bei der Zugabe von Kaolin deutlich ab. Hier zeigt sich die durch das Kaolin begünstigte Einbindung des Kaliums in die Asche. Für Pelletofen 2 zeigt sich hier auch eine weitere Abnahme der mineralischen Stäube von 0,17 m-% zu 0,34 m-% Kaolin. Die Unterschiede in den Gesamtstaubemissionen der mit Bindemittel additvierten Pellets scheinen vor allem durch unterschiedlich hohe Partikelkonzentrationen aus elementarem Kohlenstoff (vermutlich Ruß) zu bestehen und zeigen sich vor allem bei hohen Dosierungen weizenstärkehaltigen Mehls und der Kartoffelstärke abfallender Qualität. Auch die Additivierung mit Kaolin lässt die Emissionen elementaren Kohlenstoffs im Vergleich zur reinen Fichte leicht ansteigen, weshalb sich die Zugabe von 0,17 m-% trotz erkennbarer Einbindung nicht signifikant auf die Gesamtstaubemissionen auswirkt. Die Unterschiede im IC und OC sind hier nur minimal und im Rahmen der Messgenauigkeiten unbedeutend.

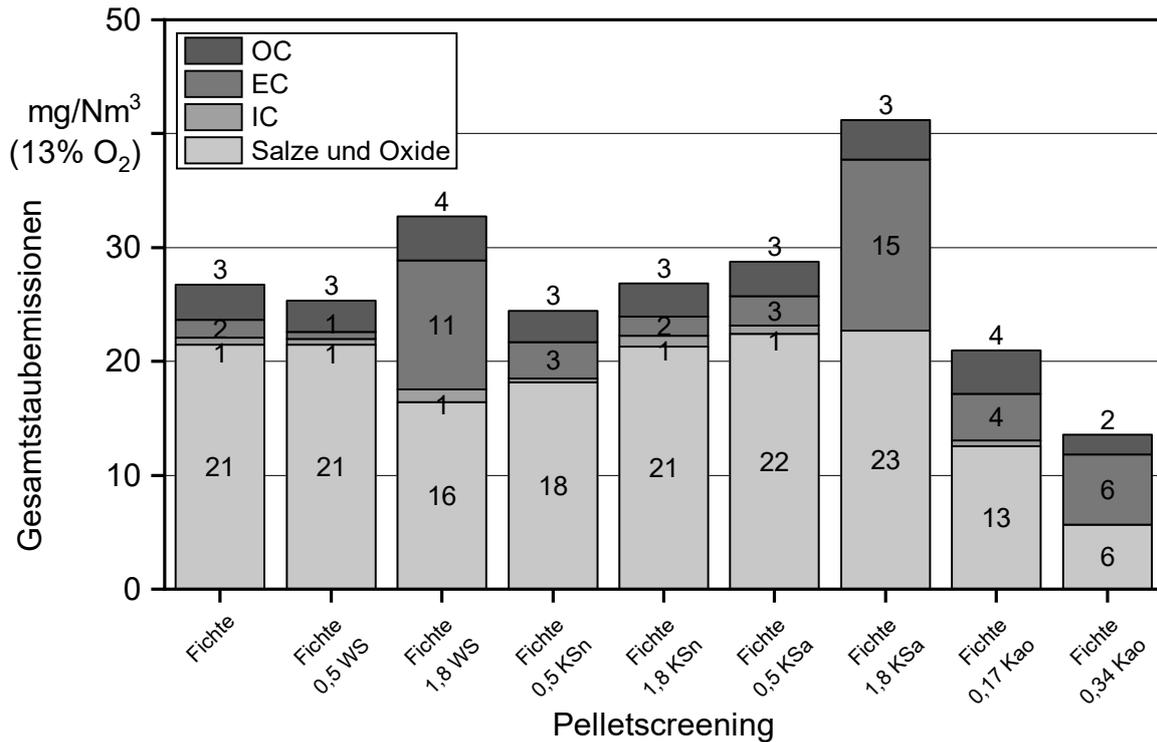


Abbildung 173: Zusammensetzung der Staubbelastung auf den Planfiltern in Abhängigkeit von der Additivzugabe für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC sowie Salze und Oxide

Für Pelletkessel 1 zeigt sich im Vergleich zur reinen Fichte mit 18 mg/Nm^3 ein wie beim Pelletofen tendenziell höherer Anteil der mineralischen Stäube für „Fichte 1,8 KSa“ mit 23 mg/Nm^3 (siehe Abbildung 174), der durch den höheren Kaliumgehalt der Stärke erklärt werden kann. Bei der Zugabe von Kaolin zeigt sich der schon bei den Gesamtstaubemissionen beobachtete Unterschied zu Pelletofen 2. Während beim Pelletofen der Anteil an Salzen und Oxiden von 0,17 m-% zu 0,34 m-% Kaolin weiter sinkt, nehmen diese beim Pelletkessel wieder von 13 mg/Nm^3 auf 18 mg/Nm^3 zu, dies dürfte ein klarer Hinweis auf einen Austrag überschüssigen Kaolins mit dem Abgas sein. Darauf deutet auch der geringfügig höhere Anteil an IC (vermutlich mitgerissene Aschepartikel) hin. Durch den deutlich höheren Aschegehalt werden vermutlich durch die beim Pelletofen höheren Strömungsgeschwindigkeiten in der Brennkammer und Glutbett mehr Aschepartikel und auch Kaolin mit der Gasphase ausgetragen.

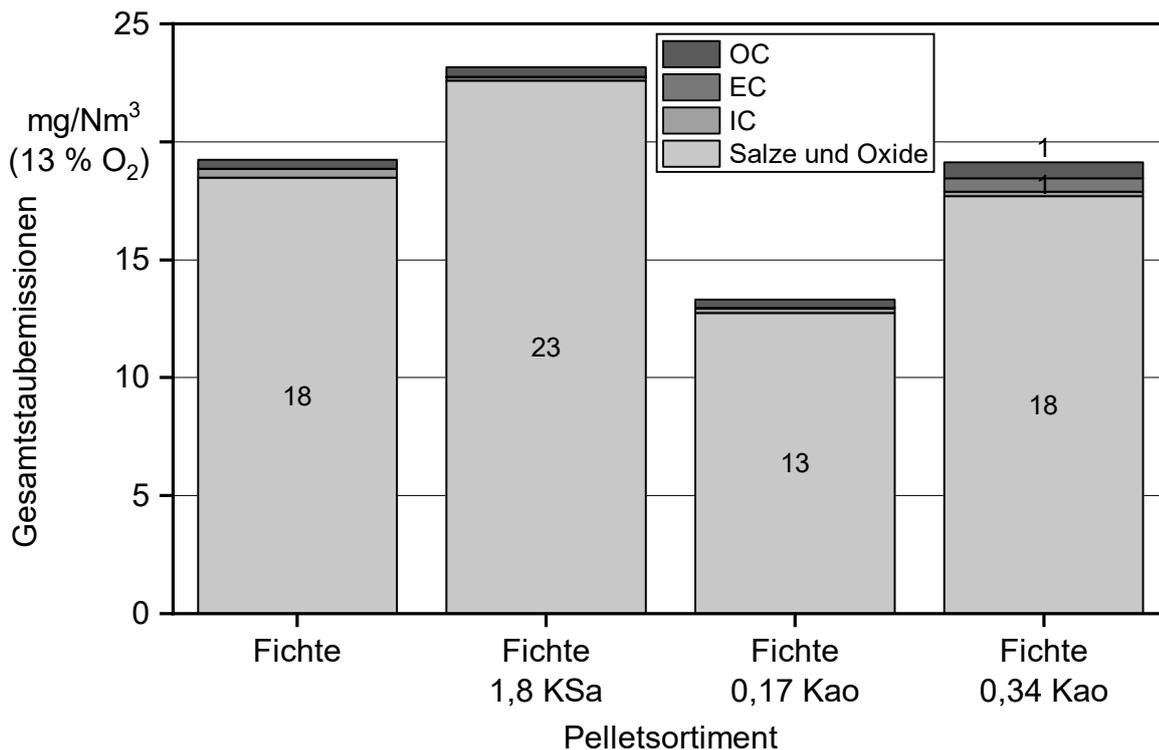


Abbildung 174: Zusammensetzung der Staubbelastung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss der Additive für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC sowie Salze und Oxide

7.2.5.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Die Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände hinsichtlich der Aschepartikel > 2 mm und > 1 mm sind in Abbildung 175 in Abhängigkeit von der Additivzugabe an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 dargestellt. Im Vergleich zur reinen Fichte scheinen sich weizenstärkehaltiges Mehl sowie Kartoffelstärke abfallender Qualität bei hohen Dosierungen nachteilig auf das Ascheschmelzverhalten auszuwirken. Dies wird durch die Messung am Pelletkessel 1 für „Fichte 1,8 KSA“ bestätigt. Niedrige Dosierungen im Bereich von 0,5 m-% scheinen dagegen unproblematisch. Dagegen wirkt sich die native Kartoffelstärke bei Pelletofen 2 bei hohen Dosierungen eher positiv aus. Bei den mit Kaolin additivierten Pellets zeigt sich bei der niedrigen Dosierung von 0,17 m-% eine deutliche Reduzierung der Partikel > 2 mm und > 1 mm für den Pelletofen gegenüber der reinen Fichte. Bei Pelletkessel 2 ist dieser Effekt auch erkennbar, jedoch nicht so deutlich wie beim Pelletofen 2. Sowohl für den Pelletofen als auch für den Pelletkessel tritt allerdings bei der doppelten Kaolinmenge (0,34 m-%) eine deutliche Erhöhung an Ascheteilchen > 2 mm und > 1 mm auf. Für den Kessel ist dieser Effekt wesentlich größer als für den Pelletofen, was sich auch in den Ergebnissen der Gesamtstaubemissionen widerspiegelt. Die Tendenzen sind für beide untersuchten Partikelgrößen > 2 mm und > 1 mm gut erkennbar und vergleichbar.

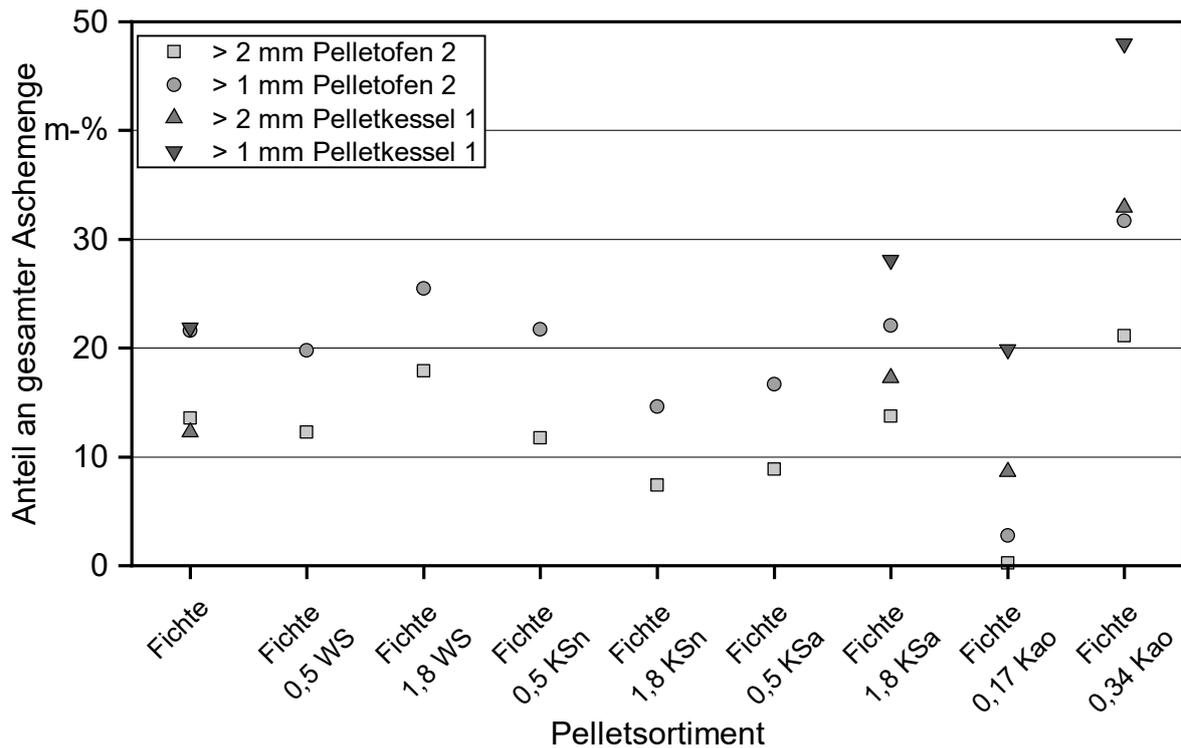


Abbildung 175: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände in Abhängigkeit von der Additivzugabe für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Die beobachteten Effekte lassen sich unter Berücksichtigung aller Sortimente nicht durch den mit Aluminium erweiterten Schlackeindex (Unterkapitel 3.2) erklären (siehe Abbildung 176). Nimmt man jedoch das Sortiment „Fichte 0,34 Kao“ aus der Regression heraus, ergibt sich für Pelletofen 2 eine deutliche Abhängigkeit ($R^2 = 0,68$), für den Pelletkessel ist diese aufgrund der wenigen Messpunkte nur schwach ausgeprägt ($R^2 = 0,25$). Bei hohen Dosierungen des Kaolins scheint der positive Effekt des Aluminiueintrags durch das Kaolin durch den ebenfalls hohen Siliziumeintrag (Anhang 2, Tabelle 85 und Tabelle 87) und damit eine Absenkung des Ascheschmelzpunkts überlagert zu sein, wie das Si/K-Verhältnis in Abbildung 177 verdeutlicht. Demnach kann eine Überdosierung von Kaolin in Holzpellets neben dem negativen Effekt auf die Staubemissionen auch das Ascheschmelzverhalten nachteilig beeinflussen.

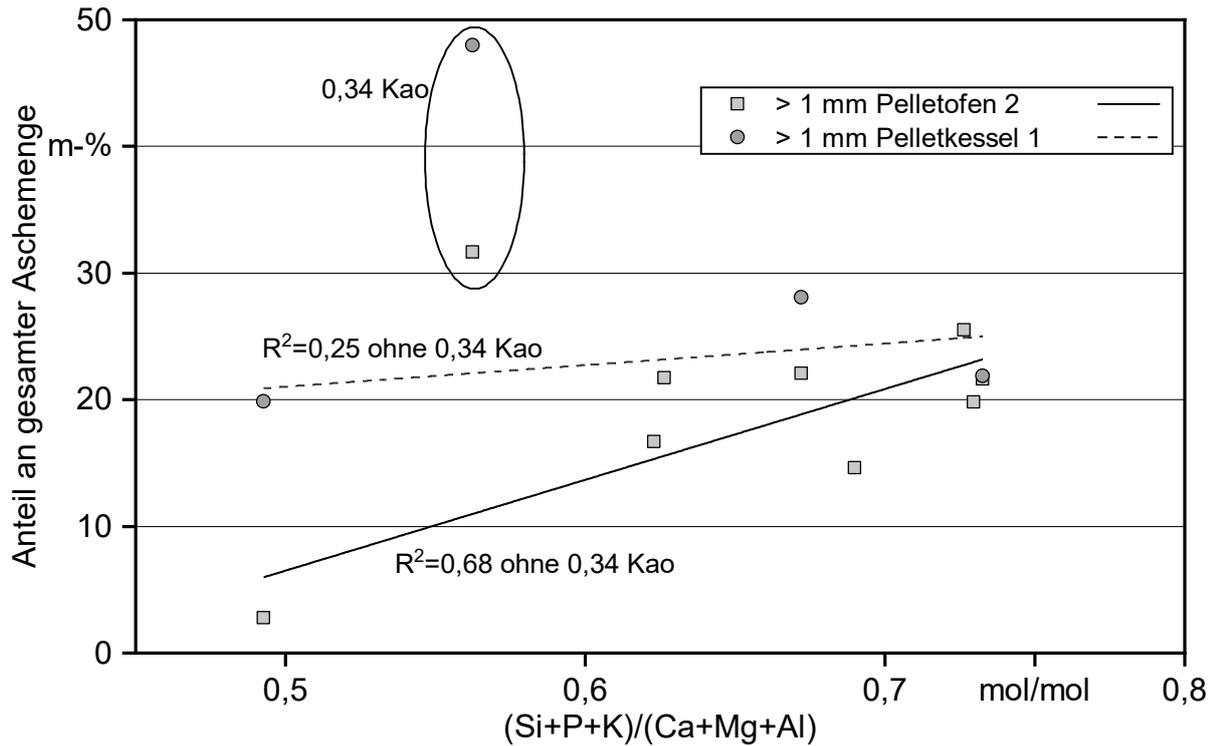


Abbildung 176: Abhängigkeit der Partikel < 1 mm der Verbrennungsrückstände aus den Untersuchungen zum Einfluss der Additive mit dem Schlackeindex unter Ausschluss von „Fichte 0,34 Kao“ an Pelletoven 2

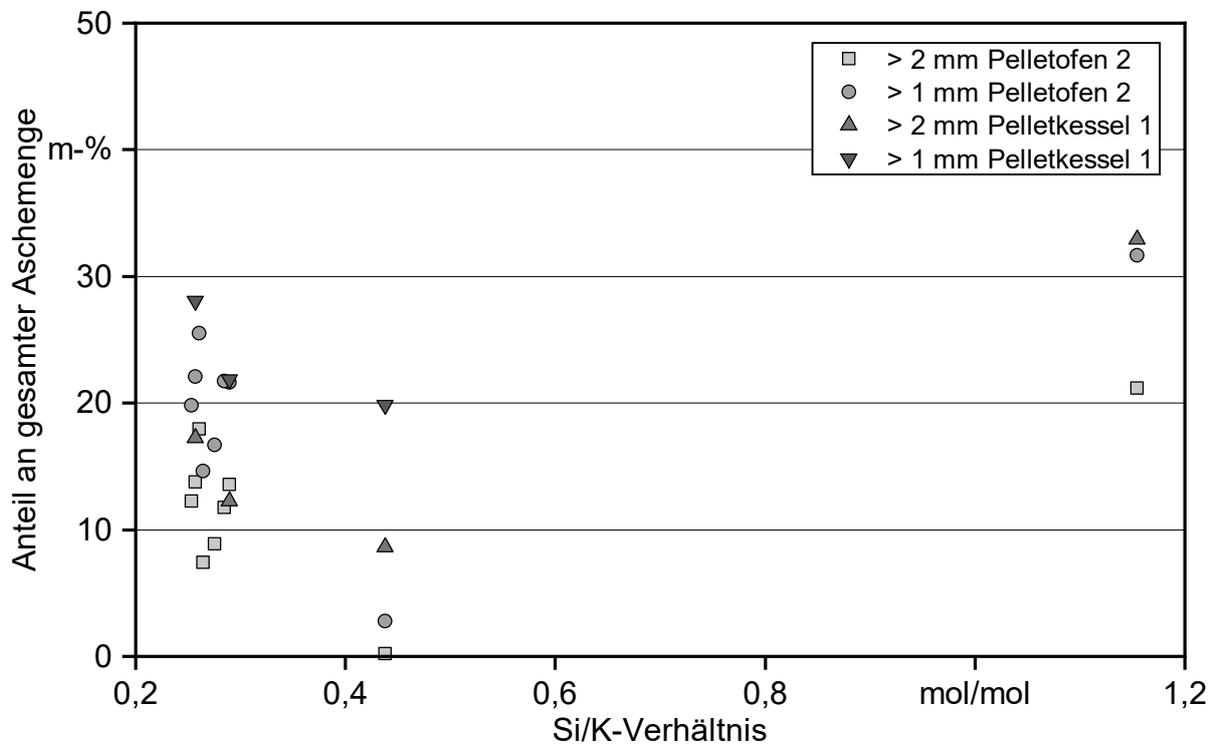


Abbildung 177: Gegenüberstellung der Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Verbrennungsrückstände der Untersuchungen zum Einfluss der Additive mit dem Si/K-Verhältnis an Pelletoven 2 und Pelletkessel 1

7.2.5.5 Schlussfolgerungen

Zugabe von Bindemittel. Die Untersuchungen zeigen, dass Bindemittel einen negativen Effekt auf die gasförmigen Emissionen und die Gesamtstaubemissionen haben können, der je nach Bindemittel unterschiedlich stark ausfällt. Die höheren Staubemissionen resultieren für den untersuchten Pelletkessel und Pelletofen aus einer durch das Bindemittel verursachten Erhöhung der Aerosolbildner, durch die höhere Gehalte an Salzen und Oxiden (meist Kaliumverbindungen) freigesetzt werden. Beim Pelletofen werden zusätzlich bei manchen Bindemitteln (hier weizenstärkehaltiges Mehl und Kartoffelstärke abfallender Qualität) die Emissionen partikelförmigen elementaren Kohlenstoffs erhöht. Beim Ascheschmelzverhalten zeigen zwei der untersuchten Bindemittel einen negativen und ein Bindemittel einen positiven Effekt. In allen Fällen zeigen sich die beobachteten negativen Effekte hinsichtlich der Emissionen und des Ascheschmelzverhaltens erst bei einer hohen Dosierung von 1,8 m-%, die der maximal erlaubten Bindemittelzugabe nach ENPLUS [34] entspricht. Bei den Versuchen mit 0,5 m-% waren diese Effekte nicht signifikant und teilweise sogar tendenziell positiv zu bewerten. Daher wäre eine Reduzierung der Vorgabe für den maximal erlaubten Bindemittelgehalt zu empfehlen. Gleichzeitig ist nach Möglichkeit eine Überdosierung während der Pelletproduktion sicher zu vermeiden.

Zugabe von Kaolin. Durch die Additivierung mit Kaolin wurden bei der hohen Dosierung von 0,34 m-% alle gasförmigen Emissionen sowohl für den Pelletofen als auch den Pelletkessel signifikant gesenkt. Bei der niedrigen Dosierung von 0,17 m-%, die nach Abschnitt 3.4 berechnet wurde, wurden für den Pelletofen im Vergleich zur reinen Fichte tendenziell leicht höhere CO- und org.-C-Emissionen gemessen, beim Pelletkessel waren diese identisch mit denen der reinen Fichte. Die NO_x-Emissionen sanken für beide Feuerungen für beide Dosierungen leicht ab. Bei den Gesamtstaubemissionen zeigte sich für den Pelletofen bei der niedrigen Dosierung eine leichte (nicht signifikante) Abnahme, die dann bei der hohen Dosierung deutlich größer ausfiel (signifikant). Beim Pelletkessel dagegen zeigte sich für die niedrige Dosierung ein signifikanter Rückgang bei den Gesamtstaubemissionen, während diese sich bei der hohen Dosierung wieder auf das Niveau der reinen Fichte erhöhte. Hinsichtlich der Staubzusammensetzung führt eine Überdosierung von Kaolin beim Pelletofen zu einem Anstieg der EC- und OC-Emissionen, während beim Pelletkessel die Salze und Oxide der Aerosolbildner (Kaolinaustrag) ansteigen. Hier zeigt sich die nach Abschnitt 3.4 berechnete Kaolindosierung als optimal.

Dies gilt auch für das Ascheschmelzverhalten, das durch die niedrige Dosierung verbessert, jedoch durch die hohe Dosierung wieder verschlechtert wird. Eine weitere Erkenntnis ist, dass sich bei den mit Kaolin additivierten Pellets die Partikelverteilung der Staubpartikel deutlich in Richtung der ultrafeinen Partikel verschiebt. Dieser Effekt nimmt ebenfalls mit der Höhe der Kaolindosierung zu. Wenn Kaolin bei Holzpellets eingesetzt werden soll, müsste die nach Berechnung minimale Dosierung verwendet werden, die allerdings beim Pelletofen wahrscheinlich noch nicht den gewünschten Effekt auf die Staubemissionen hat. Die Beobachtung bezüglich der Verschiebung der Partikelgrößenverteilung hin zu den ultrafeinen Partikeln wäre anhand weiterer Feuerungsversuche zu validieren.

7.2.6 Einfluss der Holzart auf die Emissionen

Pellets aus acht Holzarten wurden für die Untersuchung des Einflusses der verwendeten Holzart auf die Emissionen verwendet, wobei für Fichte, Eiche und Buche jeweils zwei verschiedene Rohstoffquellen zum Einsatz kamen. Sowohl an Pelletofen 2 als auch an Pelletkessel 1 wurden alle elf Sortimente hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens untersucht. Tabelle 44 zeigt die wichtigsten in der folgenden Diskussion der Ergebnisse der Emissionsmessungen herangezogenen Brennstoffparameter (Abschnitt 5.2.2). Innerhalb der verwendeten Holzarten liegt die Pelletlänge zwischen 11,3 mm für Kiefer und 21,8 mm für Eiche 2. Die Energiedichte liegt zwischen 11,1 GJ/m³ für Eiche und 12,4 GJ/m³ für Fichte 2 (mit Rinde) und wird bei den Holzarten vornehmlich durch die mittlere Pelletlänge und die Partikeldichte beeinflusst (Abschnitt 5.2.2). Der Aschegehalt weist bei den verwendeten Holzarten relativ große Unterschiede zwischen 0,27 m-% für Eiche 1 und 2,39 m-% für Apfel auf. Apfelholz und Fichte 2 liegen aufgrund des erhöhten Aschegehalts außerhalb der A1-Qualität. Die Summe der aerosolbildenden Elemente hängt stark von der verwendeten Holzart ab und liegt zwischen 438 mg/kg für Douglasie und 4.323 mg/kg für Apfel. Innerhalb der A1-Qualitätsanforderungen enthält Buche 2 mit 1.493 mg/kg den höchsten Gehalt an Aerosolbildnern. Das Si/K-Verhältnis liegt zwischen 0,2 für Eiche 1 bzw. Buche 1 und 2,6 für Kiefer. Auch die Douglasie weist im Vergleich zu den restlichen Holzarten mit 2,0 noch ein sehr hohes Si/K-Verhältnis auf. Somit könnte es bei Kiefer und Douglasie zu einer verstärkten Einbindung des Kaliums in die Asche kommen und damit die Gesamtstaubemissionen verringert werden.

Tabelle 44: *Ausgewählte Brennstoffparameter der zur Untersuchung des Einflusses der Holzart verwendeten Pelletsortimente*

Bezeichnung	Mittlere Pelletlänge	Energiedichte	Aschegehalt	Summe Aerosolbildner	Si/K*
–	mm	GJ/m ³ , ar	m-%, d	mg/kg, d	mol/mol
Fichte 1	17,0	12,1	0,4	578	0,3
Fichte 2 mit Rinde	15,0	12,4	0,83	743	1,1
Kiefer	11,3	11,8	0,61	492	2,6
Lärche	18,8	11,8	0,39	451	0,5
Douglasie	18,7	11,7	0,28	438	2,0
Eiche 1	21,0	11,1	0,27	630	0,2
Eiche 2	21,8	11,4	0,36	847	0,5
Buche 1	16,5	11,8	0,63	1.137	0,2
Buche 2	16,9	11,5	0,56	1.493	0,5
Tropenholz	11,2	11,2	0,70	711	0,9
Apfel	20,7	11,6	2,39	4.323	0,5

* Bei Siliziumgehalten unter der Bestimmungsgrenze (100 mg/kg, d) wurde für die Berechnung des Si/K-Verhältnisses die Bestimmungsgrenze eingesetzt.

Der Brennstoffmassenstrom im Pelletofen 2 (siehe Tabelle 45) liegt für die verwendeten Holzarten bei Pelletofen 2 zwischen 1,42 kg/h für Fichte 1 und 1,67 kg/h für Douglasie. Signifikant unterscheiden sich hier nur die Douglasie von der Fichte 1 und der Fichte 2. Die Spannweite der Brennstoffmassenströme ist hier mit 0,25 kg/h etwas kleiner als bei den marktverfügbaren Holzpellets (Abschnitt 7.1). Im Gegensatz dazu liegen die Brennstoffmassenströme bei Pelletkessel 1 (Tabelle 46) unter Ausschluss der Apfelpellets (2,99 kg/h) zwischen 3,12 kg/h (Kiefer) und 3,44 kg/h (Buche 2). Hier ist die Spannweite unter Berücksichtigung der wesentlich größeren Wärmeleistung des Kessels mit 0,32 kg/h relativ gering. Außer Apfel unterscheidet sich hier nur Kiefer signifikant von Buche 1 und Buche 2. Die Lambda-Werte liegen für Pelletofen 2 zwischen 2,3 für Kiefer und 2,8 für Fichte 1. Kiefer und Douglasie liegen hier signifikant niedriger als Fichte 1, weitere signifikante Unterschiede bestehen zwischen Buche 1 und Kiefer sowie Tropenholz. Beim Pelletkessel 1 liegen durch die Lambda-Regelung alle Sortimente außer Apfel (1,8) bei einem Lambda-Wert von 1,6. Die Brennraumtemperatur liegt bei Pelletofen 2 zwischen 606 °C für Fichte 1 und Eiche 1 bis 655 °C für Kiefer und Tropenholz. Sie liegt für Kiefer, Douglasie und Tropenholz signifikant höher als für Fichte 1, Lärche und Eiche 1 und weist eine leichte Abhängigkeit ($R^2 = 0,28$) von der mittleren Pelletlänge auf (nicht dargestellt). Die Glutbetttemperatur liegt zwischen 877 °C für Kiefer und 524 °C für Apfel. Diese Unterschiede lassen sich für die Holzarten gut durch den hier stark variierenden Aschegehalt erklären ($R^2 = 0,91$), da das Thermoelement immer fest an derselben Position im Brennerkopf eingebaut war. Daher erfasst dieser Sensor je nach Aschegehalt entweder die Temperatur im, unter oder über dem Glutbett (siehe Abbildung 178). Auch der Druckverlust über das Glutbett zeigt eine Abhängigkeit zum Aschegehalt ($R^2 = 0,57$) und liegt zwischen 24 Pa für Eiche 1 und 33 Pa für Apfel.

Tabelle 45: *Feuerungstechnische Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Holzart für Pelletofen 2*

Bezeichnung	Brennstoffverbrauch	Lambda	Brennraumtemperatur	Glutbetttemperatur	Druckverlust über Glutbett
–	kg/h, ar	–	°C	°C	Pa
Fichte 1	1,42 ± 0,05	2,8 ± 0,01	606 ± 8,1	830 ± 23,6	28 ± 0,31
Fichte 2 mit Rinde	1,43 ± 0,05	2,6 ± 0,05	627 ± 10,7	741 ± 27,7	30 ± 0,68
Kiefer	1,59 ± 0,10	2,3 ± 0,03	655 ± 13,8	836 ± 22,2	26 ± 0,44
Lärche	1,49 ± 0,08	2,7 ± 0,04	611 ± 9,1	845 ± 9,3	26 ± 0,17
Douglasie	1,67 ± 0,08	2,4 ± 0,06	646 ± 10,0	877 ± 9,3	25 ± 0,36
Eiche 1	1,45 ± 0,05	2,7 ± 0,10	606 ± 10,8	856 ± 5,9	24 ± 0,54
Eiche 2	1,63 ± 0,07	2,5 ± 0,20	634 ± 17,0	821 ± 7,7	26 ± 0,49

Bezeichnung	Brennstoffverbrauch	Lambda	Brennraum- temperatur	Glutbett- temperatur	Druckverlust über Glutbett
–	kg/h, ar	–	°C	°C	Pa
Buche 1	1,63 ± 0,12	2,5 ± 0,03	644 ± 12,6	751 ± 7,0	31 ± 0,82
Buche 2	1,58 ± 0,09	2,5 ± 0,07	640 ± 14,4	788 ± 12,4	29 ± 0,81
Tropenholz	1,58 ± 0,09	2,4 ± 0,05	655 ± 10,5	729 ± 13,9	29 ± 0,63
Apfel	1,56 ± 0,05	2,5 ± 0,03	637 ± 9,0	524 ± 23,6	33 ± 1,03

Bei Pelletkessel 1 liegt die Abgastemperatur zwischen 97 °C für Fichte 2 und 120 °C für Eiche 2. Die Abgastemperatur von Fichte 2 ist signifikant niedriger als die aller Sortimente bis auf Buche 2. Die Wärmeleistung schwankt bei den untersuchten Holzarten stärker als bei den anderen untersuchten Parametern und liegt zwischen 12,6 kW für Apfel und 15 kW für Fichte 2 und Buche 2. Hier liegt nur die Wärmeleistung bei den Apfelpellets signifikant niedriger als die der restlichen Sortimente.

Tabelle 46: *Feuerungstechnische Parameter der Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Holzart für Pelletkessel 1*

Bezeichnung	Brennstoffverbrauch	Lambda	Abgas- temperatur	Wärmeleistung
–	kg/h	–	°C	kW
Fichte 1	3,24 ± 0,08	1,6 ± 0,01	117 ± 1,2	14,3 ± 0,06
Fichte 2 mit Rinde	3,36 ± 0,06	1,6 ± 0,02	97 ± 3,2	15 ± 0,04
Kiefer	3,12 ± 0,04	1,6 ± 0,02	114 ± 0,7	13,9 ± 0,13
Lärche	3,32 ± 0,01	1,6 ± 0,02	116 ± 1,0	14 ± 0,10
Douglasie	3,29 ± 0,04	1,6 ± 0,01	116 ± 0,8	14 ± 0,07
Eiche 1	3,32 ± 0,11	1,6 ± 0,02	117 ± 1,3	13,9 ± 0,14
Eiche 2	3,33 ± 0,04	1,6 ± 0,02	120 ± 2,9	13,9 ± 0,18
Buche 1	3,39 ± 0,13	1,6 ± 0,01	119 ± 2,0	14,3 ± 0,14
Buche 2	3,44 ± 0,03	1,8 ± 0,05	101 ± 3,1	15 ± 0,17
Tropenholz	3,28 ± 0,03	1,6 ± 0,01	117 ± 2,2	14 ± 0,08
Apfel	2,99 ± 0,30	1,8 ± 0,30	116 ± 2,8	12,6 ± 1,84

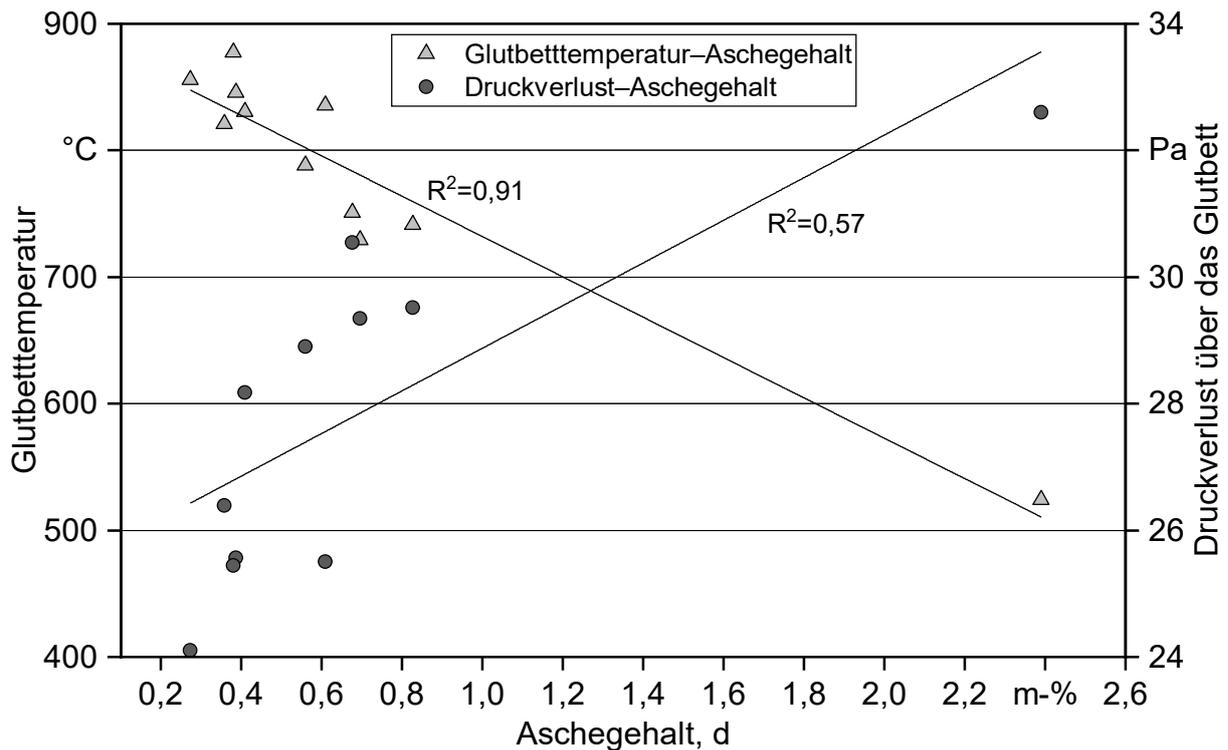


Abbildung 178: Abhängigkeit der Glutbetttemperatur und dem Druckverlust über das Glutbett vom Aschegehalt bei der Variation der Holzarten an Pelletofen 2

7.2.6.1 Gasförmige Emissionen

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen der untersuchten Holzarten sind für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 in Abbildung 179 dargestellt. Wegen des hohen Aschegehalts der Apfelpellets liegen hier die CO-Emissionen mit 4.189 mg/Nm^3 für den Pelletofen 2 und 247 mg/Nm^3 für den Pelletkessel 1 auf einem verglichen mit den restlichen Holzarten sehr hohen Niveau. Die hohen Spannweiten zwischen den Minimal- und Maximalwerten (siehe Fehlerbalken) zeigen, dass die verwendeten Feuerungen für Brennstoffe mit diesem hohen Aschegehalt nicht geeignet sind, da diese hinsichtlich der Geometrien des Brennraums, Rost- bzw. Brennertopfs sowie der Abstände der Luftdüsen vom Rost nicht für derartige Aschegehalte ausgelegt sind. Daher wird dieser Messwert mit Apfelholzpellets hier nur dargestellt, aber nicht in die weitere Diskussion der Ergebnisse einbezogen.

Für die restlichen Holzarten ergeben sich beim Pelletofen 2 CO-Emissionen zwischen 78 mg/Nm^3 für Kiefer und 461 mg/Nm^3 für Buche 1. Die CO-Emissionen liegen dabei für Buche 1 signifikant höher als für Fichte 1, Kiefer, Douglasie und Lärche. Der Grenzwert der 1. BImSchV für Pelletöfen wird hier im Mittel für Buche 1, Buche 2 und Tropenholz (und Apfel) überschritten. Bei Einzelmessungen (Fehlerbalken) wird der Grenzwert auch bei Fichte 2 mit Rinde und Eiche 2 überschritten. Für die CO-Emissionen erweist sich also ein hoher Rindenanteil bei Nadelholz sowie größtenteils das Laubholz als problematisch für den Pelletofen. Kiefer und Douglasie weisen die niedrigsten CO-Emissionen und zeitgleich das höchste Si/K-Verhältnis auf.

Bei Pelletkessel 1 liegen die CO-Emissionen dagegen zwischen 1 mg/Nm^3 für Kiefer und Douglasie und 13 mg/Nm^3 für Buche 2 auf einem sehr niedrigen Niveau. Signifikant unterscheiden sich die Mittelwerte hier nicht (außer Apfel). Auch für den Pelletkessel liegen Kiefer und Douglasie bei den CO-Emissionen am niedrigsten, dies könnte auf einen Zusammenhang mit dem Si/K-Verhältnis hindeuten.

Die Ergebnisse zu den CO-Emissionen decken sich damit mit den Ergebnissen von SIPPULA ET AL. [83] und SCHMIDT ET AL. [79], bei denen ebenfalls im Pelletofen mit Abwurf-fernung unterschiedliche Holzarten und bei SIPPULA ET AL. auch Pellets mit und ohne Rindenanteil untersucht wurden. In beiden Untersuchungen führten Laubholzpellets ebenfalls zu höheren CO-Emissionen. Ebenso wurde bei SIPPULA ET AL. ein vergleichbarer Effekt eines höheren Rindenanteils auf die CO-Emissionen beobachtet [83]. Auch bei SCHMIDT ET AL. lagen die CO-Emissionen von Eiche niedriger als diejenigen von Fichte [79].

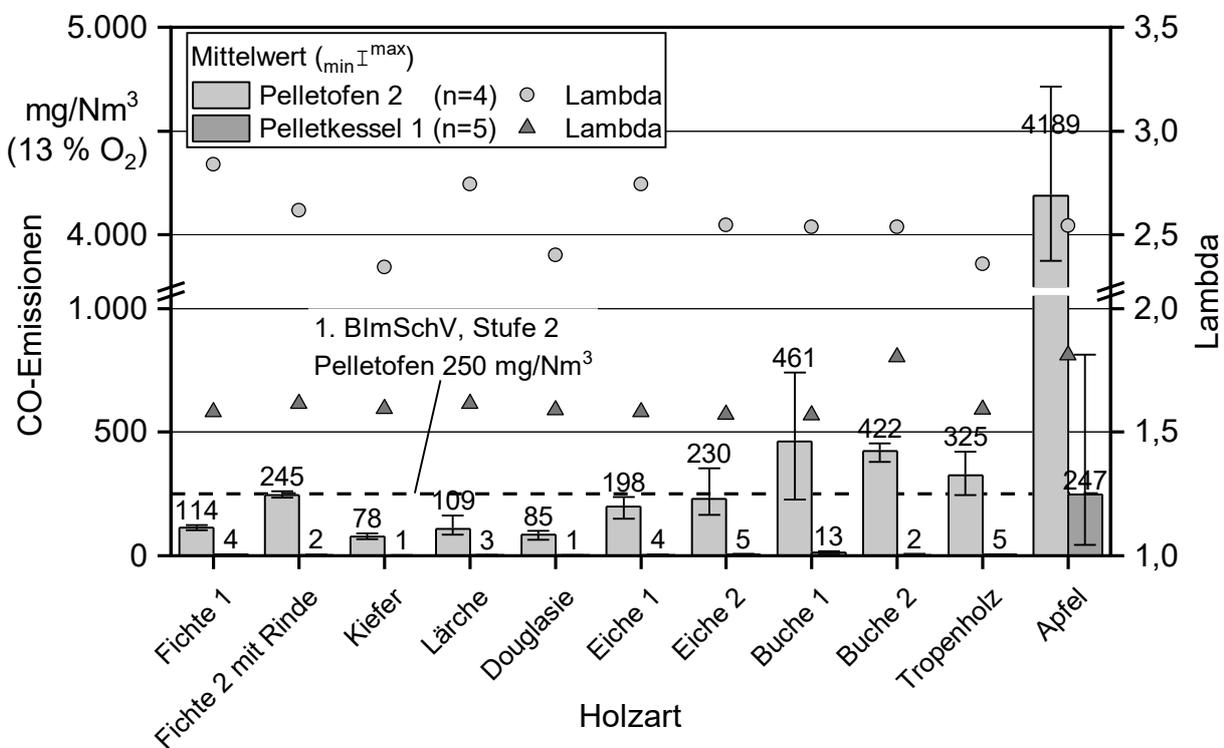


Abbildung 179: CO-Emissionen bei unterschiedlichen Holzarten im Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1

Emissionen gasförmiger organischer Kohlenwasserstoffe (org.-C). Die org.-C-Emissionen für die untersuchten Holzarten sind für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 in Abbildung 180 dargestellt. Diese liegen wieder für Apfel aufgrund des hohen Aschegehalts mit 93 mg/Nm^3 beim Pelletofen und 3 mg/Nm^3 beim Pelletkessel am höchsten (signifikant). Für die restlichen Sortimente liegen die org.-C-Emissionen beim Pelletofen zwischen 1 mg/Nm^3 für Douglasie und 11 mg/Nm^3 für Buche 1. Die org.-C-Emissionen liegen für Buche 1 signifikant höher als für Fichte 1, Kiefer und Douglasie sowie für Tropenholz signifikant höher als für Kiefer und Douglasie. Tendenziell (nicht signifikant) führt eine Erhöhung des Rindenanteils bei Fichte 2 zu höheren org.-C-Emissionen. Außerdem scheinen

beim Pelletofen die Nadelhölzer bei einem niedrigen Rindenanteil zu niedrigeren org.-C-Emissionen zu führen als Laubhölzer. Innerhalb der Laubhölzer liegt Eiche 1 mit 4 mg/Nm³ für beide untersuchten Sortimenten am niedrigsten. Wie auch bei den CO-Emissionen liegen bei Pelletofen 2 Kiefer und Douglasie tendenziell am niedrigsten. Beim Pelletkessel 1 liegen die Sortimente (ohne Apfel) bei ca. 0–1 mg/Nm³ und weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Für Pelletkessel 1 zeigt sich eine lineare Abhängigkeit der org.-C-Emissionen vom Aschegehalt ($R^2 = 0,84$). Diese Abhängigkeit ist bei Pelletofen 2 ($R^2 = 0,27$) nicht so ausgeprägt (siehe Abbildung 181). Auch bei SIPPULA ET AL. wurden höhere org.-C-Emissionen bei höherem Rindenanteil beobachtet, die org.-C-Emissionen der Laubhölzer waren auch hier bis auf Birke höher als die der Nadelhölzer [83].

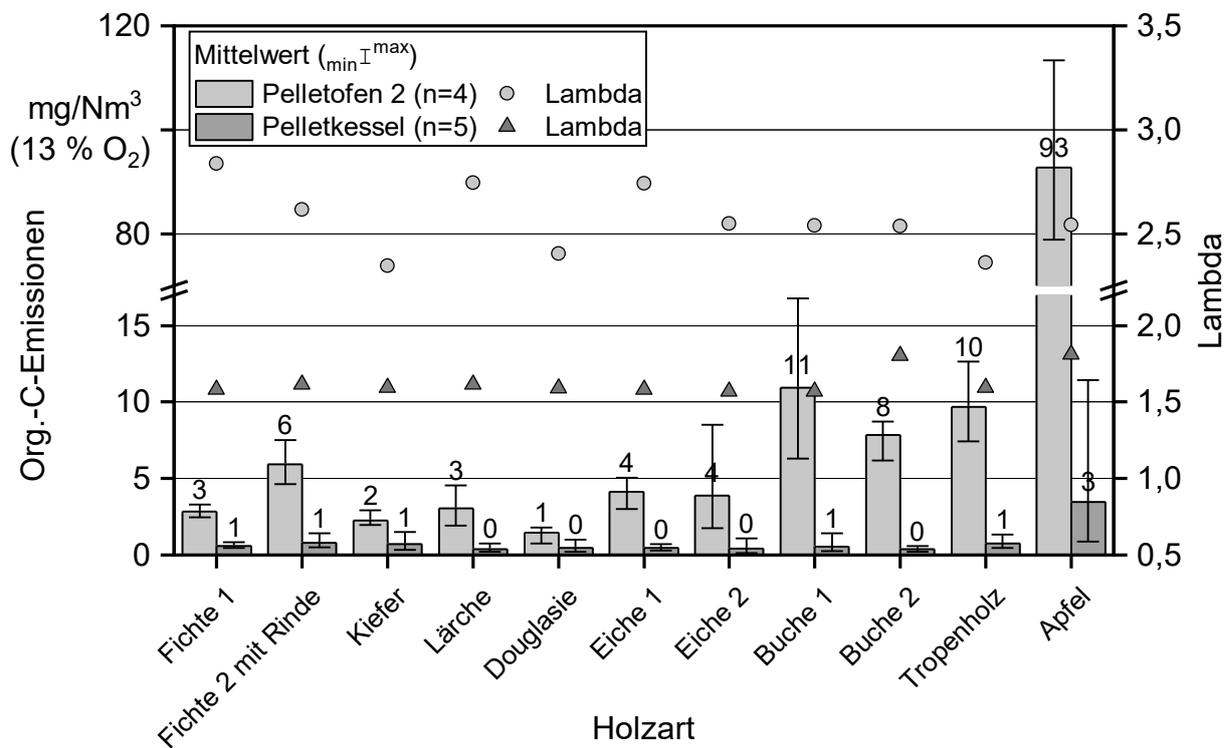


Abbildung 180: Org.-C-Emissionen für die untersuchten Holzarten für Pelletofen 2 ($n = 4$, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1

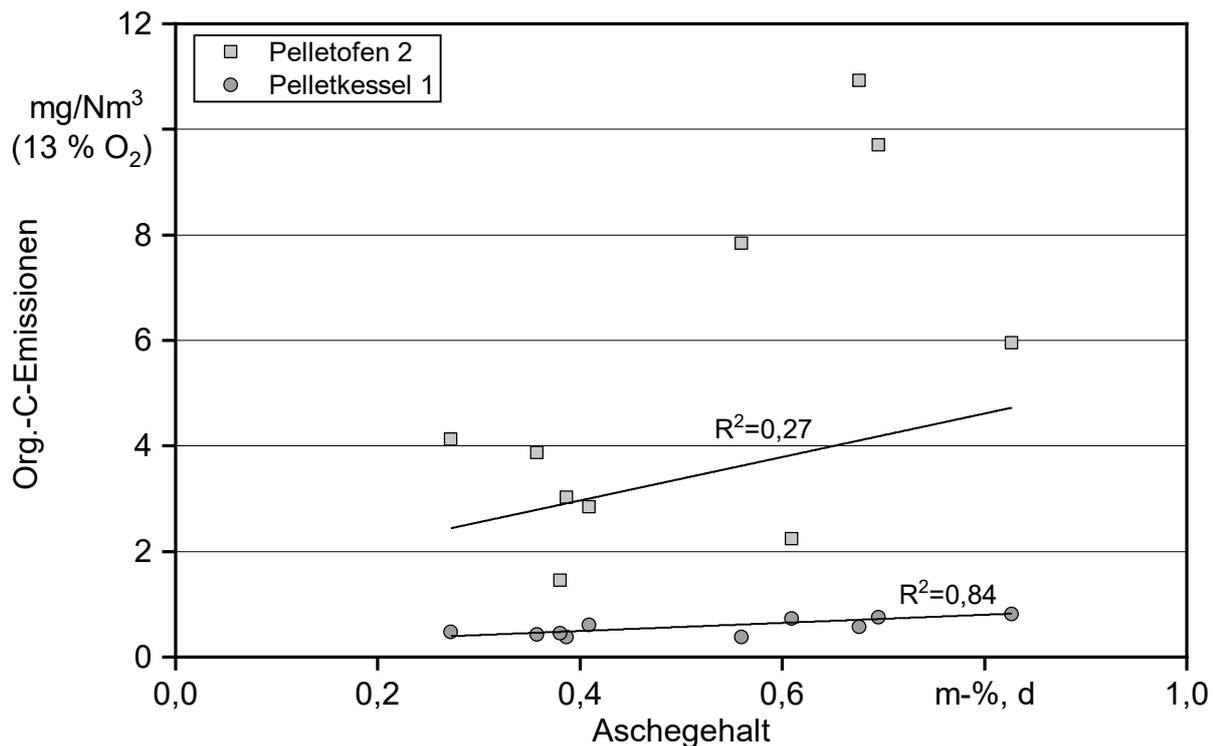


Abbildung 181: Abhängigkeit der org.-C-Emissionen vom Aschegehalt für die untersuchten Holzarten in Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 (ohne Apfel)

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen sind für die untersuchten Holzarten an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 in Abbildung 182 dargestellt. Für den Pelletofen 2 liegen die NO_x-Emissionen zwischen 90 mg/Nm³ bei Lärche und 212 mg/Nm³ bei Apfel, während sie für Pelletkessel 1 zwischen 93 mg/Nm³ bei Lärche und 364 mg/Nm³ bei Apfel liegen. Für die untersuchten Holzarten mit NO_x-Emissionen im niedrigen Bereich (bis ca. 160 mg/Nm³) liegen die NO_x-Emissionen des Pelletkessels nur leicht höher als beim Pelletofen. Bei höheren NO_x-Emissionen unterscheiden sich Pelletkessel und Pelletofen deutlich, wie z. B. bei Tropenholz und Apfel, wo bis zu 152 mg/Nm³ zwischen Pelletofen und Pelletkessel liegen. Betrachtet man die Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom Stickstoffgehalt der untersuchten Holzarten (Abbildung 183), so zeigt sich für beide Feuerungen eine deutliche lineare Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom Stickstoffgehalt mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,79$. Beim Pelletkessel wird aber – vor allem bei höheren Stickstoffgehalten im Vergleich zum Pelletofen – ein höherer Anteil des Stickstoffs aus dem Brennstoff in NO_x umgewandelt. Dies ist vermutlich auf der einen Seite durch entsprechend höhere Brennraumtemperaturen sowie einen bezogen auf die Nennwärmeleistung wesentlich kleineren Brennraum beim Pelletkessel (Brennraumbelastung) zu erklären [52]. Der Effekt der Brennraumbelastung (Verhältnis von Brennraumvolumen zu Brennstoffvolumen) wird durch höhere Aschegehalte und vermutlich über die Versuchsdauer noch erhöht. Die höheren Stickstoffgehalte liegen bei den untersuchten Holzarten alle auf der Seite der Laubholzsortimente, ein höherer Rindenanteil führt aber auch bei den Nadelhölzern zu einem höheren Stickstoffgehalt und damit zu höheren NO_x-Emissionen. Auch bei SCHMIDT ET AL. [79] lagen die NO_x-Emissionen der Laubhölzer höher als die der

Nadelhölzer und bei SIPPULA ET AL. [83] zeigte sich ebenfalls der Effekt des höheren Rindenanteils, wobei hier Birke bei den Laubböhlzern niedriger lag als Fichte.

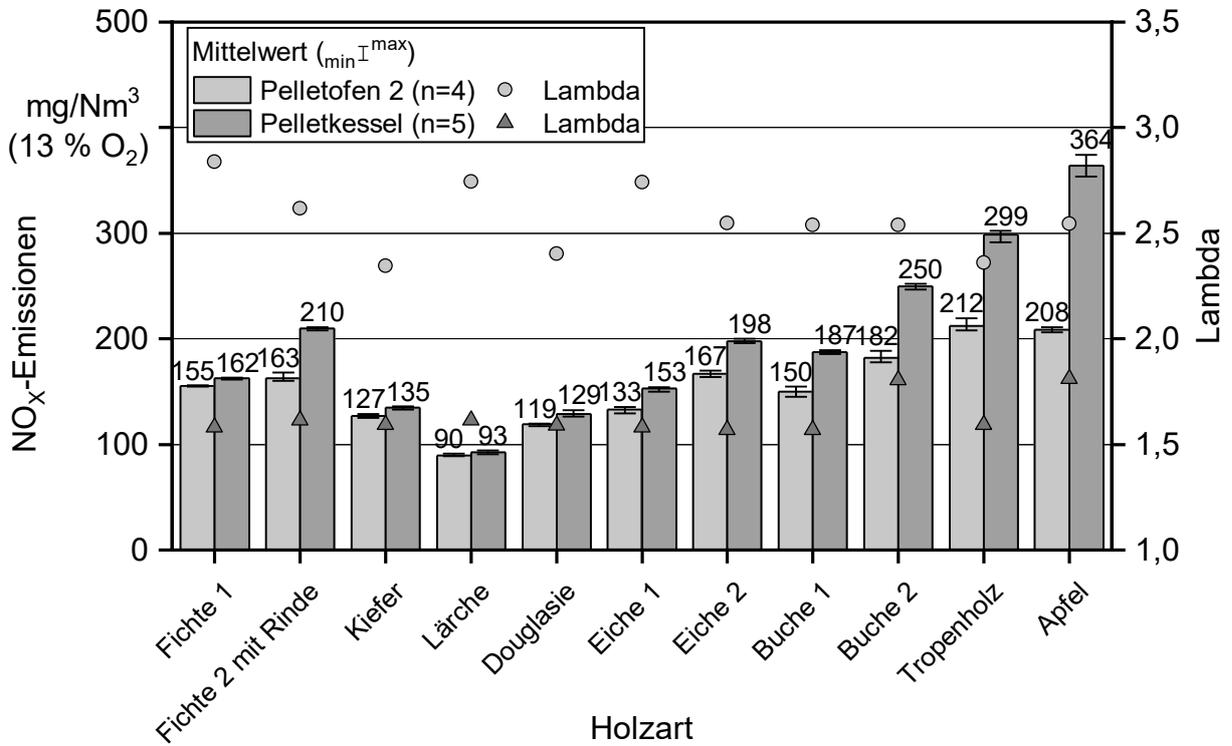


Abbildung 182: NO_x-Emissionen für die untersuchten Holzarten für Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1

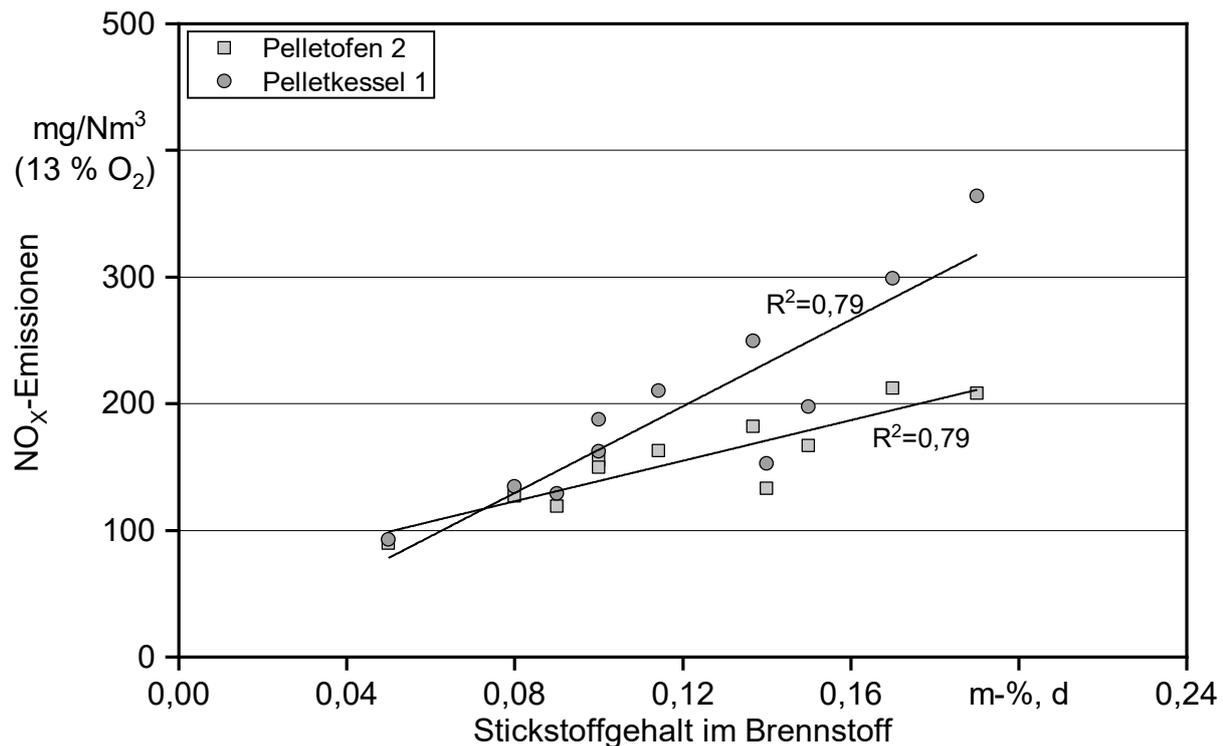


Abbildung 183: Abhängigkeit der NO_x-Emissionen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 für die Holzarten

7.2.6.2 Gesamtstaubemissionen

Die Gesamtstaubemissionen der untersuchten Holzarten liegen sowohl für Pelletofen 2 als auch Pelletkessel 1 für Apfelholz mit 263 mg/Nm³ bzw. 109 mg/Nm³ wie auch bei den gasförmigen Emissionen auf einem deutlich höheren Niveau als die restlichen Sortimente (siehe Abbildung 184). Bei den restlichen Holzarten liegen die Gesamtstaubemissionen bei Pelletofen 2 zwischen 23 mg/Nm³ für Kiefer und 63–65 mg/Nm³ für Buche 1 und Buche 2. Bei den Nadelhölzern liegen für Pelletofen 2 die Gesamtstaubemissionen von Fichte 2 mit Rinde mit 45 mg/Nm³ signifikant höher als für die restlichen Nadelholzsortimente. Kiefer und Douglasie weisen hier tendenziell niedrigere Gesamtstaubemissionen auf. Vergleicht man die Sortimente mit niedrigem Rindenanteil (alle außer Fichte 2 und Apfel), so weisen alle Laubhölzer beim Pelletofen 2 signifikant höhere Gesamtstaubemissionen auf als die Nadelhölzer. Innerhalb der Laubhölzer liegt die Eiche mit 45–47 mg/Nm³ tendenziell am niedrigsten und signifikant niedriger als die beiden Buchensortimente. Die Gesamtstaubemissionen von Eiche 1 und Eiche 2 sowie Buche 1 und Buche 2 weisen nahezu identische Gesamtstaubemissionen auf, daher können diese Sortimente als repräsentativ für die jeweilige Holzart angesehen werden. Tropenholz liegt mit 52 mg/Nm³ bei Pelletofen 2 zwischen den Holzarten Eiche und Buche. Der Grenzwert der 1. BImSchV (Stufe 2) für Pelletöfen ohne Wassertasche von 30 mg/Nm³ wird für Fichte 2 mit Rinde sowie alle Laubholzsortimente überschritten.

Für Pelletkessel 1 liegen die Gesamtstaubemissionen (ohne Apfel) bei 5–6 mg/Nm³ für Douglasie bzw. Kiefer und 50–55 mg/Nm³ für die beiden Buchensortimente. Damit liegen bei den Nadelhölzern die Gesamtstaubemissionen für Douglasie und Kiefer signifikant

niedriger und für Fichte 2 mit Rinde signifikant höher als die restlichen Sortimente. Vergleicht man wieder die Sortimente mit niedrigem Rindenanteil (d. h. alle außer Apfel und Fichte 2 mit Rinde), liegen auch beim Pelletkessel die Gesamtstaubemissionen der Laubhölzer signifikant höher als die der Nadelhölzer. Anders als beim Pelletofen liegen die Gesamtstaubemissionen für Tropenholz und Eiche 1 beim Pelletkessel mit 25 mg/Nm^3 am niedrigsten innerhalb der Laubhölzer. Außerdem unterscheiden sich beim Pelletkessel die Gesamtstaubemissionen der Eichensortimente signifikant, bei den Buchensortimenten jedoch nicht signifikant. Insgesamt wurde der Grenzwert der 1. BImSchV (Stufe 2) für Pelletkessel 1 nur für die Sortimente Kiefer, Douglasie und Fichte 1 (ohne Rinde) unterschritten. Alle anderen Sortimente weisen Gesamtstaubemissionen von über 20 mg/Nm^3 auf, für die meisten Laubhölzer sowie Fichte 2 mit hohem Rindenanteil sogar deutlich über dem Grenzwert.

Bei SIPPULA ET AL. [83] führte ein höherer Rindenanteil bei allen untersuchten Sortimenten zu einer Erhöhung der Staubemissionen, mit Ausnahme von Birke lagen auch die Staubemissionen der untersuchten Laubhölzer höher als die der untersuchten Nadelhölzer. Die Staubemissionen von Kiefernpellets lagen bei dieser Untersuchung nur geringfügig niedriger als bei Fichte. Auch bei SCHMIDT ET AL. [79] lagen die Staubemissionen der Laubholzpellets höher als die der Nadelholzpellets. Außerdem lagen wie auch hier die Staubemissionen der Eichenpellets unter denen der Buchenpellets. Auch bei DÖHLING ET AL. [39] lagen die Gesamtstaubemissionen der untersuchten Nadelhölzer unter denen der untersuchten Pappelpellets und die Gesamtstaubemissionen der untersuchten Kiefernpellets lagen hier ebenfalls deutlich unter denen der untersuchten Fichtenpellets. Damit decken sich die Ergebnisse weitestgehend mit bisherigen Ergebnissen aus der Literatur.

Die lineare Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen vom Gehalt der aerosolbildenden Elemente (siehe Abbildung 185) zeigt sowohl für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,86$) als auch für Pelletkessel 1 ($R^2 = 0,82$) einen ausgeprägten linearen Zusammenhang. Durch das erhöhte Si/K-Verhältnis bei Kiefer und Douglasie weichen die Gesamtstaubemissionen hier vor allem beim Pelletkessel 1 deutlich nach unten von diesem Trend ab. Dies liegt an der durch den erhöhten Siliziumanteil vermehrten Einbindung von Kalium in die Asche.

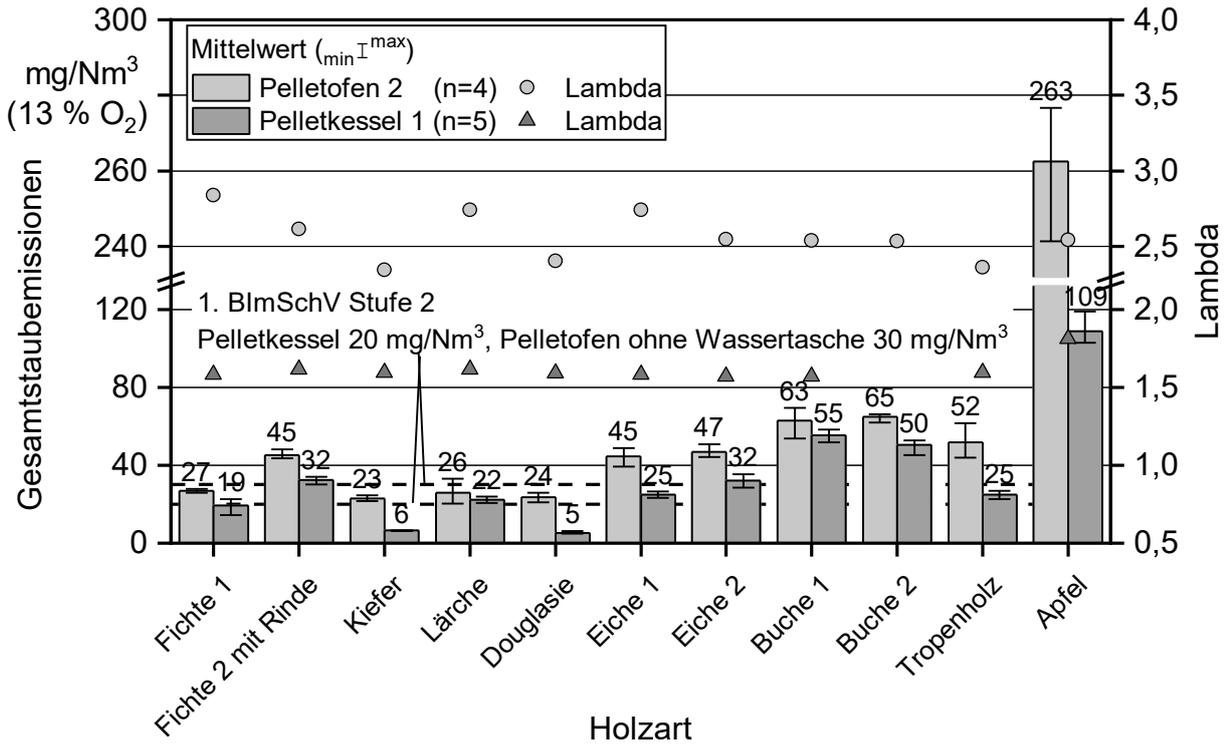


Abbildung 184: Gesamtstaubemissionen für die untersuchten Holzarten an Pelletofen 2 (n = 4, ohne Reinigung) und Pelletkessel 1

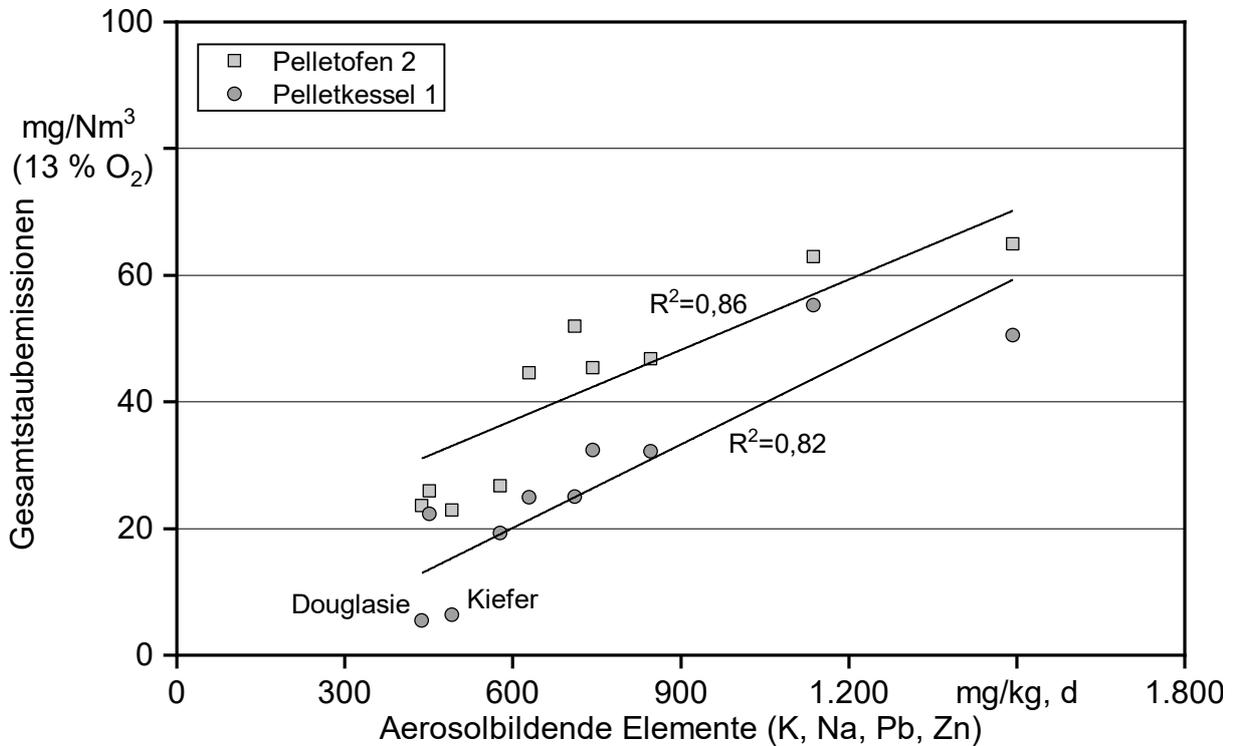


Abbildung 185: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 vom Gehalt aerosolbildender Elemente der untersuchten Holzarten

7.2.6.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der Staubpartikel

Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung. Das ELPI+ stand nicht für alle der untersuchten Holzarten zur Verfügung. Tabelle 47 zeigt die Partikelanzahl sowie die prozentuale Anzahlverteilung für die gemessenen Holzarten an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1. Für Pelletofen 2 liegt die gesamte Partikelanzahl für die untersuchten Holzarten zwischen $3,8 \times 10^7/\text{cm}^3$ für Douglasie und $5,0 \times 10^7/\text{cm}^3$ für Tropenholz. Für den Pelletkessel 1 liegt die Partikelanzahl zwischen $8,5 \times 10^5/\text{cm}^3$ für Douglasie und $8,2 \times 10^7/\text{cm}^3$ für Buche 1. Wie auch bei den Gesamtstaubemissionen zeigt sich bei der Partikelanzahl ein größerer Unterschied beim Tropenholz sowie beim Einfluss des Si/K-Verhältnis auf die Partikelanzahl bei Douglasie. Bei Kiefer zeigt sich für den Pelletkessel auch ein Effekt, dieser kann jedoch mangels Messdaten nicht mit dem Pelletofen 2 verglichen werden. Beim Pelletkessel 1 liegen bei den Nadelhölzern vermutlich durch das Si/K-Verhältnis bedingte Unterschiede in der Partikelanzahl von bis zu ca. zwei Zehnerpotenzen vor. Die Laubhölzer weisen für beide Feuerungen die höheren Partikelanzahlen auf. Der Hauptanteil der Partikel bewegt sich für die meisten untersuchten Holzarten zwischen 40 nm und 230 nm. Bei Douglasie ist für beide Feuerungen eine deutliche Verschiebung der Partikel zu den ultrafeinen Partikeln im Größenbereich 9–40 nm zu beobachten. Bei Kiefer ist diese Verschiebung der Partikelanzahl hin zu den ultrafeinen Partikeln für Pelletkessel 1 vergleichbar mit Douglasie.

Tabelle 47: Partikelanzahl und Partikelanzahlverteilung über die gesamte Messdauer, gemittelt an Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 (1 h)

Holzart	Pelletofen 2	Pelletkessel 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
–	9–40 nm	9–40 nm	40 - 230 nm	40–230 nm	230–731 nm	230–731 nm	Summe	Summe
–	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[1/cm ³]	[1/cm ³]
Fichte 1	6,4	–	90,1	–	3,6	–	$3,8 \times 10^7$	–
Fichte 2 mit Rinde	–	–	–	–	–	–	–	–
Kiefer	–	27,6	–	72,3	–	0,1	–	$5,4 \times 10^7$
Lärche	–	10,6	–	87,4	–	2,0	–	$7,8 \times 10^7$
Douglasie	14,2	29,1	82,9	70,8	2,9	0,1	$3,8 \times 10^7$	$8,5 \times 10^5$
Eiche 1	5,8	7,7	89,8	88,0	4,4	4,2	$4,6 \times 10^7$	$6,5 \times 10^7$
Eiche 2	5,3	4,9	88,6	92,3	6,1	2,8	$4,3 \times 10^7$	$7,2 \times 10^7$
Buche 1	2,1	4,3	89,3	89,4	8,6	6,3	$4,5 \times 10^7$	$8,2 \times 10^7$
Buche 2	–	–	–	–	–	–	–	–
Tropenholz	7,0	6,3	85,5	89,2	7,5	4,5	$5,0 \times 10^7$	$6,2 \times 10^7$
Apfel	–	–	–	–	–	–	–	–
Mittelwert	6,8	22,9	87,7	74,3	5,5	2,8	$4,4 \times 10^7$	$5,2 \times 10^7$
Minimum	2,1	4,3	82,9	2,8	2,9	0,1	$3,8 \times 10^7$	$8,5 \times 10^5$
Maximum	14,2	97,1	90,1	92,3	8,6	6,3	$5,0 \times 10^7$	$8,2 \times 10^7$

Abbildung 186 zeigt die Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Partikelanzahl von Pelletofen 2 und Pelletkessel 1. Für Pelletofen 2 ergibt sich eine lineare Abhängigkeit ($R^2 = 0,67$), während bei Pelletkessel 2 ($R^2 = 0,51$) aufgrund der starken Unterschiede bei der Douglasie und auch der Kiefer dieser Zusammenhang wesentlich weniger stark ausgeprägt ist.

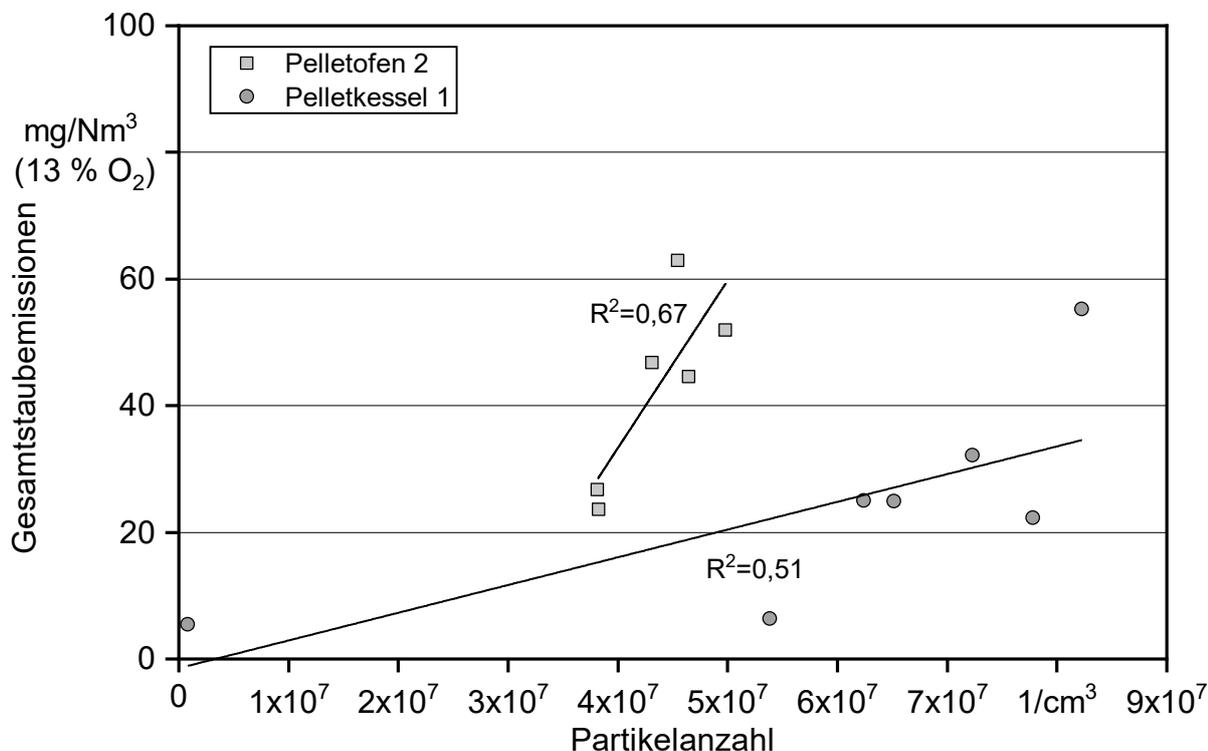


Abbildung 186: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von der Partikelanzahl bei der Untersuchung des Einflusses der Holzart auf die Emissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Zusammensetzung der Staubpartikel. Die Zusammensetzung der Staubpartikel hinsichtlich der unterschiedlichen Kohlenstoffanteile sowie Salze und Oxide ist für beide Feuerungen in Abbildung 187 grafisch und in Tabelle 48 für Pelletofen 2 sowie in Tabelle 49 für Pelletkessel 1 nochmals tabellarisch in Prozent und als Massenkonzentration dargestellt. Für Fichte 2 mit Rinde sowie Buche 2 konnten für Pelletkessel 1 keine Filteranalysen durchgeführt werden, da für diese Staubproben gestopfte Filterhülsen verwendet wurden. Im direkten Vergleich liegt der Hauptanteil der Gesamtstaubemissionen für beide Feuerungen bei den untersuchten Holzarten in Form von Salzen und Oxiden der Aerosolbildner vor, deren Anteil am Gesamtstaub bei Pelletofen 2 mit 35 m-% für Kiefer und bis 90 m-% für Buche 2 etwas niedriger liegt als für Pelletkessel 1 mit 81 m-% für Buche 1 bis 99 m-% für Eiche 2. Absolut liegt der Ausstoß an Salzen und Oxiden für den Pelletkessel bei allen untersuchten Holzarten geringfügig niedriger als für den Pelletofen. Bei Kiefer und Douglasie zeigt sich, dass der Effekt des hohen Si/K-Verhältnisses auch bei Pelletofen 2 sichtbar, jedoch durch einen im Vergleich zum Pelletkessel 1 relativ hohen Ausstoß an EC (vermutlich Ruß) bei den Gesamtstaubemissionen nicht direkt erkennbar ist. Dies könnte

möglicherweise an dem höheren Si/K-Verhältnis und den damit bedingten Versinterungen liegen, die bei dem wesentlich kleineren Brennertopf im Vergleich zum Rost des Kessels zu einer schlechteren Sauerstoffversorgung im Zuge einer Bildung unvermischter lamina- rer Strähnen führen. Insgesamt liegen Anteile elementaren Kohlenstoffs an den Ge- samtstaubemissionen für Pelletofen 2 zwischen 0 m-% für Eiche 1, Buche 1 sowie Bu- che 2 und 54 m-% für Kiefer (40 m-% für Douglasie) vor. Demgegenüber weist der Pellet- kessel 1 EC-Gehalte an den Gesamtstaubemissionen von maximal 2 m-% auf. Der Anteil von OC an den Gesamtstaubemissionen liegt für den Pelletofen zwischen 6 m-% für Bu- che 2 und 14 m-% für beide Eichensortimente sowie Tropenholz. Bei Pelletkessel 1 dage- gen liegt der Anteil von OC an den Gesamtstaubemissionen nur bei 1 m-% (für Tropen- holz) bis 6 m-% (für Buche 1). Der wesentlich höhere Anteil an EC und OC erklärt auch den Unterschied bei den Gesamtstaubemissionen des Tropenholzes zwischen dem Pel- letofen und dem Pelletkessel. Der Anteil an IC (Karbonate durch mitgerissene Aschepar- tikel) liegt beim Pelletofen 2 zwischen 0 m-% (für Kiefer) und 13 m-% (für Fichte 2 mit Rinde) und beim Pelletkessel 1 zwischen 0 m-% (für Eiche 1) und 13 m-% (für Buche 1). Beide Feuerungen zeigen hier den maximalen Anteil von IC für Buche 1. Betrachtet man den absoluten Ausstoß an IC, so zeigen beide Feuerungen die höchsten Werte für Bu- che 1 und Apfel bzw. der Pelletofen für Fichte 2. Das Mitreißen von Aschepartikeln scheint von einem hohen Aschegehalt begünstigt zu werden.

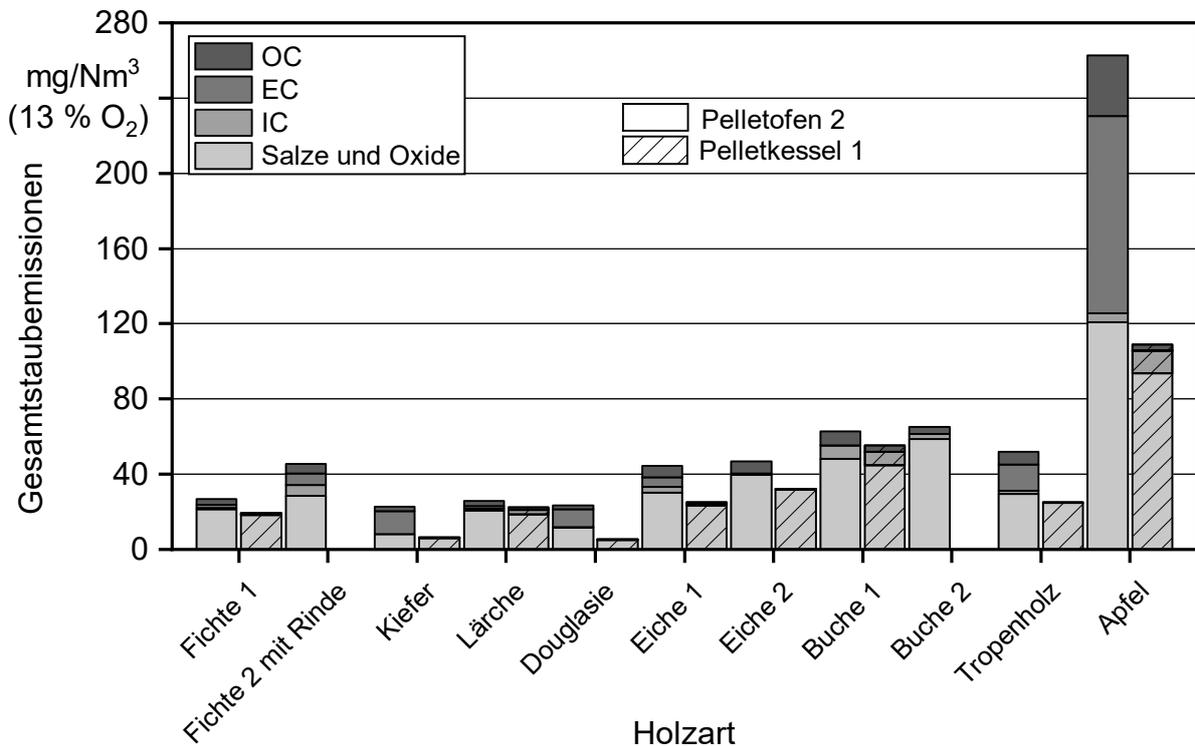


Abbildung 187: Zusammensetzung der Staubbelastung auf den Planfiltern bei den Mes- sungen zum Einfluss Holzart für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

Tabelle 48: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss Holzart für Pelletofen 2, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

Holzart	IC	EC	OC	Salze und Oxide	IC	EC	OC	Salze und Oxide
	m-%	m-%	m-%	m-%	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
Fichte 1	2	6	12	80	1	2	3	21
Fichte 2 mit Rinde	13	14	11	63	6	6	5	29
Kiefer	0	54	11	35	0	12	2	8
Lärche	4	5	10	80	1	1	3	21
Douglasie	2	40	10	49	0	9	2	12
Eiche 1	7	12	14	67	3	5	6	30
Eiche 2	1	0	14	85	0	0	6	40
Buche 1	11	0	12	77	7	0	8	48
Buche 2	4	0	6	90	3	0	4	59
Tropenholz	1	16	14	69	1	8	7	36
Apfel	2	40	12	46	5	105	32	121

Tabelle 49: Zusammensetzung der Staubbeladung auf den Planfiltern bei den Messungen zum Einfluss Holzart für Pelletkessel 1, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide

Holzart	IC	EC	OC	Salze und Oxide	IC	EC	OC	Salze und Oxide
	m-%	m-%	m-%	m-%	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
Fichte 1	2	0	2	96	0	0	0	18
Fichte 2 mit Rinde	–	–	–	–	–	–	–	–
Kiefer	1	2	3	94	0	0	0	6
Lärche	10	0	5	84	2	0	1	19
Douglasie	1	1	4	95	0	0	0	5
Eiche 1	4	0	3	94	1	0	1	23
Eiche 2	0	0	1	99	0	0	0	32
Buche 1	13	0	6	81	7	0	3	45
Buche 2	–	–	–	–	–	–	–	–
Tropenholz	1	0	1	99	0	0	0	25
Apfel	11	0	3	86	12	0	3	94

7.2.6.4 Untersuchung der Verbrennungsrückstände

Bei der Untersuchung des Einflusses der Holzart wurden alle Verbrennungsrückstände von Pelletofen 2 und alle außer Fichte 2 und Buche 2 für Pelletkessel 1 hinsichtlich des Verschlackungsverhaltens durch Sieben der Verbrennungsrückstände mit 2-mm- und 1-mm-Sieb untersucht. Zudem wurde für alle Holzarten die PASSA-Methode nach Abschnitt 4.3.2 durchgeführt. Betrachtet man die Ergebnisse der granulometrischen Untersuchungen hinsichtlich der Partikel > 2 mm (siehe Abbildung 188), liegt deren Anteil für beide Feuerungen bei den meisten Brennstoffen in etwa gleich hoch. Größere Unterschiede zwischen den Feuerungen gibt es für Eiche, Buche und Apfel. Die PASSA-Methode liegt bei den Holzarten Fichte 1, Fichte 2 mit Rinde Lärche, Eiche 1, Tropenholz und Apfel um 6–21 m-% höher als der Pelletofen 2 und für Fichte 1, Buche 1, Tropenholz und Apfel um 7–31 m-% höher als Pelletkessel 1. Hier wird das Verschlackungsverhalten dieser Holzarten von der PASSA-Methode überschätzt. Hingegen wird besonders für Kiefer und Douglasie (hoher Siliziumgehalt) sowie Eiche 2 die Verschlackung deutlich unterschätzt. Hier liegt die PASSA-Methode um 13–46 m-% niedriger als beim Pelletofen 2 und 16–47 m-% niedriger als beim Pelletkessel 1.

Bei der Gegenüberstellung der Verschlackungen in Abbildung 190 wird deutlich, dass vor allem bei der Holzart Kiefer und Douglasie ernsthafte Verschlackungen auftreten, die auch eine erhöhte Härte (Test durch Druck mit Fingern) aufweisen. Diese Verschlackungen sind für Kiefer und Douglasie sicherlich auf den erhöhten Siliziumgehalt zurückzuführen und damit gegenläufig zu den positiven Wirkungen bezüglich des Emissionsverhaltens. Für die beiden Buchensortimente zeigt die PASSA-Methode bei Pelletofen 2 sehr gut vergleichbare Ergebnisse und für Eiche 1 stimmt die PASSA-Methode sehr gut mit dem Pelletkessel 1 überein. Hier liegen beide Feuerungen weit auseinander.

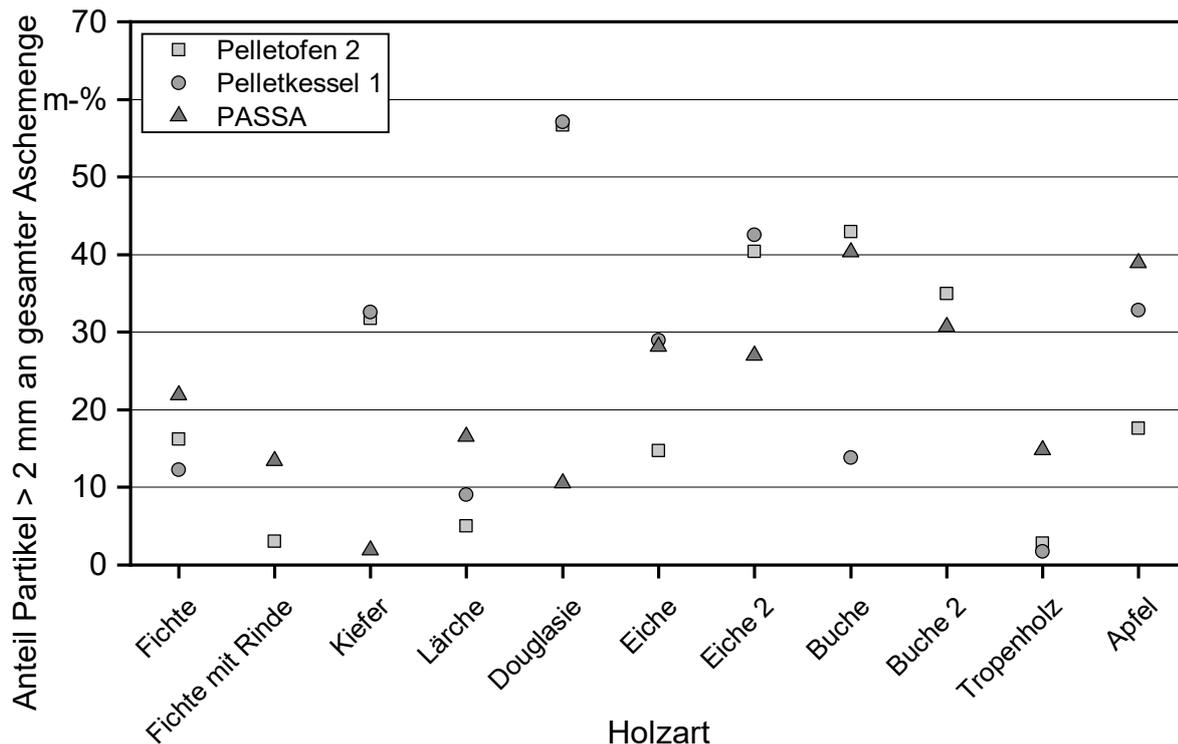


Abbildung 188: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung (Partikel > 2 mm) der Verbrennungsrückstände aus den Messungen zum Einfluss der Holzart für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und der PASSA-Methode

Im Vergleich zur Betrachtung des Anteils der Partikel > 2 mm an der gesamten Aschemenge zeigen sich für Partikel > 1 mm für Fichte 1, Fichte 2 mit Rinde, Kiefer, Buche 1 und Buche 2 im Trend vergleichbare Werte, die natürlich alle prozentual etwas höher liegen als bei Partikeln > 2 mm. Für Lärche und Tropenholz zeigen sich bei > 1 mm etwas deutlichere Unterschiede zwischen den Feuerungen, während für Eiche 2 und Apfel die beiden Feuerungen besser vergleichbare Ergebnisse liefern als bei der Betrachtung von Partikeln > 2 mm. Die PASSA-Methode liegt bei Douglasie mit > 1 mm etwas näher an den Feuerungen und ist bei Eiche 2 nahezu identisch mit beiden Feuerungen. Dennoch liegt auch bei der Betrachtung von Partikeln > 1 mm für einen Großteil der untersuchten Holzarten eine deutliche Über- bzw. Unterschätzung des Verschlackungsverhaltens mit der PASSA-Methode vor. Dies könnte eventuell mit der im Vergleich zur realen Feuerung deutlich unterschiedlichen Gasatmosphäre im Muffelofen (d. h. hoher Sauerstoffgehalt) sowie mit dem deutlich langsameren Temperaturanstieg zusammenhängen. Inwieweit durch die Anpassung der Gasatmosphäre eine Optimierung der Verschlackungsabschätzung durch die PASSA-Methode möglich ist, sollte in weiteren Untersuchungen untersucht werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der granulometrischen Untersuchungen an den realen Verbrennungsrückständen eine niedrige Verschlackungsneigung für Nadelholz mit Rinde und für Nadelholz mit niedrigem Siliziumanteil. Im Vergleich dazu zeigten die meisten Laubhölzer (außer Tropenholz) eine erhöhte Neigung zur Verschlackung und eine hohe Verschlackungsneigung für siliziumreiche Brennstoffe wie Kiefer, Douglasie und auch Eiche 2.

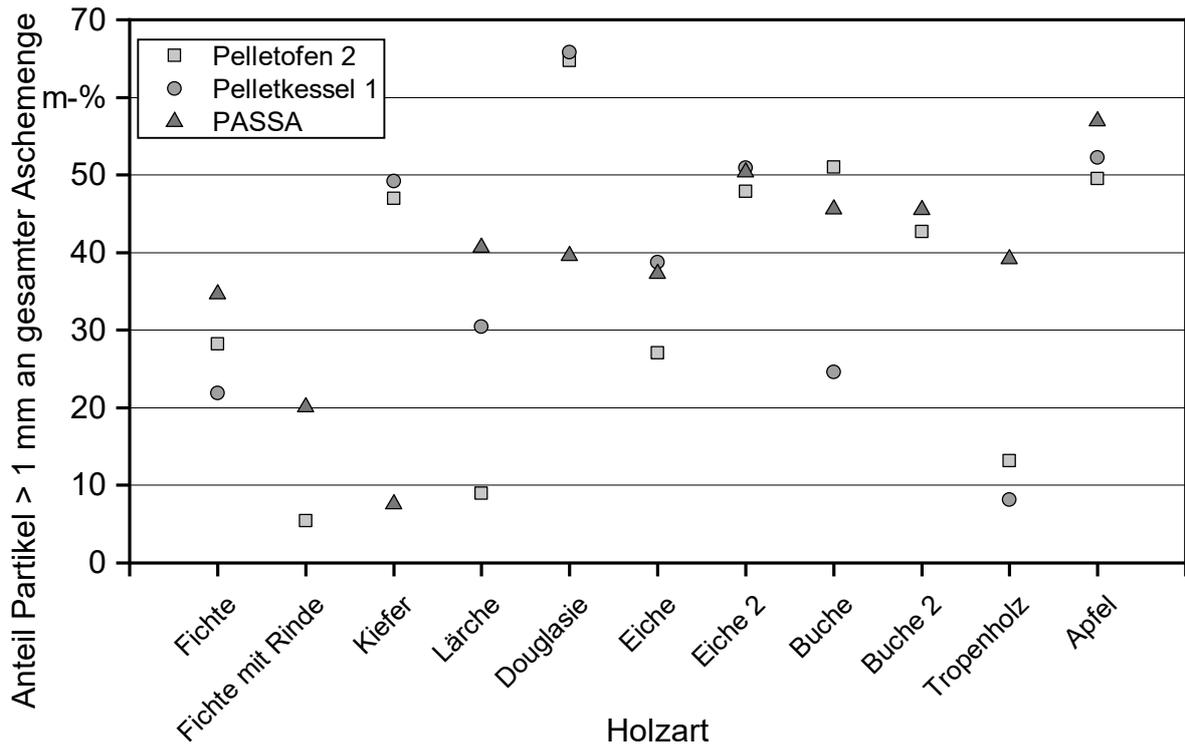


Abbildung 189: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung (Partikel > 1 mm) der Verbrennungsrückstände aus den Messungen zum Einfluss der Holzart für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und der PASSA-Methode

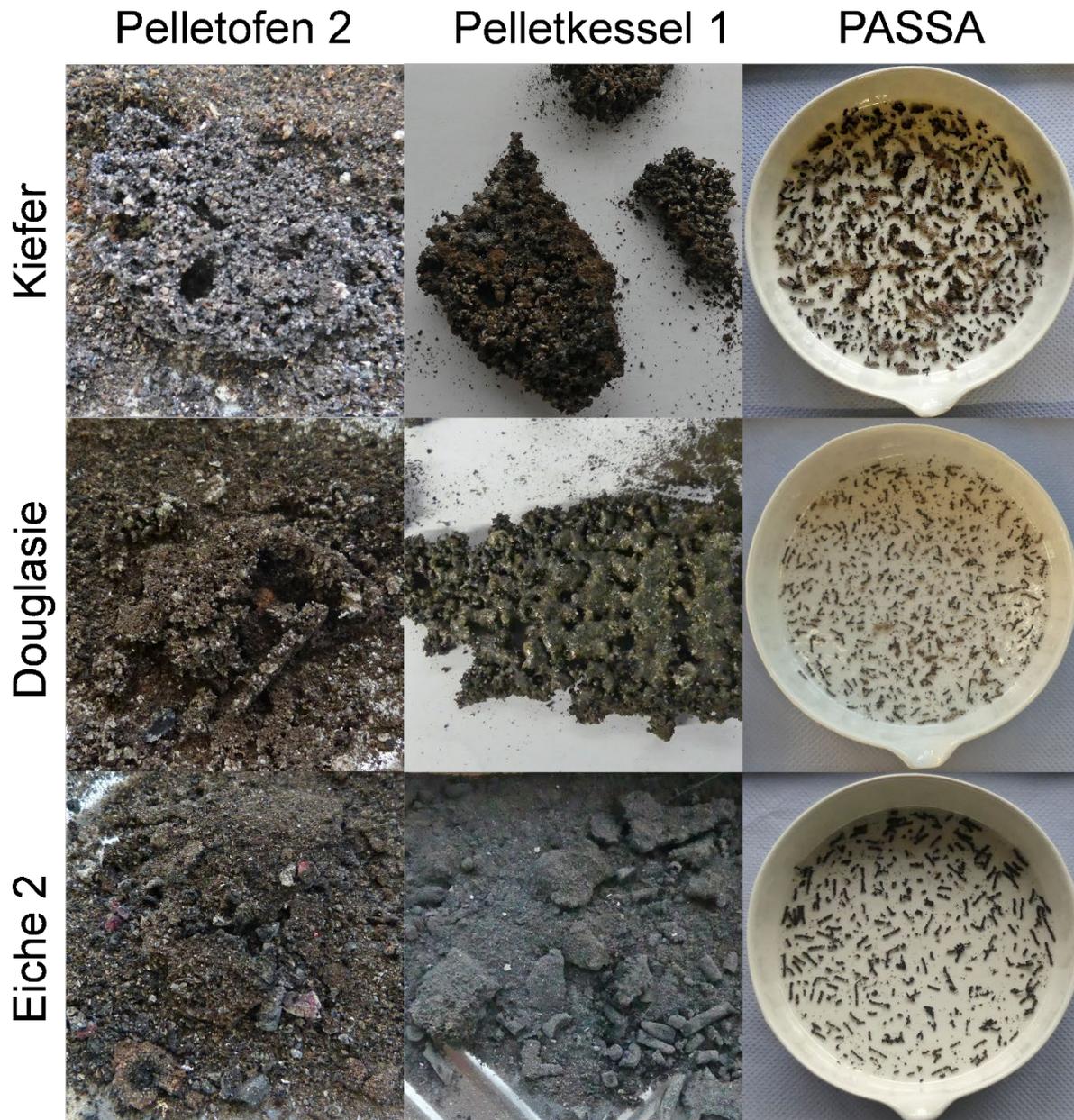


Abbildung 190: Gegenüberstellung der Verschlackungen der drei auffälligsten Holzarten (Kiefer, Douglasie und Eiche 2) für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 mit der PASSA-Methode

Die lineare Regression des Anteils an Partikeln > 2 mm vom berechneten Schlackeindex für die untersuchten Holzarten zeigt für die Verbrennungsrückstände von Pelletofen 2 ($R^2 = 0,88$) und Pelletkessel 1 ($R^2 = 0,62$) eine gute Übereinstimmung des aus der Elementaranalyse berechneten Schlackeindex mit den Anteilen an Partikeln > 2 mm. Für die PASSA-Methode ($R^2 = 0,01$) ist dies nicht der Fall. Für die Auswertung der Partikel > 1 mm (nicht dargestellt) wird für Pelletofen 2 ($R^2 = 0,69$), Pelletkessel 1 ($R^2 = 0,49$) und die PASSA-Methode ($R^2 = 1,45 \times 10^{-4}$) der Zusammenhang mit dem berechneten Schlackeindex schlechter. Dies deutet darauf hin, dass die Bewertung der Verschlackung besser anhand der gröberen Fraktion erfolgen sollte, zumal diese auch eher zu Störungen in der Feuerung führen können.

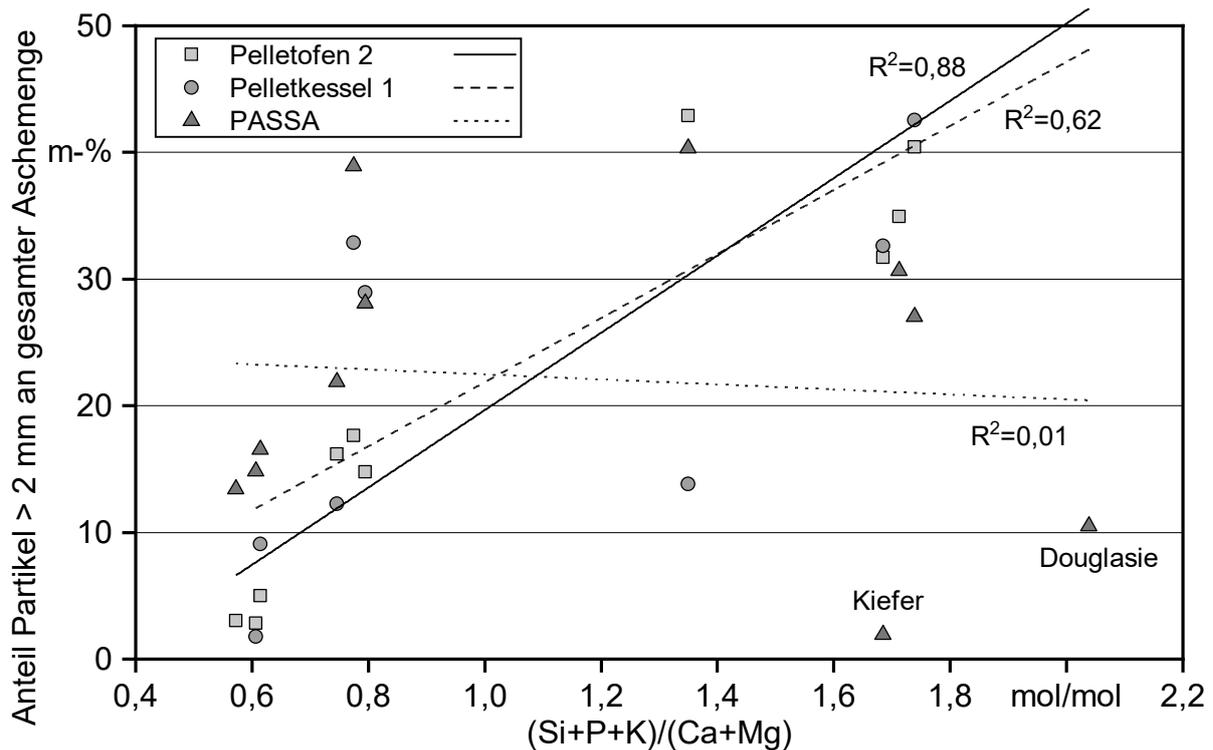


Abbildung 191: Abhängigkeit des Anteils an Partikeln > 2 mm vom Verschlackungsindex für die untersuchten Holzarten der Verbrennungsrückstände von Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 und der PASSA-Methode

7.2.6.5 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass bei vergleichbarem Rindenanteil und Siliziumgehalt Nadelholzpellets niedrigere gasförmige und Gesamtstaubemissionen verursachen als Laubholzpellets. Die höheren Gesamtstaubemissionen ergeben sich vor allem durch den höheren Gehalt an Aerosolbildnern bei den Laubhölzern. Die Emissionen an NO_x sind maßgeblich vom Stickstoffgehalt der jeweiligen Holzart beeinflusst. Auch der meist höhere Aschegehalt (Ausnahme Eiche) kann sich bei Laubhölzern negativ auf die Emissionen auswirken. Auch hinsichtlich der Verschlackung schneiden die Laubhölzer bei vergleichbarem Rindenanteil und Siliziumgehalt schlechter ab als die Nadelhölzer.

Ein höherer Rindenanteil führt bei Fichte ebenfalls zu höheren gasförmigen- und Gesamtstaubemissionen, kann sich aber positiv auf die Verschlackung auswirken. Ein höherer Siliziumgehalt bzw. ein höheres Si/K-Verhältnis hat einen deutlichen positiven Effekt auf die gasförmigen (CO -, org.-C-) und die Gesamtstaubemissionen, wirkt sich jedoch nachteilig auf die Verschlackung der Verbrennungsrückstände aus. Mit diesen Kenntnissen kann aber bei Typenprüfungen durch geschickte Auswahl siliziumreicher Brennstoffe kurzzeitig ein deutlich besseres Emissionsergebnis erzielt werden, da sich die Nachteile durch die Verschlackung erst bei einer längeren Betriebsdauer als der typischen Dauer einer Nenn- bzw. Teillastmessung während der Typenprüfung zeigen.

Die PASSA-Methode liefert keine befriedigenden Ergebnisse hinsichtlich der Vorhersage bzw. Bewertung des Verschlackungsverhaltens der Holzarten in realen Feuerungen. Sie

führt teilweise zur Überschätzung bei eigentlich unproblematischen Sortimenten sowie zu einer deutlichen Unterschätzung der tatsächlich problematischen Sortimente mit hohem Si-Gehalt. Es sollte überprüft werden, inwieweit sich z. B. durch Anpassung der Gasatmosphäre im Muffelofen die PASSA-Methode weiter optimieren lässt.

7.3 Korrelationen der Emissionen mit Brennstoffparametern unter Berücksichtigung der untersuchten Pelletsortimente

In den bisherigen Ausführungen wurden schon Zusammenhänge zwischen den Emissionen und den Brennstoffparametern hinsichtlich der jeweiligen speziellen Fragestellung des Abschnitts dargestellt. In diesem Unterkapitel soll statistisch überprüft werden, inwiefern sich gewisse Brennstoffparameter unter Berücksichtigung aller untersuchten Parameter auf die Emissionen der jeweiligen Feuerung bzw. den Feuerungstyp auswirken. Dazu wurden die Ergebnisse aller an einer Feuerung untersuchten Sortimente zusammengestellt und mithilfe der Pearson-Korrelation untersucht. Die Korrelation nach Pearson berechnet dabei den linearen Zusammenhang zweier intervallskaliertter Variablen. Ein positiver Pearson's-R-Wert bedeutet, dass eine Erhöhung der einen Variable zu einer Erhöhung der zweiten Variable führt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 erhält man durch Quadrieren des Pearson's-R-Werts. Aufgrund der statistisch gesehen geringen Stichprobenanzahl sowie der durch die Probennahme, Brennstoffanalytik und Emissionsmessung insgesamt relativ hohen Messungenauigkeiten wurden zwei Signifikanzniveaus ausgewertet. Als eher konservatives Signifikanzniveau wurde $p < 0,05$ und als eher progressives Signifikanzniveau wurde $p < 0,10$ gewählt. Außerdem wurden die mit Kaolin additivierten Brennstoffe und die Apfelpellets aus der Datenanalyse ausgeschlossen, um eine Verfälschung der statistischen Aussage durch z. B. die Wirkung des Kaolins bei gleichzeitig höherem Aschegehalt sowie den extremen Aschegehalt der Apfelpellets bei gleichzeitig sehr hohen Emissionen auszuschließen. Pelletkessel 2 wurde nicht betrachtet, da hier nur zwei Sortimente untersucht wurden. Die Stichprobenumfänge für die drei betrachteten Feuerungen sowie die Unterteilung der Stichproben in marktverfügbare Pellets und Versuchspellets sind in Tabelle 50 zusammengestellt.

Tabelle 50: Stichprobenumfang und Aufteilung der Stichproben für Pelletofen 1, Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Feuerung	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
marktverfügbare Holzpellets	22	28	8
Versuchspellets	0	22	13
gesamter Stichprobenumfang (n)	22	50	21

In der folgenden Diskussion werden nur Brennstoffparameter dargestellt, die mindestens für eine der untersuchten Feuerungen signifikante Korrelationen aufzeigen. Diese werden im Folgenden als „relevante“ Brennstoffparameter bezeichnet. Da die NO_x -Emissionen

maßgeblich durch den Stickstoffgehalt im Brennstoff beeinflusst werden, kommen diese in der folgenden Diskussion nicht mehr vor.

7.3.1 Einfluss der Brennstoffparameter auf die gasförmigen Emissionen

Korrelationen der CO-Emissionen mit den Brennstoffparametern. Die für mindestens eine Feuerung mit CO signifikant korrelierenden Brennstoffparameter sind in Tabelle 51 zusammengestellt. Die ersten drei Parameter (Schüttdichte, Energiedichte und Schüttungsporosität) sind stark voneinander abhängig und werden alle drei maßgeblich von der Länge der Pellets sowie der Partikeldichte beeinflusst. Für den Pelletkessel 1 zeigen sich signifikant ($p < 0,05$) negative Korrelationen der Schüttdichte und Energiedichte mit den CO-Emissionen, d. h., mit Zunahme der Schütt- und Energiedichte sinken die CO-Emissionen. Außerdem besteht eine positive Korrelation mit der Schüttungsporosität. Diese Korrelationen sind für die Pelletöfen nicht signifikant. Pelletofen 1 zeigt jedoch tendenziell eine positive Korrelation der Energiedichte mit den CO-Emissionen, die auch durch die Beobachtungen in Abschnitt 7.1.1 gestützt werden kann.

Der Feinanteil zeigt für alle drei Feuerungen eine signifikant positive Korrelation mit den CO-Emissionen und wirkt sich somit negativ aus. Für Pelletofen 1 zeigt sich auch eine signifikant negative Korrelation mit der mechanischen Festigkeit. Dies könnte eventuell darauf hinweisen, dass bei Pelletofen 1 eine stärkere mechanische Beanspruchung der Pellets beim Durchlaufen der Förderschnecke (nur für Pelletofen 2 untersucht) zu einer Erhöhung des Feinanteils führt. Der Feinanteil sollte bei einer höheren mechanischen Festigkeit geringer ausfallen.

Der Pelletkessel 1 zeigt in der Tendenz (nicht signifikant) auch eine negative Korrelation mit der mechanischen Festigkeit. Die mittlere Pelletlänge wirkt signifikant ($p < 0,05$) auf die CO-Emissionen von Pelletofen 1. Längere Pellets führen hier zu niedrigeren CO-Emissionen. Dies zeigt sich im Trend (nicht signifikant) und etwas abgeschwächt auch für Pelletofen 2. Der Massenanteil an Pellets < 10 mm zeigt für beide Pelletöfen einen signifikanten ($p < 0,05$) positiven Pearson's-R-Wert und beim Pelletkessel ist dies im Trend ebenfalls erkennbar (nicht signifikant). Die Ergebnisse der Pearson-Korrelationen zur mittleren Pelletlänge und dem Massenanteil an Pellets < 10 mm decken sich auch mit den Ergebnissen der gezielten Untersuchung zum Einfluss der Pelletlänge (Abschnitt 7.2.1.1).

Der mittels NIR-Analyse bestimmte Laubholzanteil ergibt für beide Pelletöfen unter der Verwendung des konservativen p-Werts signifikante ($p < 0,05$) positive Korrelationen mit den CO-Emissionen und für den Pelletkessel sind diese unter Anwendung des progressiven p-Werts ($p < 0,10$) ebenfalls signifikant. Der mit dem Laubholzanteil für die meisten Brennstoffe gut übereinstimmende Kaliumgehalt weist dagegen nur für die Pelletöfen signifikante Korrelationen auf, für den Pelletkessel gibt es auch für den progressiven p-Wert keine signifikante Korrelation, aber die Tendenz zeigt ebenfalls einen verstärkenden Effekt des Kaliumgehalts im Brennstoff auf die CO-Emissionen an. Das Si/K-Verhältnis wirkt nach der Pearson-Korrelation beim Pelletkessel signifikant dämpfend auf die CO-Emissionen. Im Trend ist dies auch für die Pelletöfen erkennbar und deckt sich mit den Beobachtungen zu den Holzarten in Abschnitt 7.2.6.1.

Wie der Laubholzanteil und der Kaliumgehalt sind auch der Karbonatanteil in der Asche und der Calciumgehalt im Brennstoff eng miteinander verknüpft. Daher weisen auch beide Parameter einen signifikant ($p < 0,05$) positiven R-Wert für die Pelletöfen und im Trend positiven R-Wert für den Pelletkessel auf. Dies deutet darauf hin, dass die Karbonatbildung bzw. die Karbonatschmelze einen Effekt auf den Glutbettaufbau bzw. Versinterung und damit auch die CO-Strähnenbildung oder Überdeckung von Sekundärluftdüsen haben könnte.

Tabelle 51: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den CO-Emissionen

Parameter	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Schüttdichte	-0,06	-0,09	-0,54
Energiedichte	0,19	-0,08	-0,51
Schüttungsporosität	0,09	-0,02	0,49
Feinanteil	0,56	0,28	0,51
Mechanische Festigkeit	-0,46	0,09	-0,25
Mittelwert Pelletlänge	-0,43	-0,23	0,06
Massenanteil Pellets < 10 mm	0,46	0,31	0,19
Laubholzanteil	0,51	0,62	0,39*
K-Gehalt	0,55	0,56	0,28
Si/K-Verhältnis	-0,26	-0,21	-0,44
Karbonatanteil	0,46	0,44	0,27
Ca-Gehalt	0,45	0,31	0,13

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant.

Korrelationen der org.-C-Emissionen mit den Brennstoffparametern. Die für mindestens eine Feuerung mit org.-C signifikant korrelierenden Brennstoffparameter sind in Tabelle 52 zusammengestellt. Generell scheinen bei den org.-C-Emissionen die Einflüsse der Brennstoffparameter wesentlich feuerungsspezifischer zu sein als bei den CO-Emissionen. Während sich bei Pelletofen 2 ein signifikant ($p < 0,05$) dämpfender Effekt der Partikeldichte auf die org.-C-Emissionen zeigt, bewirken steigende Energiedichten bei Pelletofen 1 im Trend (nicht signifikant) genau das Gegenteil. Ebenso führen bei Pelletofen 1 unter Verwendung des progressiveren p-Werts ($p < 0,10$) steigende Energiedichten zu höheren org.-C-Emissionen, während sich dies im Trend (nicht signifikant) für Pelletofen 2 entgegengesetzt verhält. Die Pellethärte wirkt sich bei Pelletofen 2 signifikant ($p < 0,05$) verstärkend aus, hat bei Pelletofen 1 aber keinen erkennbaren Einfluss. Dasselbe gilt für den Laubholzanteil, den Kaliumgehalt im Brennstoff und den Karbonatanteil in der Asche. Für beide Pelletöfen ergibt sich eine signifikante Korrelation mit den CO-Emissionen, das deckt sich mit den Beobachtungen bei den marktverfügbaren Holzpellets. Pelletkessel 1

ist zur Information mit enthalten, weist aber keine signifikanten Korrelationen zu den untersuchten Brennstoffparametern auf und wird aufgrund der sehr niedrigen org.-C-Emissionen und der damit verbundenen Unsicherheiten nicht mitdiskutiert.

Tabelle 52: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den org.-C-Emissionen

Parameter	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Partikeldichte	0,24	-0,29	-0,06
Energiedichte	0,40*	-0,13	0,28
Pellethärte	-0,06	0,40	0,01
Laubholzanteil	-0,15	0,49	-0,16
K-Gehalt	-0,08	0,42	-0,15
Karbonatanteil	-0,11	0,33	0,22
CO-Gehalt im Abgas	0,68	0,83	-0,15

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant.

7.3.2 Einfluss der Brennstoffparameter auf die Gesamtstaubemissionen und deren Zusammensetzung

Korrelationen der Gesamtstaubemissionen mit den Brennstoffparametern. Die für mindestens eine Feuerung mit den Gesamtstaubemissionen signifikant korrelierenden Brennstoffparameter sind in Tabelle 53 zusammengestellt. Die drei untersuchten Feuerungen reagierten sehr unterschiedlich auf die Energiedichte. Während eine erhöhte Energiedichte bei Pelletofen 1 die Gesamtstaubemissionen signifikant ($p < 0,05$) ansteigen lässt, scheint dies bei Pelletofen 2 keinen Einfluss zu haben. Bei Pelletkessel 1 hingegen führt eine höhere Energiedichte sogar zu einer signifikanten Abnahme der Gesamtstaubemissionen, wenn man den progressiveren p-Wert von 0,10 ansetzt. Dies könnte mit der Leistungsregelung zusammenhängen, die bei Pelletofen 1 gar nicht, bei Pelletofen 2 sehr eingeschränkt und bei Pelletkessel 1 ausgereifter ist. Dadurch hat eine steigende Energiedichte bei diesen drei Feuerungen wahrscheinlich auch so unterschiedliche Effekte.

Der Laubholzanteil und der Kaliumgehalt im Brennstoff haben bei Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 einen signifikanten ($p < 0,05$) Einfluss auf die Gesamtstaubemissionen, während dieser Effekt für Pelletofen 1 vermutlich durch den hohen Anteil an Partikeln aus unvollständiger Verbrennung (nicht untersucht für Pelletofen 1) nur geringfügig ausgeprägt und nicht signifikant ist.

Das Si/K-Verhältnis zeigt für Pelletkessel 1 eine signifikant ($p < 0,05$) reduzierende Wirkung auf die Gesamtstaubemissionen. Für die Pelletöfen zeigt sich diese im Trend (nicht signifikant) in abgeschwächter Form. Dies deckt sich mit den Beobachtungen für Pellet-

ofen 2 in Abschnitt 7.2.6, wonach der Effekt des Si/K-Verhältnisses auf die Gesamtstaubemissionen vermutlich von Rußemissionen überlagert wird.

Der Karbonatanteil in der Asche zeigt für Pelletofen 2 einen signifikanten ($p < 0,05$) Einfluss auf die Gesamtstaubemissionen (erhöhend). Für den Pelletkessel ist dieser Effekt im Trend auch erkennbar, für Pelletofen 1 nur sehr schwach, aber in dieselbe Richtung weisend. Alle drei Feuerungen zeigen wie auch bei org.-C eine signifikante ($p < 0,05$) Korrelation der Gesamtstaubemissionen mit den CO-Emissionen.

Tabelle 53: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den Gesamtstaubemissionen

Parameter	Pelletofen 1	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Energiedichte	0,42	0,03	-0,43*
Laubholzanteil	0,13	0,62	0,69
K-Gehalt	0,11	0,53	0,49
Si/K-Verhältnis	-0,16	-0,16	-0,48
Karbonatanteil	0,10	0,35	0,34
CO-Gehalt im Abgas	0,74	0,89	0,66

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant

Korrelationen der Staubemissionen, unterteilt in IC, EC, OC und Salze und Oxide mit den Brennstoffparametern. Die Filterstäube wurden wie schon beschrieben aufgrund der bei Pelletofen 1 vorgeschalteten Filterhülsen nur für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1 mit dem Kohlenstoffanalysator (LECO, RC 612) untersucht. Daher können für Pelletofen 1 keine Korrelationen zu den unterschiedlichen Bestandteilen des Gesamtstaubs berechnet werden.

Die für mindestens eine Feuerung mit den **IC-Emissionen** signifikant korrelierenden Brennstoffparameter sind in Tabelle 54 zusammengestellt. Bei IC (anorganisch gebundener Kohlenstoff) handelt es sich wie bereits erwähnt höchstwahrscheinlich um Karbonate (z. B. CaCO_3 und K_2CO_3), die sich während der Verbrennung im Glutbett bilden und dann mit dem Abgasstrom mitgerissen werden. Die IC-Emissionen (d. h. Anteil IC \times Gesamtstaubemissionen) sind demnach ein Indiz dafür, wie stark bei einem Sortiment Aschepartikel mitgerissen werden.

Pelletkessel 1 zeigt bei Verwendung des progressiven p-Werts ($p < 0,10$) einen signifikant negativen R-Wert zur Energiedichte. Für Pelletofen 2 ist dies nicht der Fall und der R-Wert ist hier sogar im Trend (nicht signifikant) positiv, aber mit 0,12 sehr niedrig. Dies deckt sich wieder mit den bereits häufiger genannten Vermutungen, dass sich die Energiedichte aufgrund der fortschrittlicheren Leistungsregelung beim Pelletkessel anders auswirkt als bei den eher rudimentären (Pelletofen 2) bis gar nicht vorhandenen (Pelletofen 1) Leistungs-

regelungen der Pelletöfen. Dadurch wird beim Pelletkessel bei gleicher Leistungsabgabe und einer höheren Energiedichte in Bezug auf die Rostfläche bzw. das Brennraumvolumen weniger Brennstoffvolumen eingetragen, wodurch vermutlich auch das Glutbett niedriger ist und damit auch das Risiko sinkt, dass Aschepartikel mit dem Abgasstrom ausge-tragen werden.

Bei Pelletofen 2 wirkt sich eine hohe Schüttungsporosität signifikant reduzierend auf die IC-Emissionen aus. Dies hängt vermutlich stark damit zusammen, dass die Schüttungs-porosität und der Druckverlust über dem Glutbett zusammenhängen (Abschnitt 7.2.1). Ein höherer Druckverlust (bei niedriger Schüttungs-porosität) bzw. enge Strömungskanäle im Glutbett mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten begünstigen das Mitreißen von Asche-partikeln aus dem Glutbett. Im Gegensatz zu dem nach dem Abwurfprinzip mit Brennertopf arbeitenden Pelletofen scheint die Schüttungs-porosität beim Pelletkessel mit seitlichem Einschub im Trend (nicht signifikant) einen genau gegenläufigen Effekt zu haben.

Der Laubholzanteil wirkt für Pelletofen 2 mit $p < 0,05$ und für Pelletkessel 1 mit $p < 0,10$ jeweils signifikant erhöhend auf die IC-Emissionen, beim Kaliumgehalt gilt dies aber nur für den Pelletofen 2. Außerdem scheinen beim Pelletofen der Aschegehalt, der Karbonatanteil in der Asche sowie der Calciumgehalt im Brennstoff signifikant die IC-Emissi-onen zu erhöhen, während diese Parameter bei Pelletkessel 1 keinen signifikanten Ein-fluss haben. Alle drei Parameter beeinflussen beim Pelletofen sehr wahrscheinlich die Höhe des Glutbetts bzw. den Anstieg des Glutbetts über die Zeit. Beim Pelletkessel ist hier lediglich für den Karbonatanteil in der Asche im Trend ein leichter Effekt erkennbar (nicht signifikant). Für beide Feuerungen zeigt sich wieder eine signifikante Korrelation der IC-Emissionen mit den CO-Emissionen.

Tabelle 54: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brenn-stoffparameter mit den IC-Emissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Parameter	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Energiedichte	0,12	-0,39*
Schüttungs-porosität	-0,33	0,28
Laubholzanteil	0,37	0,44*
K-Gehalt	0,50	0,14
Aschegehalt	0,35	-0,03
Karbonatanteil	0,43	0,19
Ca-Gehalt	0,32	0,09
CO-Gehalt im Abgas	0,43	0,85

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant.

Die für mindestens eine Feuerung mit den **EC-Emissionen** signifikant korrelierenden Brennstoffparameter sind in Tabelle 55 zusammengestellt. Generell sind die EC-Emissionen bzw. der Anteil von EC an den Gesamtstaubemissionen für den Pelletkessel wesentlich niedriger als für den Pelletofen (Abschnitte 7.1.3 bis 7.2.6.3). Für Pelletofen 2 führt gemäß Korrelation ein hoher Heizwert zu signifikant höheren EC-Emissionen (vermutlich Ruß), während dies für Pelletkessel 1 nicht signifikant ist. Dies kann bei einer nicht ausreichenden Leistungsregelung dadurch erklärt werden, dass der Energiegehalt des Brennstoffs nicht der voreingestellten Luftmenge entspricht und so ein Überangebot an brennbaren Substanzen (z. B. CO) vorliegt, die dann z. B. als Ruß mit dem Abgasstrom ausgebracht werden.

Längere Pellets lassen bei Pelletofen 2 die EC-Emissionen signifikant sinken ($p < 0,05$), für Pelletkessel 1 ist dies nicht signifikant aber im Trend erkennbar. Die Korrelation der EC-Emissionen mit der mittleren Pelletlänge deckt sich mit der Korrelation für die Pelletlänge mit den CO-Emissionen (Pelletofen 1 signifikant, Pelletofen 2 im Trend). CO und Ruß entstehen bei unvollständiger Verbrennung. Ruß wird auch teilweise aus CO gebildet, sodass eine Korrelation zwischen CO und EC plausibel erscheint [52]. Der Laubholzanteil sowie der Kaliumgehalt im Brennstoff wirken sich bei Pelletkessel 1 signifikant ($p < 0,05$) dämpfend auf die EC-Emissionen aus. Für Pelletofen 2 ist dies für den Laubholzanteil nicht signifikant und für den Kaliumgehalt nur mit dem progressiveren p-Wert von 0,10 signifikant. Außerdem sind die Korrelationskoeffizienten nur etwa halb so hoch wie beim Pelletkessel.

Das Si/K-Verhältnis wirkt sich vermutlich aufgrund des Einflusses auf das Verschlackungsverhalten für Pelletkessel 1 signifikant ($p < 0,05$) auf die EC-Emissionen aus. Beim Pelletofen ist dieser Effekt vermutlich aufgrund der niedrigeren Temperaturen nicht signifikant. Pelletofen 2 zeigt einen signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) zwischen den CO-Emissionen und den EC-Emissionen, beim Pelletkessel ist der R-Wert zwar höher, aber nicht signifikant.

Tabelle 55: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den EC-Emissionen für Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Parameter	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Heizwert	0,31	0,20
Mittelwert Pelletlänge	-0,28	-0,17
Laubholzanteil	-0,20	-0,52
K-Gehalt	-0,24*	-0,51
Si/K-Verhältnis	0,12	0,57
CO-Gehalt im Abgas	0,35	0,82

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant.

Tabelle 56 zeigt die für mindestens eine Feuerung signifikanten Pearson-Korrelationskoeffizienten der partikelgebundenen **OC-Emissionen** mit den jeweiligen Brennstoffparametern. Pelletofen 2 zeigt hier eine signifikante ($p < 0,05$) dämpfende Wirkung der Partikeldichte auf die OC-Emissionen, die für Pelletkessel 1 im Trend (nicht signifikant) ebenfalls erkennbar ist. Der Laubholzanteil und der Kaliumgehalt des Brennstoffs wirken signifikant ($p < 0,05$) in gleichem Maße ($R = 0,60$) verstärkend auf die OC-Emissionen bei Pelletofen 2. Bei Pelletkessel 1 gilt dies nur für den Laubholzanteil unter Annahme des progressiveren p-Werts. Der Aschegehalt, der Karbonatanteil sowie der Calcium- und Magnesiumgehalt des Brennstoffs wirken bei Pelletofen 2 alle signifikant verstärkend auf die OC-Emissionen, während dies für Pelletkessel 1 nicht zu erkennen ist, auch nicht im Trend. Alle diese Faktoren dürften hier vermutlich bei Pelletofen 2 den Anstieg des Glutbetts und das Ascheschmelzverhalten beeinflussen, wobei der Karbonatanteil den höchsten Korrelationskoeffizienten mit den OC-Emissionen liefert. Auch die partikelgebundenen OC-Emissionen zeigen eine positive (verstärkende) Korrelation mit den CO-Emissionen.

Tabelle 56: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den OC-Emissionen Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Parameter	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Partikeldichte	-0,34	-0,21
Laubholzanteil	0,60	0,43*
K-Gehalt	0,60	0,09
Aschegehalt	0,39	-0,12
Karbonatanteil	0,43	0,09
Ca-Gehalt	0,34	-0,03
Mg-Gehalt	0,34	-0,15
CO-Gehalt im Abgas	0,63	0,82

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant.

Der verbleibende Rest der Gesamtstaubemissionen nach Abzug des Anteils an IC, EC und OC wird hier als **Salze und Oxide** bezeichnet, da es sich größtenteils um die Aerosole aus Kalium, Natrium, Zink und Blei (z. B. KCl, KOH, K_2SO_4) handelt. Die für mindestens eine Feuerung signifikanten Korrelationskoeffizienten der Salze und Oxide mit den jeweiligen Brennstoffparametern zeigt Tabelle 57. Während der Pelletkessel 1 auf den durch die Schüttdichte bzw. Partikeldichte ($p < 0,10$) oder durch die Energiedichte ($p < 0,05$) beschriebenen Energieeintrag signifikant mit niedrigeren Anteilen an Salzen und Oxiden bei den Staubemissionen reagiert, ist dies für Pelletofen 2 nicht der Fall. Für den Pelletofen ist dies nur in abgeschwächter Form im Trend (nicht signifikant) für die Partikeldichte und die Energiedichte erkennbar.

Der Laubholzanteil und der Kaliumgehalt im Brennstoff wirken für beide Feuerungen signifikant ($p < 0,05$) verstärkend auf die Salze und Oxide der Staubemissionen, da diese auch zum Großteil aus Kalium bestehen, das in Laubholz meist in höheren Anteilen vorkommt als in Nadelholz. Beim Pelletofen scheint die Umsetzung des Kaliums bzw. der Aerosolbildner zu den Salzen und Oxiden etwas stärker abzulaufen als bei Pelletkessel 1, da vermutlich eine etwas höhere Einbindung in die Asche oder Abscheidung am Wärmetauscher stattfindet.

Das Si/K-Verhältnis wirkt für beide Feuerungen signifikant ($p < 0,05$) auf die Salze und Oxide der Staubemissionen, beim Pelletkessel ca. doppelt so stark wie beim Pelletofen. Der Karbonatanteil wirkt ebenfalls bei beiden Feuerungen signifikant ($p < 0,05$) erhöhend auf die Emissionen an Salzen und Oxiden, da der Karbonatanteil auch signifikant mit dem Kaliumgehalt korreliert ist (nicht dargestellt).

Interessanterweise wirkt nach der statistischen Auswertung der Stärkegehalt in den Pellets durch Bindemittel beim Pelletofen signifikant ($p < 0,05$) auf die Salze und Oxide der Staubemissionen, nicht aber beim Pelletkessel 1. Dies konnte auch bei den Untersuchungen zum Einfluss der Additive für weizenstärkehaltiges Mehl beobachtet werden. Insgesamt kamen bei Pelletofen 2 wesentlich mehr Sortimente mit bekanntem Stärkegehalt zum Einsatz als bei Pelletkessel 1. Auch für die Salze und Oxide der Stäube zeigt sich eine signifikante Korrelation mit den CO-Emissionen für beide Feuerungen.

Tabelle 57: Korrelationskoeffizienten für die Pearson-Korrelation relevanter Brennstoffparameter mit den Salzen und Oxiden Staubemissionen Pelletofen 2 und Pelletkessel 1

Parameter	Pelletofen 2	Pelletkessel 1
Schüttdichte	-0,09	-0,41*
Partikeldichte	-0,16	-0,45*
Energiedichte	-0,15	-0,48
Laubholzanteil	0,78	0,68
K-Gehalt	0,68	0,54
Si/K-Verhältnis	-0,29	-0,62
Karbonatanteil	0,40	0,54
Stärkegehalt	-0,26	-0,03
CO-Gehalt im Abgas	0,64	0,89

Fett gedruckte Korrelationskoeffizienten (ohne Stern) sind bei $p < 0,05$ signifikant. **Fett** gedruckte Korrelationskoeffizienten mit * sind bei $p < 0,10$ signifikant.

7.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Eine Übersicht über die in den beiden vorherigen Abschnitten beschriebenen Korrelationen der Emissionen mit den Brennstoffparametern ist in Form einer Matrix in Tabelle 58 zusammengefasst. Dabei wird zwischen Pelletöfen ($n = 2$) und dem Pelletkessel ($n = 1$) unterschieden. Die Brennstoffparameter sind hierarchisch nach ihrer Relevanz von oben nach unten sortiert. Ein „+“ bedeutet, dass bei einer Erhöhung des Brennstoffparameters eine Erhöhung der jeweiligen Emission eintritt, ein „-“ bedeutet ein Absinken und „±“ steht für eine uneinheitliche gegensätzliche Wirkung bei den beiden Pelletöfen. Die dargestellte Matrix verdeutlicht, wie stark feuerungsspezifisch der Einfluss des jeweiligen Brennstoffparameters hinsichtlich der Feuerungsart (Pelletofen oder Pelletkessel), aber auch hinsichtlich der Feuerraum- oder Brennertopfgeometrie (Pelletöfen, z. B. Energiedichte) ist. Dieser Umstand zeigt gerade bei den Pelletöfen die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen an mehreren unterschiedlichen Pelletöfen auf, um hier eine belastbare Datenbasis zu schaffen. Außerdem wird aus Tabelle 58 ersichtlich, dass moderne Pelletkessel wesentlich unempfindlicher auf die meisten Brennstoffparameter reagieren als Pelletöfen.

Die wichtigsten Brennstoffparameter mit dem größten Einfluss auf die Emissionen sind demnach

- der Kaliumgehalt bzw. der Laubholzanteil,
- der Karbonatanteil in der Asche,
- die Energiedichte sowie
- das Si/K-Verhältnis bzw. der Siliziumgehalt im Brennstoff.

Auf Laborebene kann der Laubholzanteil mittels NIR-Analyse bestimmt werden, die Bestimmung der Energiedichte befindet sich aktuell in der Entwicklung. Eine Schnellbestimmung von Kalium und Silizium wäre ebenfalls sinnvoll, möglicherweise könnte dies mittels RFA erfolgen, hierzu läuft u. a. am TFZ derzeit ein anderes Forschungsprojekt. Deutlich geringere Auswirkungen auf das Emissionsverhalten haben die bereits in der Pelletnorm reglementierten Brennstoffparameter wie die Pelletlänge, der Aschegehalt, der Feinanteil und der Heizwert. Kürzlich wurden auch Partikeldichte und Massenanteil der Pellets < 10 mm in die bestehende Normung – zunächst nur informativ – aufgenommen [43].

Des Weiteren ergab sich bei allen hier untersuchten Emissionen eine signifikante Korrelation mit den CO-Emissionen. Der Einsatz geeigneter CO-Sensoren könnte daher besonders für Pelletöfen einen Vorteil für die Optimierung der Regelung im Hinblick auf die Brennstoffflexibilität bringen.

Tabelle 58: Aus der statistischen Auswertung erstellte Matrix zur Bedeutung des Einflusses relevanter Brennstoffparameter (bei Anstieg) und dessen Wirkungsrichtung auf den jeweils identifizierten Emissionsparameter

Brennstoffparameter	Emissionsparameter bei Pelletöfen	Emissionsparameter beim Pelletkessel
Kaliumgehalt	+IC/+OC/+Salze und Oxide/+CO/ +org.-C/+Gesamtstaub	-EC/+Salze und Oxide/ +Gesamtstaub
Laubholzanteil	+IC/+OC/+Salze und Oxide/+CO/ +org.-C/+Gesamtstaub	-EC/+Salze und Oxide/ +Gesamtstaub
Karbonatanteil	+OC/+Salze und Oxide/+CO/ +Gesamtstaub	+Salze und Oxide/+CO - CO/-Gesamtstaub/-IC/ -Salze und Oxide
Energiedichte	±org.-C/+Gesamtstaub	+EC/-Salze und Oxide/-CO/-Gesamtstaub
Si/K-Verhältnis	-Salze und Oxide	kein Einfluss
Ca-Gehalt	+IC/+OC/+CO	kein Einfluss
Partikeldichte	-OC/-org.-C	kein Einfluss
Mittelwert Pelletlänge	-EC/-CO	kein Einfluss
Aschegehalt	+IC/+OC	kein Einfluss
Feinanteil	+CO	+CO
Schüttdichte	kein Einfluss	-CO
Heizwert	+EC	kein Einfluss
Pellethärte	±org.-C	kein Einfluss
Massenanteil Pellets <10 mm	+ CO	kein Einfluss
Schüttungsporosität	-IC	+CO
Magnesiumgehalt	+OC	kein Einfluss

7.4 Langzeitmessungen mit ausgewählten Brennstoffen

Um mögliche Effekte auf die Emissionen, die z. B. durch das Ascheschmelzverhalten verursacht sind und sich möglicherweise erst nach längerem Feuerungsbetrieb zeigen, zu ermitteln, wurden ausgewählte Sortimente über einen Zeitraum von 8 h und teilweise 24 h in einem Langzeitversuch untersucht. Dafür wurden bei Pelletöfen 2 aus den marktverfügbaren Holzpellets die Sortimente 16 (bekannte Rohstoffqualität) und 24 (bei Privatpersonen auffällig durch Schlackebildung) und von den Versuchspellets Lärche (aufgrund der Ergebnisse der Laborreaktorversuche und des erhöhten Si-Gehalts) und Fichte mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität (für die Untersuchung des erhöhten Stärkegehalts bei längerem Betrieb) ausgewählt. Nach Auswertung der Messungen wurde nur Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets aufgrund der Auffälligkeiten an Pelletöfen 2 auch in Pelletkessel 1 über 24 h verbrannt. Die restlichen Messungen an Pelletkessel 1 liefen immer mindestens über 6 h, daher waren 8-h-Versuche hier nicht weiter zielführend, da nach ca. 6 h beim Pelletkessel 1 die Rostreinigung und somit ein Aufbrechen der Asche/Schlacke auf dem Rost stattfindet. Während der Langzeitmessungen wurden teilweise Staubabsaugungen mit einem Defekt der Gasuhren verwendet. Die absoluten

Messwerte dürfen daher nur untereinander und nicht mit den Messungen in den vorherigen Kapiteln verglichen werden, da die hier dargestellten Staubemissionswerte deutlich zu hoch sind. Zur Untersuchung der Trends innerhalb der Langzeitmessungen bleiben diese Messdaten jedoch trotzdem aussagekräftig.

7.4.1 Entwicklung der Emissionen über die Betriebsdauer

Bei dem Langzeitversuch über 8 h mit Pelletsortiment 16 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2 zeigen sich innerhalb der ersten Betriebsstunde (Aufheizphase) etwas höhere Emissionen an CO und org. C sowie eine niedrigere Brennraumtemperatur, NO_x-Emissionen und Druckverlust über das Glutbett (siehe Abbildung 192). Nach der ersten Stunde ist der Brennraum auf Betriebstemperatur und diese nimmt über die nächsten 7 h um 11 K langsam zu und fällt in der letzten Stunde wieder etwas ab. Die CO-Emissionen sinken nach dem Aufheizen innerhalb der ersten drei Stunden von 164 mg/Nm³ auf 103 mg/Nm³ ab und nehmen dann mit der Messdauer diskontinuierlich bis auf 190 mg/Nm³ zu. Die org.-C-Emissionen bleiben nach der Aufheizphase mit 11 mg/Nm³ auf einem niedrigen Niveau von 2 bis 4 mg/Nm³ über die gesamte Messdauer. Bei den NO_x-Emissionen erfolgt von der ersten Betriebsstunde mit 121 mg/Nm³ ein Anstieg auf 142 mg/Nm³ während der zweiten Betriebsstunde. Danach fallen die NO_x-Emissionen leicht ab und bleiben ab ca. der fünften Betriebsstunde konstant bei 134–135 mg/Nm³. Der Druckverlust über das Glutbett steigt innerhalb der ersten vier Betriebsstunden von 26 Pa auf 31 Pa an und bleibt dann näherungsweise konstant. Die Gesamtstaubemissionen wurden einmal in der zweiten Betriebsstunde und einmal während der achten Betriebsstunde (je mittels fünf Einzelmessungen à 14 min) bestimmt. Von der zweiten Betriebsstunde mit 26 mg/Nm³ steigen die Gesamtstaubemissionen zur achten Betriebsstunde mit 41 mg/Nm³ um etwa 58 % an.

Die Trends der CO- und Gesamtstaubemissionen sowie der Druckverlust über das Glutbett deuten auf einen kontinuierlichen Aufbau des Glutbett bzw. Asche oder von Verschläckungen bzw. Versinterungen hin.

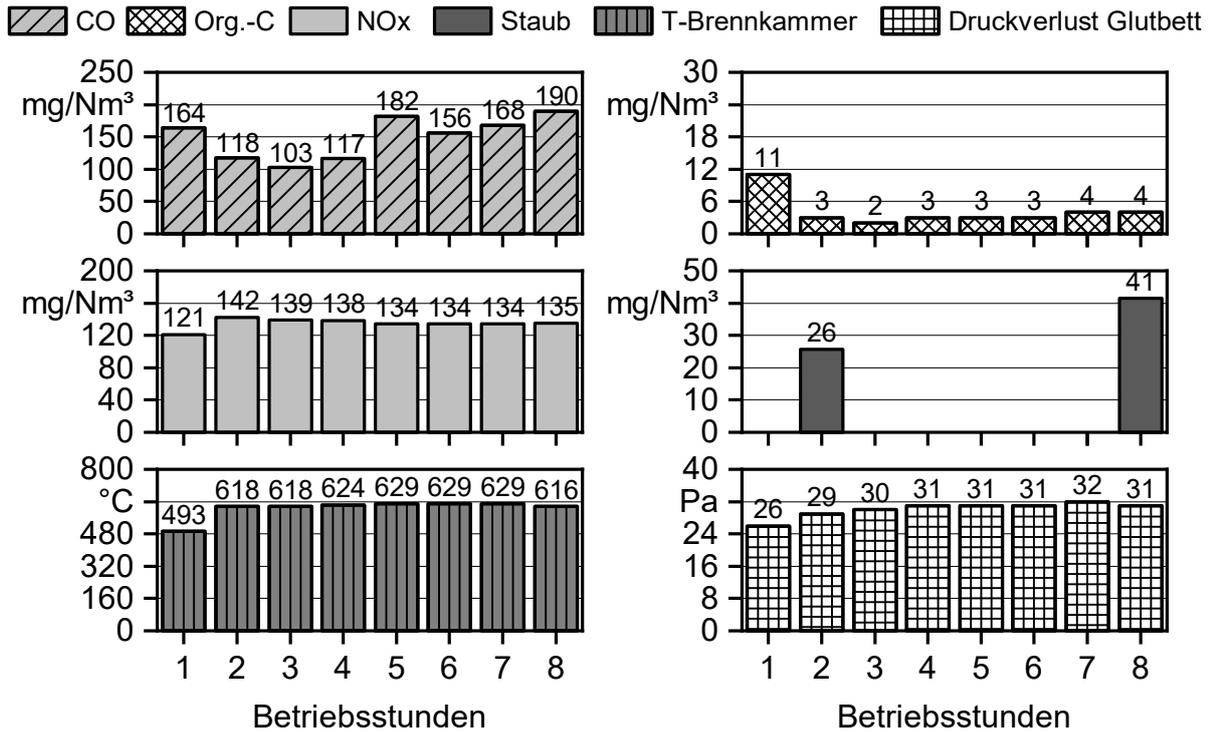


Abbildung 192: Zeitlicher Verlauf über CO, Org.-C, NO_x, Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Sortiment 16 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2

Bei Sortiment 24 wurde die Langzeitmessung wie schon erwähnt über 24 h durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 193 dargestellt. Während der Aufheizphase in der ersten Betriebsstunde liegt im Mittel CO bei ca. 260 mg/Nm³, org.-C bei 15 mg/Nm³, NO_x bei ca. 174 mg/Nm³, die Brennraumtemperatur bei 557 °C und der Druckverlust über das Glutbett bei 25 Pa. Das Minimum der CO- und org.-C-Emissionen wird in der dritten Betriebsstunde mit 207 mg/Nm³ bzw. 3 mg/Nm³ erreicht, während die NO_x-Emissionen ihr Maximum mit 204 mg/Nm³ in der zweiten Betriebsstunde erreichen. Gesamtstaubmessungen fanden nur in der zweiten, der achten und der 24. Betriebsstunde statt, die niedrigsten Gesamtstaubemissionen wurden in der zweiten Betriebsstunde mit 33 mg/Nm³ gemessen. Aufgrund der etwas niedrigeren CO- und org.-C-Emissionen in Betriebsstunde 3 ist davon auszugehen, dass wahrscheinlich das Optimum der Gesamtstaubemissionen ebenfalls in der dritten Betriebsstunde liegt. Die CO- und org.-C-Emissionen steigen diskontinuierlich innerhalb der 24-h-Messung an. Das Maximum ergibt sich hier in Betriebsstunde 22 mit 436 mg/Nm³ für CO und 8 mg/Nm³ für org.-C. Die Gesamtstaubemissionen steigen von der zweiten zur achten Betriebsstunde um ca. 58 % auf 52 mg/Nm³ deutlich an. Danach ist zu Betriebsstunde 24 lediglich ein schwacher weiterer Anstieg bis auf 55 mg/Nm³ zu beobachten. Aufgrund der dort höheren gasförmigen Emissionen könnte das Maximum der Gesamtstaubemissionen ebenfalls in Betriebsstunde 22 liegen. Die NO_x-Emissionen fallen von der zweiten zur 13. Betriebsstunde kontinuierlich ab auf 180 mg/Nm³ und steigen dann wieder leicht bis auf 198 mg/Nm³ in der 24. Betriebsstunde an. Die Brennraumtemperatur steigt etwa bis in die achte Betriebsstunde auf 694 °C und sinkt dann wieder nahezu kontinuierlich auf 679 °C in der 24. Betriebsstunde. Der Druckverlust steigt von

Anfang bis Ende auf ca. 34 Pa an. Dies deutet wieder auf einen Aufbau der Ascheschicht bzw. Versinterungen hin.

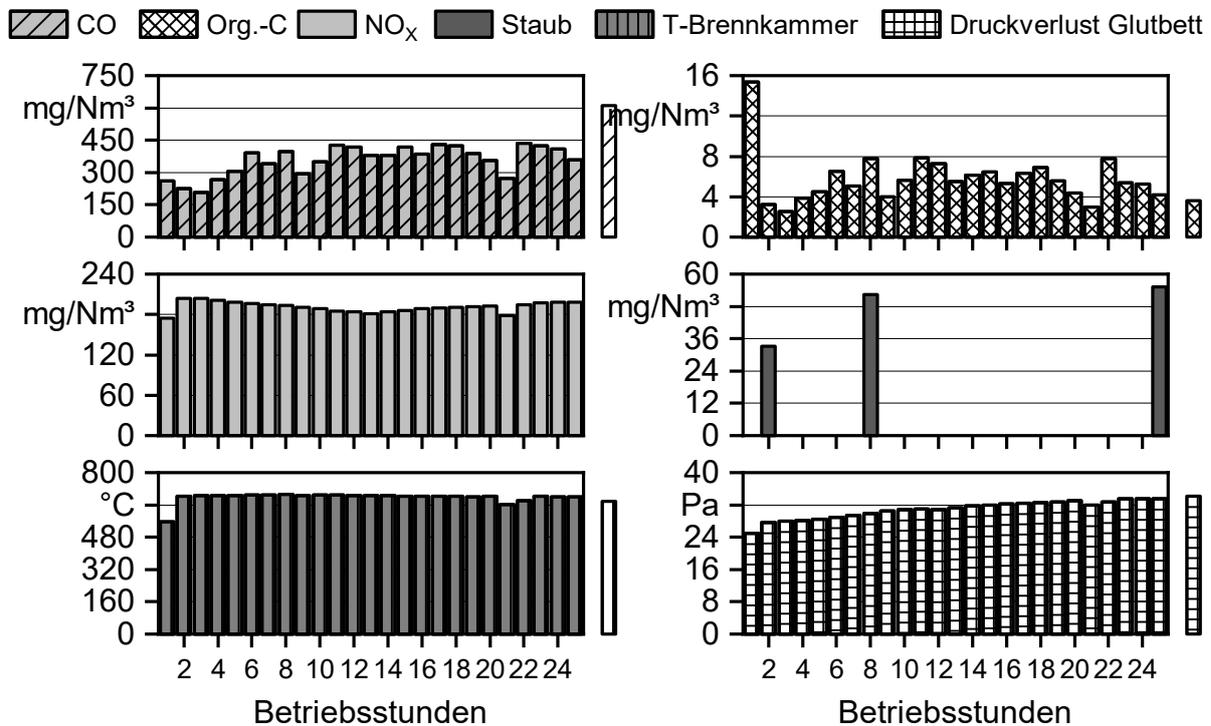


Abbildung 193: Zeitlicher Verlauf über CO, org.-C, NO_x, Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2

Die Langzeitmessung der Lärchenpellets (Abbildung 194) zeigt sich im Langzeitversuch über 8 h im Pelletofen 2 als äußerst unauffällig. In der Aufheizphase sind CO- (245 mg/Nm³) und org.-C-Emissionen (24 mg/Nm³) wieder deutlich erhöht. Das Minimum der CO-Emissionen wird in der zweiten Betriebsstunde mit 110 mg/Nm³ erreicht. Diese steigen nahezu kontinuierlich bis zur achten Betriebsstunde leicht an auf 136 mg/Nm³. Die org.-C-Emissionen sind von der zweiten zur achten Betriebsstunde auf einem sehr konstanten Niveau von 2 bis 3 mg/Nm³. Die Gesamtstaubemissionen sind von der zweiten Betriebsstunde mit 37 mg/Nm³ bis zur achten Betriebsstunde mit 38 mg/Nm³ im Rahmen der Messgenauigkeit als konstant anzusehen. Aufgrund des niedrigen Stickstoffgehalts der Lärche liegen die NO_x-Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Sie steigen von Anfang (66 mg/Nm³) zum Ende (91 mg/Nm³) um etwa ein Drittel an. Anders als bei den anderen Brennstoffen im Langzeittest fallen sie jedoch nicht nach einem ersten Anstieg wieder ab, sondern steigen konstant über acht Stunden. Die Brennraumtemperatur steigt ebenfalls über die gesamte Messdauer von 434 °C auf 596 °C an und liegt insgesamt deutlich niedriger als für Sortiment 16 oder 24. Der Druckverlust steigt innerhalb der ersten drei Betriebsstunden von 23 Pa auf 25 Pa geringfügig an und bleibt dann aber anders als bei den bisherigen Langzeitversuchen konstant. Es scheint hier weder zu einem Aufbau einer Ascheschicht zu kommen noch eine Versinterungsproblematik zu bestehen.

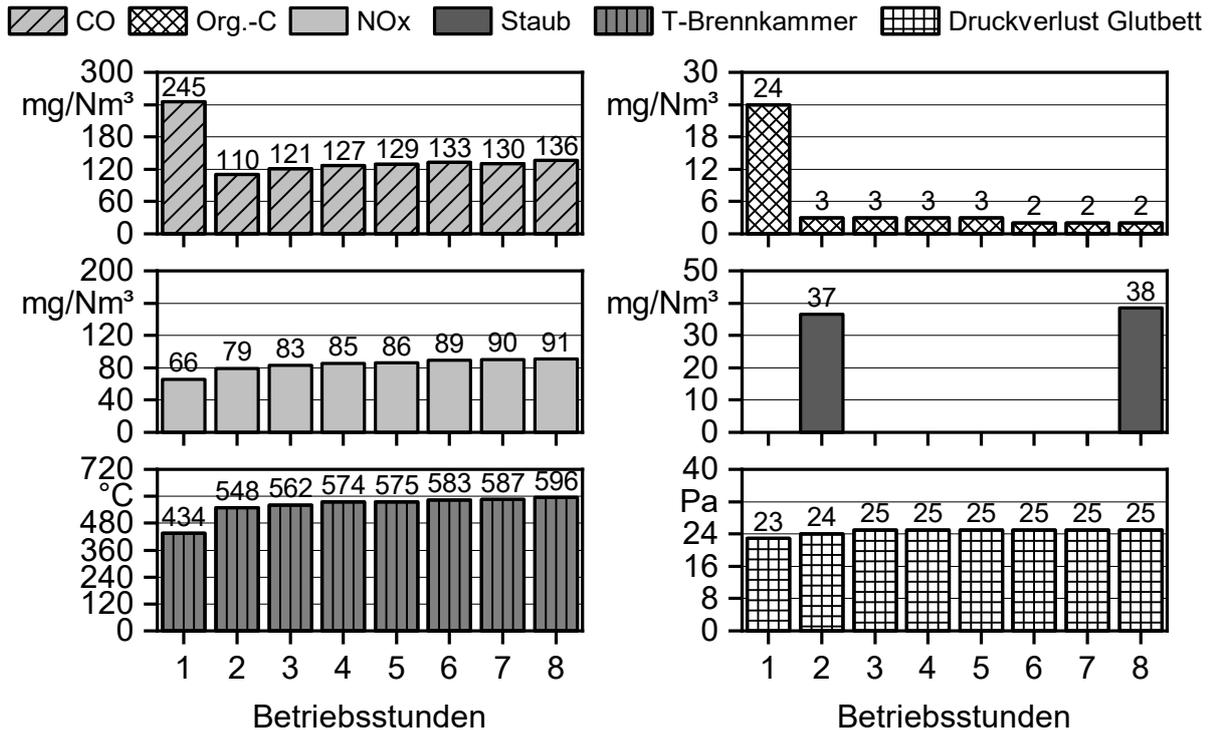


Abbildung 194: Zeitlicher Verlauf über CO, org.-C, NO_x, Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Lärchenholzpellets in Pelletofen 2

Aufgrund der Auffälligkeiten bei den Untersuchungen zum Einfluss der Additive (siehe Abschnitt 7.2.5) wurden die Fichtenpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität im Langzeittest über acht Stunden untersucht (siehe Abbildung 195). Nach der Aufheizphase mit Emissionen an CO von 191 mg/Nm³, org.-C von 13 mg/Nm³ und NO_x von 132 mg/Nm³ erreichen die CO-Emissionen das Minimum in der vierten Betriebsstunde mit 116 mg/Nm³ und org.-C in der dritten Betriebsstunde mit 3 mg/Nm³, während NO_x das Maximum mit 152 mg/Nm³ ebenfalls in der dritten Betriebsstunde erreicht. Die CO-Emissionen steigen dann diskontinuierlich auf 145 mg/Nm³ in der achten Betriebsstunde an, während die org.-C-Emissionen konstant bleiben und die NO_x-Emissionen nahezu kontinuierlich auf 142 mg/Nm³ abfallen. Die Gesamtstaubemissionen bleiben ähnlich wie bei der Lärche von der zweiten zur achten Betriebsstunde konstant bei 31–30 mg/Nm³. Die Brennumraumtemperatur liegt zwischen 437 °C in der Aufheizphase und 594 °C in der achten Betriebsstunde, wie auch bei der Lärche eher etwas niedriger als bei den beiden marktverfügbaren Pellets. Der Druckverlust steigt kontinuierlich von 22 Pa auf 31 Pa an. Hier liegt wahrscheinlich ein Aufbau einer Ascheschicht bzw. von Versinterungen vor, die sich jedoch anscheinend nicht nachteilig auf die Emissionen innerhalb der acht Stunden Messdauer auswirken.

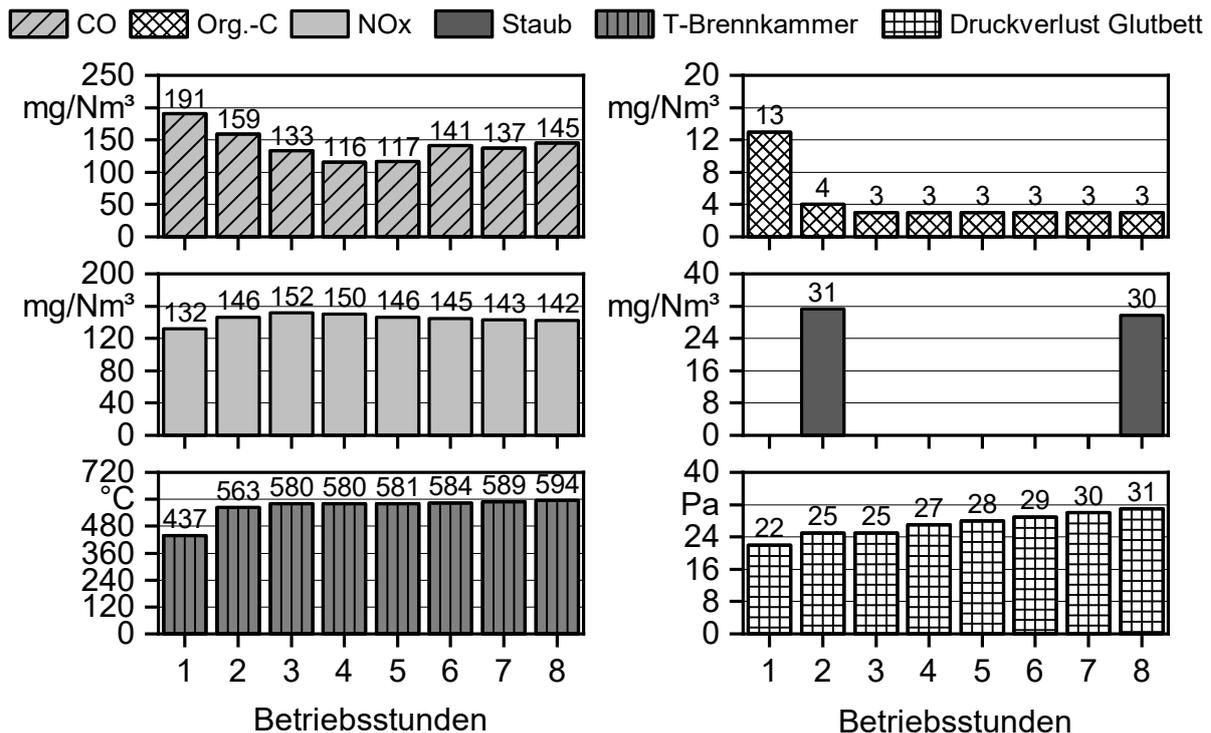


Abbildung 195: Übersicht über CO, org.-C, NO_x, Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Fichtenpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität in Pelletofen 2

In Pelletkessel 1 wurde das Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets über insgesamt 26 h verbrannt, da hier zweimal während der Versuchsdauer die Rostreinigung des Kessels automatisch ausgelöst wurde (siehe Abbildung 196). Während der Aufheizphase in der ersten Betriebsstunde sowie während und nach den Rostreinigungen in der zehnten bis elften Betriebsstunde sowie in der 20.–21. Betriebsstunde liegen erhöhte CO- (bis 483 mg/Nm³) und org.-C-Emissionen (bis 55 mg/Nm³) sowie niedrigere NO_x-Emissionen (bis 226 mg/Nm³), Brennraumtemperaturen (bis 483 °C) und Druckverluste über das Glutbett (bis 79 Pa) vor. Während des stationären Betriebs lagen die CO-Emissionen bei 3–6 mg/Nm³ und steigen zwischen den Rostreinigungen mit der Betriebsdauer minimal an, die org.-C-Emissionen liegen bei 0–2 mg/Nm³ und die NO_x-Emissionen bei 345–356 mg/Nm³, sie fallen mit der Betriebsdauer zwischen den Rostreinigungen minimal ab. Die Gesamtstaubemissionen wurden während der Betriebsstunden 2–6 und 24–26 in 30-minütigen Probennahmen ermittelt. Sie liegen zwischen 25 mg/Nm³ und 31 mg/Nm³ in einem engen Bereich, hinsichtlich der Betriebsdauer ist hier kein Trend zu erkennen. Die Brennraumtemperatur liegt im stationären Betrieb zwischen 633 °C und 681 °C und der Druckverlust über das Glutbett bei 119 Pa bis 127 Pa. Beide Parameter fallen zwischen den Rostreinigungen mit der Betriebsdauer ab. Dies liegt vermutlich an dem stetigen Durchwärmen des Kesselkörpers und dem damit leicht reduzierten Brennstoffverbrauch. Insgesamt zeigt der Pelletkessel dank der automatischen Rostreinigung inklusive Ascheabwurf keine negativen Auswirkungen für Sortiment 24, wie es bei Pelletofen 2 zu beobachten war.

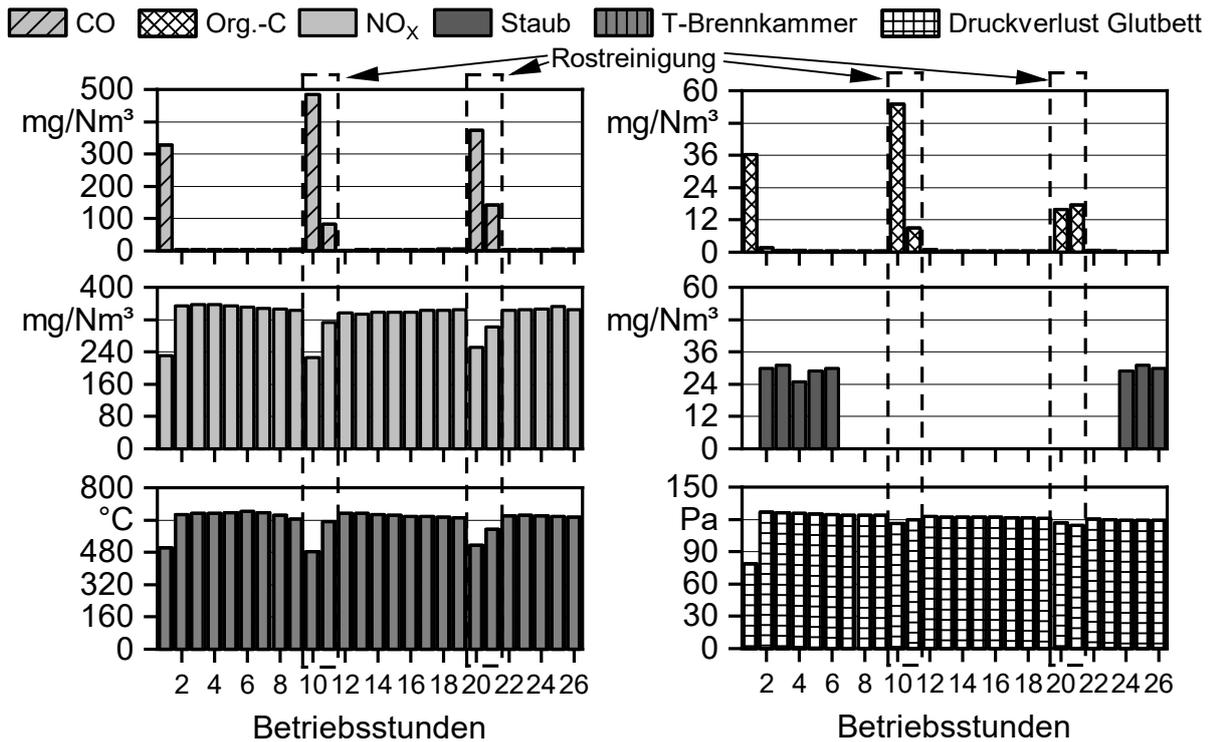


Abbildung 196: Übersicht über CO, org.-C, NO_x, Gesamtstaub, Brennkammertemperatur und Druckverlust über das Glutbett während der Langzeitmessung für Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletkessel 1

7.4.2 Betrachtung der Verbrennungsrückstände

Die Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung der Rostaschen aus den Standard-Feuerungsversuchen (Abschnitte 7.1.4, 7.2.5.4 und 7.2.6.4) und den Langzeitversuchen sind in Tabelle 59 gegenübergestellt. Bei Pelletkessel 1 wurde der Standardversuch mit Sortiment 24 mit der Langzeitmessung verknüpft, daher liegt hier für die Standardmessung kein gesonderter Wert der Aschesiebung vor. Bei Pelletofen 2 zeigt sich für alle Langzeitmessungen außer bei der Lärche eine deutliche Zunahme des Anteils von Partikeln > 2 mm an der gesamten Aschemenge. Bei Lärche bleibt dieser über acht Stunden im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Die größte Zunahme an Partikeln > 2 mm findet für Sortiment 24 über 24 h statt. Diese waren im Vergleich der Standardmessungen mit 4,3 m-% unauffällig, weisen aber nach 24 h einen Anteil an Partikeln > 2 mm von 35,5 m-% auf, die im Wesentlichen in Form eines großen versinterten Aschebrockens in der Brennerschale vorlagen (siehe Abbildung 197), in dem sich sogar die Kanäle der Primärluftdüsen deutlich abzeichneten. Auch beim Pelletkessel fanden sich deutliche Versinterungen in der Aschelade nach Versuchsende (siehe Abbildung 198), die eine maximale Größe von 3,4 × 2,2 × 2,0 cm aufwiesen.

Tabelle 59: Vergleich der Rostaschen zwischen dem Standardversuch und den Langzeitmessungen (n. b. – nicht bestimmt)

Versuch	Standardversuch			Langzeitversuch		
	Betriebs- stunden	Asche- menge	Anteil > 2 mm	Betriebs- stunden	Asche- menge	Anteil > 2 mm
	[h]	[g]	[m-%]	[h]	[g]	[m-%]
Sortiment 16, Pelletofen 2	2	6,7	5,0	8	27,0	18,5
Sortiment 24, Pelletofen 2	2	10,4	4,3	24	127,0	35,5
Lärche, Pellet- ofen 2	2	6,8	5,0	8	25,0	4,5
Fichte 1,8 KSa, Pelletofen 2	2	6,8	7,4	8	26,7	26,6
Sortiment 24, Pelletkessel 1	6	n. b.	n. b.	26	261,5	13,5



Abbildung 197: Versinterte Rostasche nach 24-h-Betrieb mit Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2



Abbildung 198: Versinterte Rostasche nach 26-h-Versuch mit Sortiment 24 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletkessel 1



Abbildung 199: Asche der Langzeitmessung mit Fichtenpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität im Pelletofen 2

Bei Fichtenpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke abfallender Qualität zeigten sich schon nach zwei Stunden Betriebsdauer höhere Anteile an Partikeln > 2 mm im Vergleich zu den restlichen Bindemitteln in den anderen Pellets. Hier erhöht sich der Anteil auf 26,6 m-% nach einer Betriebsdauer von acht Stunden und es fanden sich ebenfalls größere Versinterungen im Brennertopf, die sich leider nicht am Stück entnehmen ließen

(siehe Abbildung 199). Der größte Brocken hatte hier die Abmessungen $3,0 \times 2,3 \times 0,5$ cm. Nach Beobachtung lag hier die Versinterung ebenfalls vor Entnahme als bodendeckende Schicht im Brennertopf vor. Auch für Sortiment 16 steigt der Anteil an Partikeln > 2 mm deutlich auf 18,5 m-% an, wenn es über acht Stunden verbrannt wird. Auch hier lagen größere Schlackebrocken vor, die beim Entnehmen der Probe zerfielen (siehe Abbildung 200) und danach maximale Abmessungen von $2,4 \times 2,0 \times 0,4$ cm aufwiesen.

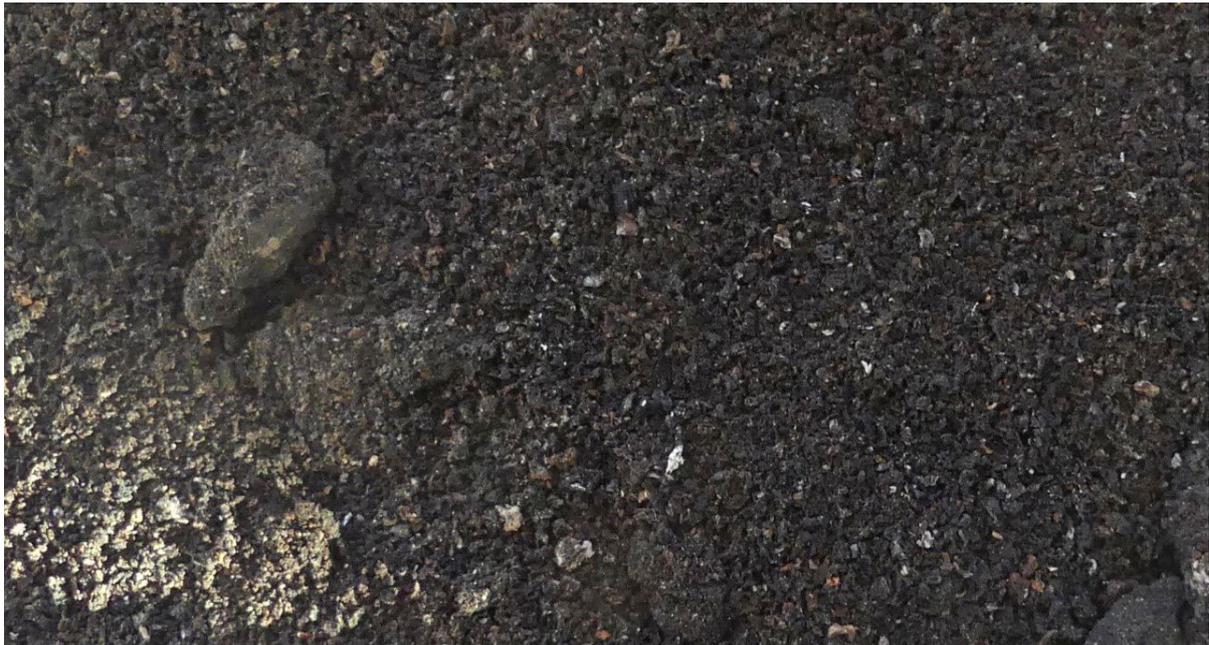


Abbildung 200: Asche der Langzeitmessung mit Pelletsortiment 16 der marktverfügbaren Holzpellets in Pelletofen 2

7.4.3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Langzeitmessungen zeigen, dass gerade im Langzeitverhalten die untersuchten Brennstoffe und Feuerungen sehr unterschiedlich reagieren. Während bei Lärchen- und Fichtenholzpellets mit 1,8 m-% Kartoffelstärke sowie dem Sortiment 24 bei Pelletkessel 1 keine nennenswerten Verschlechterungen hinsichtlich der Emissionen zu beobachten waren, wurden bei den Sortimenten 16 und 24 der marktverfügbaren Holzpellets deutliche Verschlechterungen bei den gasförmigen Emissionen und Gesamtstaubemissionen an Pelletofen 2 festgestellt. Diese stehen wahrscheinlich im Zusammenhang mit den deutlich zu beobachtenden Versinterungen der Rostasche. Jedoch bleibt die Frage offen, warum bei Fichte mit Kartoffelstärke trotz deutlicher Versinterungen der Asche nicht diese negativen Auswirkungen auf die Emissionen zu beobachten waren. Die Versuche zeigen jedoch deutlich, dass Versinterungen, die wahrscheinlich zum Teil auch durch Karbonatschmelzen in der Asche begünstigt werden, erst bei größeren Aschemengen und langen Verweildauern der Asche in der heißen Zone des Brennertopfs auftreten. Für weitere Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffparameter in der Projektfortsetzung sollte daher großer Wert auf ausreichende Versuchsdauer bei den Feuerungsversuchen gelegt wer-

den. Hierdurch ergeben sich auch weitere Optimierungspotenziale bei der Feuerungstechnik. Beispielsweise könnte die zyklische Brenntopfreinigung durch stündliche Erhöhung der Gebläsedrehzahl und damit bedingte kurzfristige starke Temperaturänderungen im Glutbett über längere Betriebsdauer auch zu einer verstärkten Versinterung der Asche beitragen.

7.5 Messung der Umsetzungsprozesse im Feuerraum

Zur Unterstützung der Entwicklung und Validierung des CFD-Abbrandmodells (siehe Teil II des Berichts) wurden zusätzlich zu den in den vorangegangenen Abschnitten dokumentierten Testläufen zwei Testlaufserien mit einem erweiterten Messprogramm und einer abweichenden Methodik (siehe Abschnitt 4.4.4) durchgeführt. Zielsetzung dieser Testläufe war es, Messdaten zu Brennstoffbetttemperaturprofilen sowie Rauchgastemperaturen und Gasphasenzusammensetzungen am Brennstoffbettaustritt und in der Brennkammer zu erarbeiten. Des Weiteren sollte das Brennstoffbett am Ende jedes Testlaufs nach Einfrieren des Abbrands durch Quenchen hinsichtlich des Abbrandzustands schichtweise untersucht werden. Es wurden zwei Testkampagnen im August 2019 (Testkampagne 1) und im Juni 2020 (Testkampagne 2) am Pelletofen 2 durchgeführt. Dabei wurden während der Testkampagne 1 die marktverfügbaren Sortimenten 8, 17 und 19 (siehe Tabelle 3) eingesetzt, während Testkampagne 2 mit Fichtenpellets (normale Länge), Fichtenpellets (kurz) und Lärchenpellets (siehe Tabelle 9) durchgeführt wurde.

Der Kaminofenbetrieb erfolgte während der Testkampagne 1 mit den werkseitigen Regelungseinstellungen. Im Zuge der Testkampagne 2 wurden die Zwischenabbrände, die für ein periodisches Abbrennen des Brennstoffbetts und eine damit verbundene Abreinigung des Rosts sorgen sollen, deaktiviert. Der Grund für diese Maßnahme war, dass für die Modellevaluierung ein längerer Beobachtungszeitraum der Entwicklung des Brennstoffbetts vorteilhaft ist. Der Ofen wurde jeweils über mehrere Stunden betrieben. Dabei wurden von BIOS, wie in Abschnitt 4.4.3 beschrieben, an zwei Positionen (direkt über dem Brennstoffbett und in der Brennkammer) Messungen der Temperaturen (mittels Absaugpyrometer) und der Gaszusammensetzungen sowie Temperaturmessungen an mehreren Positionen im Brennstoffbett durchgeführt. Am Ende jedes Testlaufs erfolgte ein plötzlicher Reaktionsabbruch im Brennstoffbett durch Entnahme der Brennerschale und Quenchen mit Stickstoff. Nachfolgend wurde das Brennstoffbett bezüglich der Höhen einzelner Schichten (unverkohlte, teilverkohlte und verkohlte Pellets sowie Asche) vermessen und die einzelnen Schichten für nachfolgende Analysen beprobt (siehe Abschnitt 4.4.4).

Generell kann gesagt werden, dass die beiden Messkampagnen sowie die Messungen und Beprobungen ohne Störungen durchgeführt werden konnten, d. h., es traten bei keinem der Pelletsortimente Betriebsprobleme auf, die im kontinuierlichen Betrieb zu einer offensichtlich schlechten Ofenperformance führten (z. B. inakzeptabel hohe Emissionen, Verschlackungen). Lediglich beim Betrieb mit Lärchenpellets traten Probleme mit der Austragsschnecke auf (Motorüberlastung), die zweimal zu einer kurzfristigen Unterbrechung des Testlaufes führten, aber keine weiteren Auswirkungen auf den Testlauf und die Ver-

wertbarkeit der Ergebnisse hatten. Außerdem ist anzumerken, dass die eingesetzten Pelletsortimente im Zuge der Testläufe nochmals beprobt und nachfolgend analysiert wurden. Dabei zeigten sich mit einer Ausnahme keine wesentlichen Abweichungen zu den bereits in Abschnitt 5 dokumentierten Brennstoffzusammensetzungen. Lediglich bei den Lärchenpellets lag der Kaliumgehalt um ca. 15 % unter dem ursprünglichen Messwert.

Mit **Sortiment 8** der marktverfügbaren Holzpelletsortimente konnte ein Betrieb über sechs vollständige Betriebszyklen und ein abschließender Betriebszyklus, im Rahmen dessen der erzwungene Abbruch des Abbrands samt nachfolgender Brennstoffbettentnahme erfolgte, gefahren werden. In Abbildung 201 sind beispielhaft die Verläufe relevanter Betriebsparameter über den Testlauf dargestellt. Die stündlichen Reinigungsausbrände lassen sich dabei am Absinken der Brennkammertemperaturen am leichtesten identifizieren. Generell kann gesagt werden, dass die Verläufe der einzelnen Parameter über die einzelnen Abbrandzyklen zwischen zwei Reinigungsausbränden keine nennenswerten Unterschiede aufweisen.

Die CO-Emissionen zeigten, wie erwartet, deutliche Emissionsspitzen während der Reinigungsausbrände und vereinzelt Emissionsspitzen (1.000 bis 1.500 mg/Nm³) während der einzelnen Batches. Die mittleren CO-Emissionen (ohne Reinigungsausbrände) lagen bei 306 mg/Nm³ (Standardabweichung: 699 mg/Nm³). Die O₂-Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt und die Verbrennungsluftströme waren für die einzelnen Abbrände gut vergleichbar, wobei der O₂-Mittelwert über den gesamten Testlauf bei 11,9 vol-% (Standardabweichung: 2,3 vol-%) lag. Die Auswertung der Verbrennungsluft-Volumenstrommessungen zeigte, dass die Verbrennungsluft zu einem überwiegenden Anteil über die Brennschale eingebracht wurde ($\lambda_{\text{Brennschale}} = \text{Primärluft und Sekundärluft} = 1,6$; $\lambda_{\text{gesamt}} = 2,3$). Der Druckverlust über die Brennerschale stieg mit andauerndem Betrieb von 31 Pa zu Beginn auf 34 Pa während des letzten Abbrands leicht an. Die Trends der Temperaturen im Brennstoffbett und in der Brennkammer waren zwischen den einzelnen Abbrandzyklen gut vergleichbar. Die Brennkammertemperaturen und auch die Temperaturen im Rauchgas nach Ofenaustritt lagen, über den gesamten Testlauf gesehen, auf jeweils vergleichbaren Niveaus.

Mit **Sortiment 17** der marktverfügbaren Holzpelletsortimente wurde der Ofen über sieben vollständige Betriebszyklen und einen abschließenden Betriebszyklus betrieben, im Rahmen dessen der erzwungene Abbruch des Abbrands samt nachfolgender Brennstoffbettentnahme erfolgte. Die Verläufe der einzelnen gemessenen Parameter waren mit den in Abbildung 201 für das Sortiment 8 dargestellten prinzipiell gut vergleichbar. Die CO-Emissionen zeigten auch hier deutliche Emissionsspitzen während der Reinigungsausbrände und vereinzelt Emissionsspitzen (500 bis 1.000 mg/Nm³, vereinzelt bis 1.500 mg/Nm³) während der Batches, wobei die mittleren CO-Emissionen über den gesamten Testlauf bei 371 mg/Nm³ (Standardabweichung: 1.176 mg/Nm³) lagen. Die O₂-Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt und die Verbrennungsluftströme waren für die einzelnen Abbrände gut vergleichbar. Der O₂-Mittelwert über den gesamten Testlauf lag bei 12,3 vol-% (Standardabweichung: 2,2 vol-%). Die Verbrennungsluftverhältnisse lagen bei 1,6 (Brennschale) bzw. 2,4 (λ_{gesamt}). Der Druckverlust über die Brennerschale stieg mit andauerndem Betrieb von 31 Pa zu Beginn auf 35 Pa während des letzten Abbrands leicht an. Wie schon

beim Sortiment 8 waren die Trends der Temperaturen im Brennstoffbett und in der Brennkammer zwischen den einzelnen Abbrandzyklen gut vergleichbar und die Temperaturen in der Ausbrandzone ($T_{\text{Brennkammer}}$) und im Rauchgas nach dem Pelletofen lagen, über den gesamten Testlauf gesehen, auf jeweils vergleichbaren Niveaus.

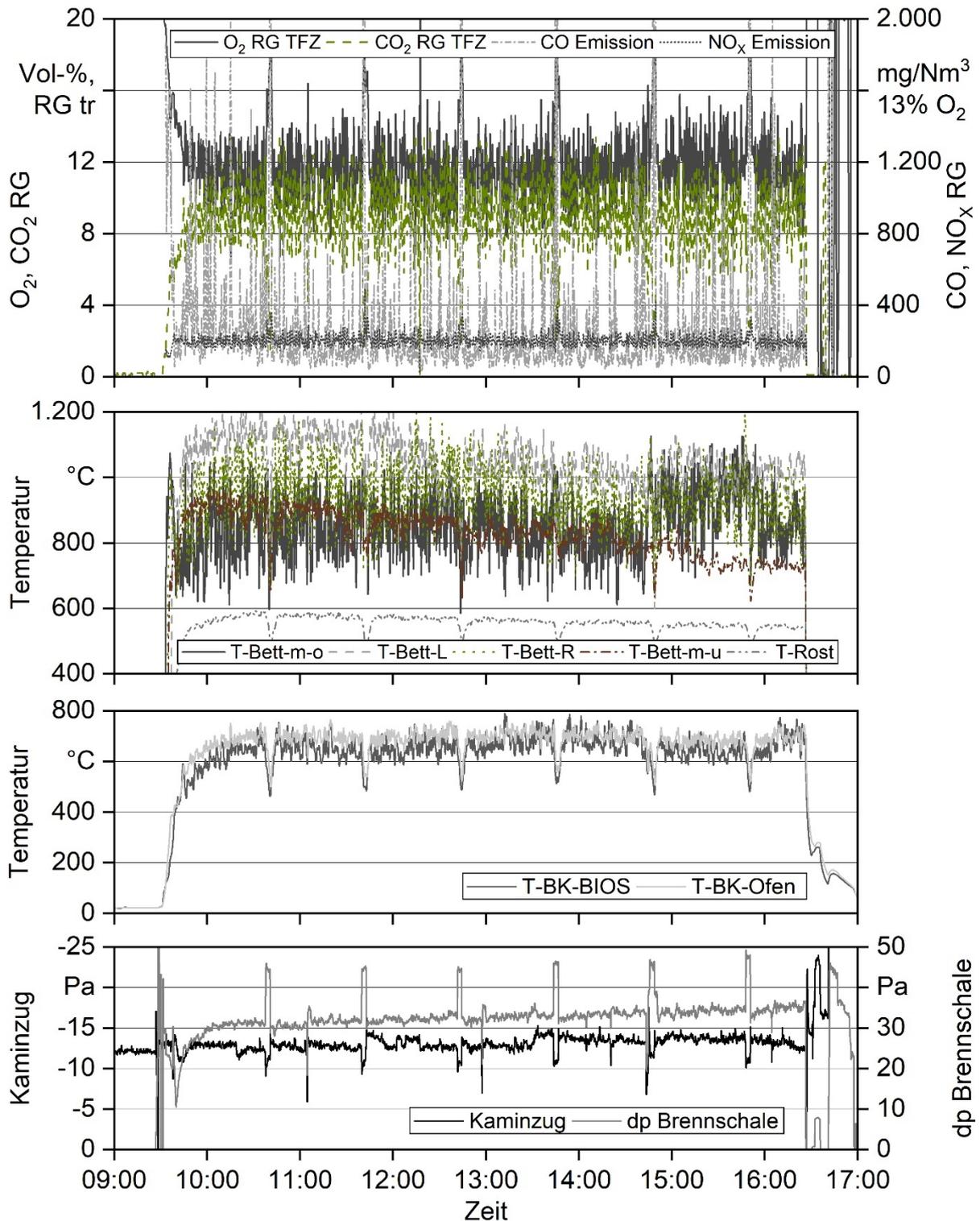


Abbildung 201: Trends relevanter Betriebsparameter während des Testlauftags mit Sortiment 8 der marktverfügbaren Holzpelletsortimente; T = Temperatur; BK = Brennkammer; BIOS/Ofen = gemessen durch BIOS bzw. durch die Ofenregelung; Positionen der Betttemperaturfühler: m-o = Mitte oben, m-u = Mitte unten; L = links; R = rechts

Mit **Sortiment 19** der marktverfügbaren Holzpelletsortimente erfolgten ein Betrieb über neun vollständige Betriebszyklen und ein abschließender Betriebszyklus mit erzwungenem Abbruch des Abbrands. Die Verläufe der einzelnen gemessenen Parameter waren mit den in Abbildung 201 für das Sortiment 8 dargestellten prinzipiell gut vergleichbar. Auch hier zeigten die CO-Emissionen deutliche Emissionsspitzen während der Reinigungsausbrände und vereinzelt Emissionsspitzen im stationären Betrieb (1.000 bis 1.500 mg/Nm³), wobei die mittleren CO-Emissionen über den gesamten Testlauf bei 400 mg/Nm³ (Standardabweichung: 596 mg/Nm³) lagen. Die O₂-Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt lagen im Mittel über den gesamten Testlauf bei 13,0 vol-% (Standardabweichung: 1,8 vol-%) und die Verbrennungsluftverhältnisse bei 1,8 ($\lambda_{\text{Brennschale}}$) bzw. 2,6 (λ_{gesamt}). Im Gegensatz zu den beiden anderen Sortimenten zeigte der Druckverlust über die Brennerschale keine nennenswerten Änderungen über den gesamten Testlauf und lag bei durchschnittlich 34,4 Pa (Standardabweichung: 4,9 Pa). Wie bei den beiden anderen Sortimenten waren die Trends der Temperaturen im Brennstoffbett und in der Brennkammer zwischen den einzelnen Abbrandzyklen gut vergleichbar, genauso wie die Temperaturen in der Ausbrandzone und im Rauchgas nach dem Kaminofen.

Während Messkampagne 2 erfolgte der Betrieb, wie bereits erwähnt, kontinuierlich, d. h. ohne Zwischenabbrände. Mit **Fichtenpellets (normale Länge)** konnte ein repräsentativer stationärer Betrieb über ca. 8,5 Stunden aufrechterhalten werden, an den der erzwungene Abbruch des Abbrands samt nachfolgender Brennstoffbettentnahme anschloss (siehe Abbildung 202). Zum Vergleich mit der Messkampagne 1 sind die Verläufe relevanter Betriebsparameter während des Testlaufs mit Fichtenpellets in Abbildung 202 dargestellt. Durch das Fehlen der Reinigungsausbrände fehlen auch die damit verbundenen CO-Spitzen. Außerdem ist zu erkennen, dass der Druckverlust über die Brennerschale kontinuierlich ansteigt, was ebenfalls dem Fehlen der Reinigungsausbrände zuzuschreiben ist.

Die CO-Emissionen zeigten vereinzelt deutliche Emissionsspitzen (1.000 bis 1.500 mg/Nm³), die mit Fortdauer des Testlaufs in der Häufigkeit (nicht in der Höhe) leicht zunahm, wobei die mittleren CO-Emissionen über den gesamten stationären Betrieb bei 182 mg/Nm³ (Standardabweichung: 136 mg/Nm³) lagen. Die O₂-Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt verliefen ohne nennenswerte Abweichungen und lagen im Mittel im stationären Betrieb bei 13,3 vol-% (Standardabweichung: 1,4 vol-%) und die Verbrennungsluftverhältnisse lagen bei 1,8 ($\lambda_{\text{Brennschale}}$) bzw. 2,7 (λ_{gesamt}). Der Druckverlust über die Brennerschale stieg durch den verstärkten Betaufbau über den gesamten Testlauf mit der Zeit an, und zwar von 29,1 Pa (Standardabweichung: 0,5 Pa) während der ersten Stunde im stationären Betrieb auf 34,7 Pa (Standardabweichung: 4,1 Pa) während der achten Betriebsstunde. Die Brennkammertemperaturen und die Rauchgastemperaturen nach dem Pelletofen lagen über den gesamten Testlauf gesehen auf vergleichbaren Niveaus.

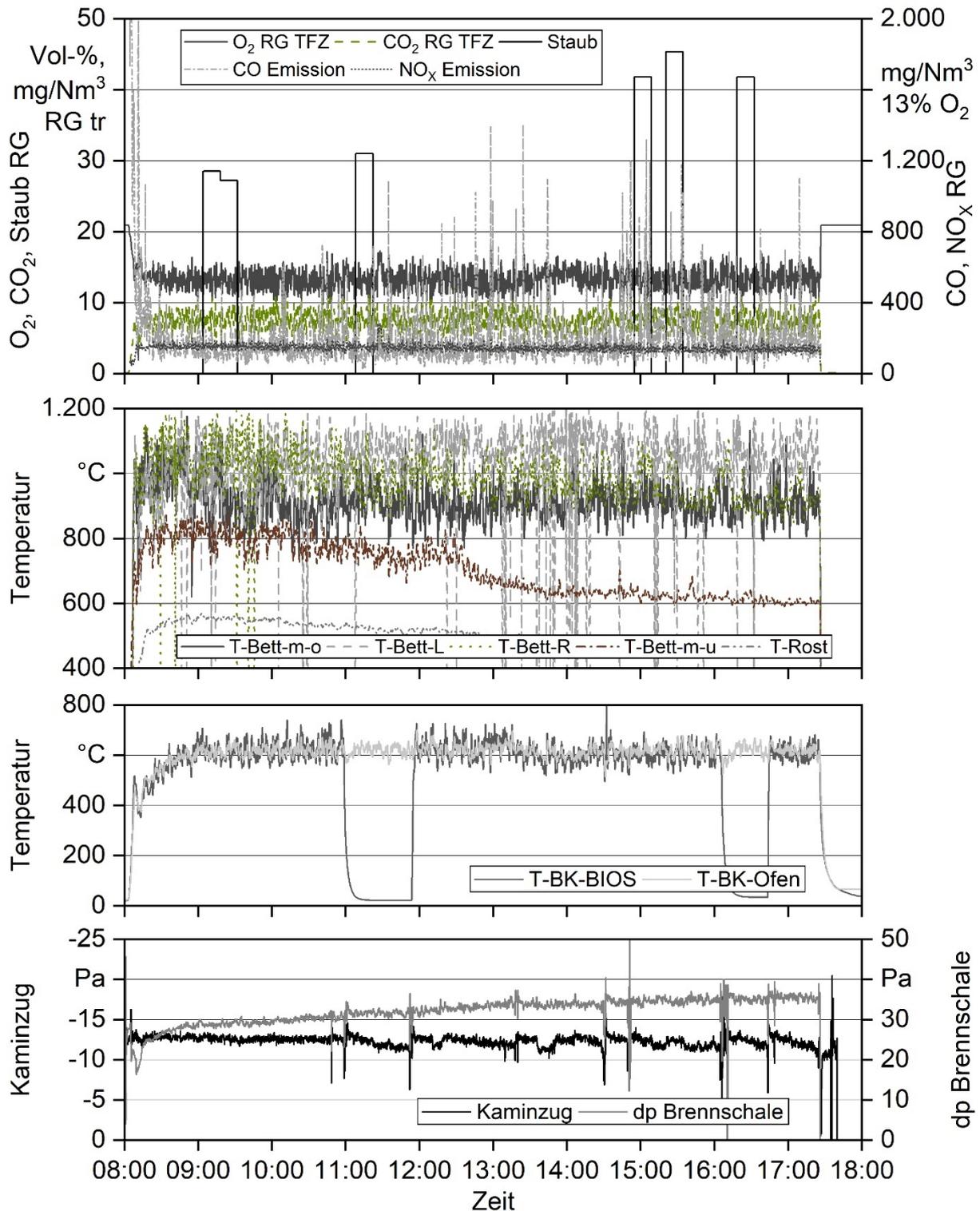


Abbildung 202: Trends relevanter Betriebsparameter während des Testlauftags mit Fichtenpellets; T = Temperatur; BK = Brennkammer; BIOS/Ofen = gemessen durch BIOS bzw. durch die Ofenregelung; Positionen der Betttemperaturfühler: m-o = Mitte oben, m-u = Mitte unten; L = links; R = rechts

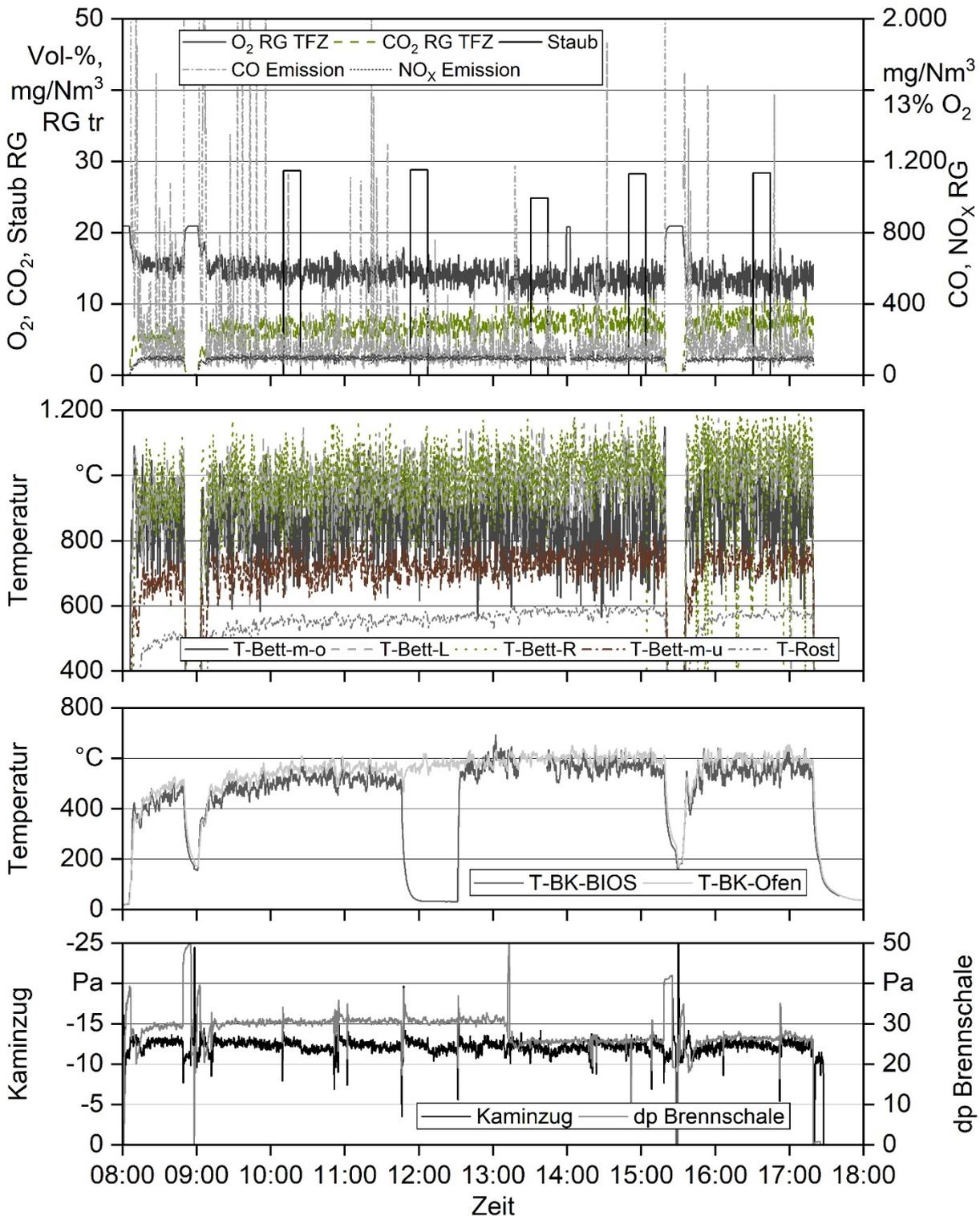


Abbildung 203: Trends relevanter Betriebsparameter während des Testlauftags mit Lärchenpellets; T = Temperatur; BK = Brennkammer; BIOS/Ofen = gemessen durch BIOS bzw. durch die Ofenregelung; Positionen der Betttemperaturfühler: m-o = Mitte oben, m-u = Mitte unten; L = links; R = rechts

Mit **Lärchenpellets** konnte ein kontinuierlicher Betrieb mit zwei kurzen Unterbrechungen aufgrund von Problemen mit der Austragsschnecke über insgesamt 9,5 Stunden (ca. 6,5 Stunden stationär) erreicht werden (siehe Abbildung 203). Die CO-Emissionen zeigten vereinzelte deutliche Emissionsspitzen (in der Regel bis 3.000 mg/Nm^3), die tendenziell mit Fortdauer des Testlaufs in Häufigkeit und Höhe abnahmen. Die mittleren CO-Emissionen (über den gesamten stationären Betrieb) lagen bei 157 mg/Nm^3 (Standardabweichung: 131 mg/Nm^3). Die O_2 -Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt und die Verbrennungsluftströme verliefen ohne nennenswerte Abweichungen, wobei ein mittlerer O_2 -Gehalt von $14,0 \text{ vol-\%}$ (Standardabweichung: $1,4 \text{ vol-\%}$) gemessen wurde und die Verbrennungsluftverhältnisse bei $2,7$ ($\lambda_{\text{Brennschale}}$) bzw. $3,0$ (λ_{gesamt}) lagen. Der Druckverlust über die Brennerschale zeigte im Gegensatz zu den Fichtenpellets keine Veränderungen und lag bei ca. $25,7 \text{ Pa}$. Die Brennkammertemperaturen stiegen über den Testlauf um ca. $50 \text{ }^\circ\text{C}$ an, die Rauchgastemperatur nach dem Pelletofen veränderte sich aber kaum.

Mit **Fichtenpellets (kurz)** konnte ein repräsentativer Betrieb über ca. 7,0 Stunden (6,0 Stunden stationär) aufrechterhalten werden. Die Verläufe der einzelnen gemessenen Parameter waren mit den in Abbildung 202 für Fichtenpellets (normale Länge) dargestellten prinzipiell gut vergleichbar. Auch hier zeigten die CO-Emissionen vereinzelt deutliche Emissionsspitzen (bis 1.500 mg/Nm^3), deren Höhe und Häufigkeit sich über den Testlauf nicht änderten. Die mittleren CO-Emissionen über den gesamten stationären Betrieb lagen bei 188 mg/Nm^3 (Standardabweichung: 154 mg/Nm^3). Die O_2 -Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt und die Verbrennungsluftströme verliefen ohne nennenswerte Abweichungen, wobei der O_2 -Mittelwert bei $12,6 \text{ vol-\%}$ (Standardabweichung: $1,2 \text{ vol-\%}$) lag und sich Verbrennungsluftverhältnisse von $1,6$ ($\lambda_{\text{Brennschale}}$) bzw. $2,5$ (λ_{gesamt}) einstellten. Der Druckverlust über die Brennerschale stieg, wie schon bei den Fichtenpellets mit normaler Länge, mit der Zeit leicht an und lag während der ersten stationären Betriebsstunde bei $32,1 \text{ Pa}$ (Standardabweichung: $0,8 \text{ Pa}$) und während der sechsten Betriebsstunde bei $35,2 \text{ Pa}$ (Standardabweichung $1,1 \text{ Pa}$). Die Brennkammer- und Rauchgastemperaturen nach dem Pelletofen lagen über den gesamten Testlauf gesehen auf vergleichbaren Niveaus.

In den folgenden Diagrammen sind die wesentlichen Betriebsdaten der einzelnen Testläufe, die im vorangehenden Text beschrieben wurden, zusammenfasst. Des Weiteren werden die Auswertungen der während jedes Testlaufs durchgeführten FT-IR- und Pyrometermessungen sowie Betttemperaturen dargestellt, auf die bislang noch nicht eingegangen worden ist.

In Abbildung 204 sind die O_2 - und CO-Gehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt in Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms angeführt. Diese Darstellung wurde gewählt, da mit den einzelnen getesteten Sortimenten sich deutlich differierende Brennstoffmassenströme ergaben. Die Brennstoffzufuhr von Pelletofen 2 beruht auf einer fix definierten Drehzahl der Einschubschnecke. Weisen nun unterschiedliche Pelletsortimente, wie im vorliegenden Fall, voneinander abweichende Transporteigenschaften und Dichten auf, so variieren auch die zugeführten Pelletmassenströme. Die hohen festgestellten Unterschiede zeigen deutlich, dass bezüglich des Brennstofffördersystems erheblicher Optimierungsbedarf gegeben ist, um bei unterschiedlichen Transporteigenschaften und Dichten vergleichbare Brennstoffmassenströme und damit auch vergleichbare Ofenleistungen zu erzielen.

Abbildung 204 veranschaulicht, dass mit steigendem Brennstoffmassenstrom der O₂-Gehalt im Rauchgas absinkt, was darin begründet ist, dass durch die vergleichbar hohen Brennkammerunterdrücke immer in etwa gleich viel Verbrennungsluft angesaugt wird. Generell wurde der Ofen (bei Werkeinstellungen) mit sehr hohem Verbrennungsluftüberschuss (11 bis 14 vol-% O₂ im trockenen Rauchgas) betrieben. Der Vergleich der Daten zeigt, dass ca. 1 vol-% höhere O₂-Gehalte bei der zweiten Testlaufkampagne (ohne Zwischenabbrände) im Vergleich zur ersten (mit Zwischenabbränden) auftraten. Hier wäre eine Verbesserung der Regelung zu empfehlen. Trotz der höheren O₂-Gehalte wurden bei der zweiten Testlaufkampagne um ca. 1/3 niedrigere CO-Emissionen gemessen. Der kontinuierliche Betrieb ohne Zwischenabbrände scheint sich hier positiv auszuwirken. Generell kam es bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen im Rauchgas zu erheblichen CO-Spitzen (diese zeigen sich in den hohen Standardabweichungen der CO-Emissionen), was auf eine unzureichende Durchmischung der Rauchgase und der Verbrennungsluft in der Brennkammer schließen lässt. In diesem Zusammenhang ist eine Optimierung der Brennkammergestaltung sowie der Düsengeometrien jedenfalls zu empfehlen.

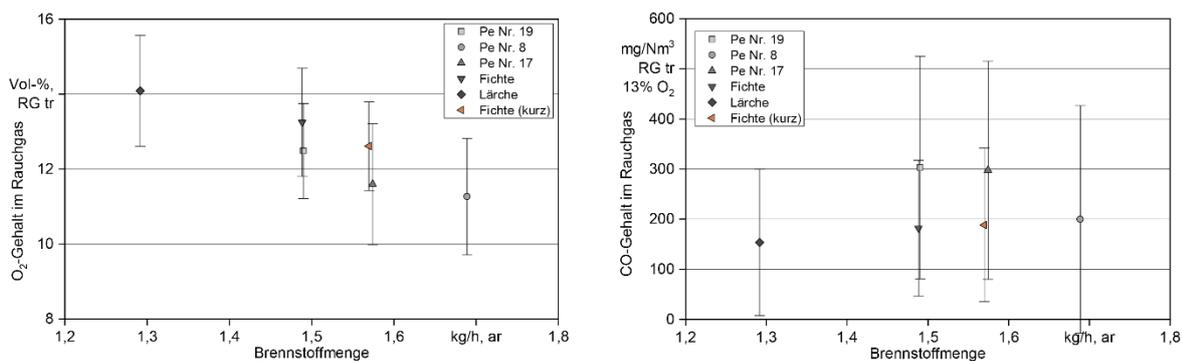


Abbildung 204: Sauerstoffgehalte im Rauchgas nach Ofenaustritt und CO-Emissionen in Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms

In Abbildung 205 sind die Brennkammertemperaturen, die vom Temperaturfühler des Ofens gemessen wurden, sowie die Ergebnisse der unmittelbar neben dieser Messposition mit einem Absaugpyrometer bestimmten Brennkammertemperaturen in Abhängigkeit des Brennstoffmassenstroms dargestellt. Man kann tendenziell einen Temperaturanstieg mit steigendem Brennstoffmassenstrom erkennen. Auch zeigt der Vergleich mit den O₂-Gehalten im Rauchgas (Abbildung 204) wie erwartet ein tendenzielles Ansteigen der Brennkammertemperaturen mit sinkendem Luftüberschuss. Die Abweichung der Messung mit dem Ofentemperaturfühler von der Pyrometermessung war während Kampagne 2 mit 125–220 °C höher als während der ersten Kampagne (25–100 °C). Diese Abweichung zwischen den beiden Kampagnen ist mit dem kontinuierlichen Betrieb ohne Reinigungsausbrände während der zweiten Messkampagne zu erklären.

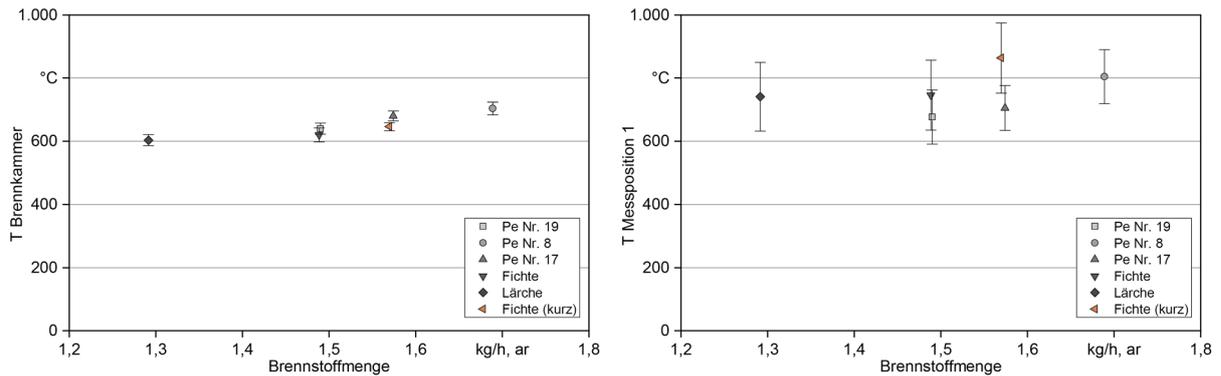


Abbildung 205: Brennkammertemperaturen gemessen mit dem Absaugpyrometer (links) und mit dem Brennkammertemperaturfühler der Ofenregelung (rechts)

Abbildung 206 zeigt einen Vergleich der mit dem Pyrometer an Betaustritt und in der Brennkammer durchschnittlichen gemessenen Temperaturen. Die Gastemperaturen am Austritt aus dem Brennstoffbett liegen dabei in einem engen Band zwischen 1.100 und 1.200 °C. Es ist keine Korrelation mit den Betttemperaturen in der obersten Schicht feststellbar (siehe T-Bett-m-o in Abbildung 207).

In Abbildung 207 sind die Mittelwerte (über den gesamten stationären Betrieb) der gemessenen Rost- und Brennstoffbetttemperaturen dargestellt. Die Rosttemperaturen sind bei Messkampagne 2 durch den starken Aschebettbau bei Fichte und Fichte (kurz) niedriger (Aschebett wirkt isolierend) als bei Lärche. Die Temperaturen am oberen Ende des Brennstoffbetts (T Bett Mitte oben) sind generell gut vergleichbar. Die Temperaturen im rostnahen Bereich (T Bett Mitte unten) sind bei der zweiten Messkampagne durch den Aschebettbau niedriger als bei der ersten. Die Temperaturen in den Randzonen des Brennstoffbetts sind mit Ausnahme der linken Seite bei Sortiment 8, wo sich eine leichte Schiefelage des Brennstoffbetttemperaturprofils einstellte, gut vergleichbar.

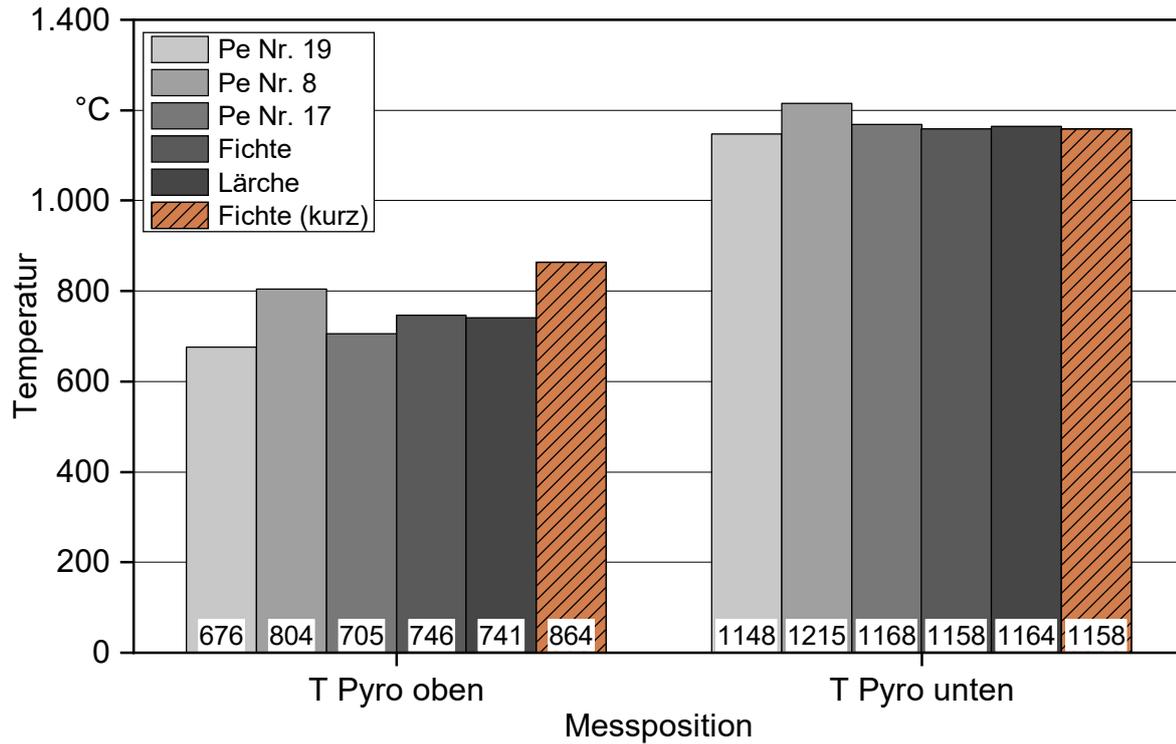


Abbildung 206: Vergleich der mit dem Absaugpyrometer am Betaustritt (T Pyro unten) und in der Brennkammer (T Pyro oben) gemessenen Temperaturen

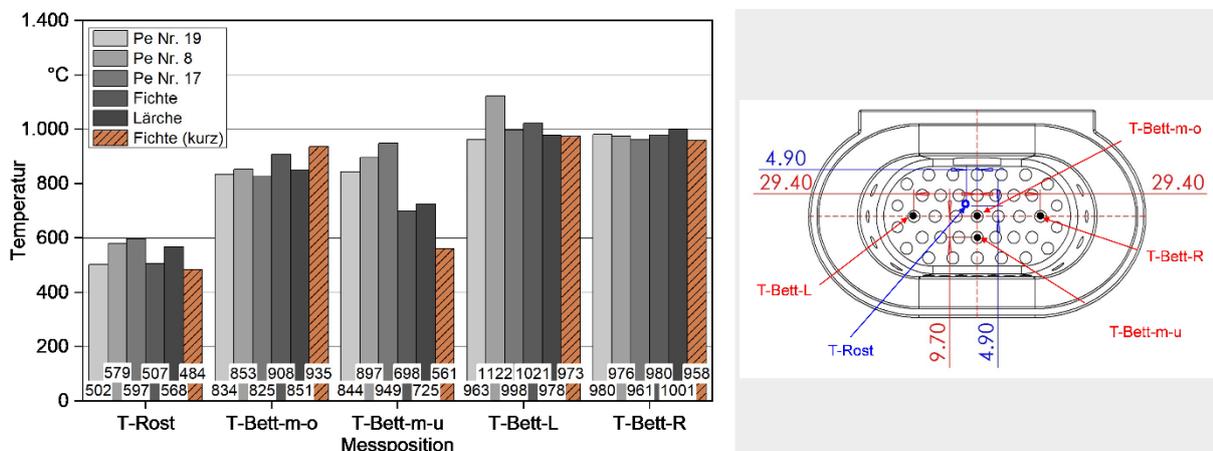


Abbildung 207: Rost- und Brennstoffbetttemperaturen

Pro Testlauf wurden zumindest zwei FT-IR Messungen am Betaustritt über einen Zeitraum von zumindest 15 Minuten durchgeführt. Die mittleren Zusammensetzungen des Gases sind in Abbildung 208 zusammengefasst. In allen Fällen wird die Gasphase von Wasserdampf und CO₂ dominiert. Die durchschnittlichen O₂-Gehalte lagen für die Messkampagne 2 mit 2,8 bis 3,4 vol-% (trockenes Rauchgas) etwas über den Werten der Messkampagne 1 (1,3 bis 2,7 vol-%). Insgesamt schwankten die O₂-Gehalte zwischen 0 und 10 vol-% (nicht dargestellt), was durch den instationären Bettabbrand bedingt ist. Eine Homogenisierung der Brennstoffzufuhr würde hier auch zu einer Homogenisierung des Abbrandprozesses und somit zu geringeren Fluktuationen des O₂-Gehalts führen. CO-Spit-

zen (nicht dargestellt) traten immer bei Sauerstoffmangelszenarien auf, es ließ sich aber kein direkter Zusammenhang zwischen CO-Spitzen am Brennstoffbetaustritt und CO-Spitzen im Rauchgas nach Ofenaustritt feststellen. Die hohen Gastemperaturen und O₂-Gehalte am Betaustritt lassen auf ein zu hohes Verbrennungsluftverhältnis im Brennstoffbett schließen. Deshalb sollte die Luftstufung dahingehend verbessert werden, dass der Ofen mit deutlich weniger Primärluft betrieben wird. Außerdem sollte die Geometrie der Sekundärluftdüsen so optimiert werden, dass eine bessere Durchmischung mit den aus dem Brennstoffbett austretenden Gasen erfolgt und Strahlen gebrochen werden.

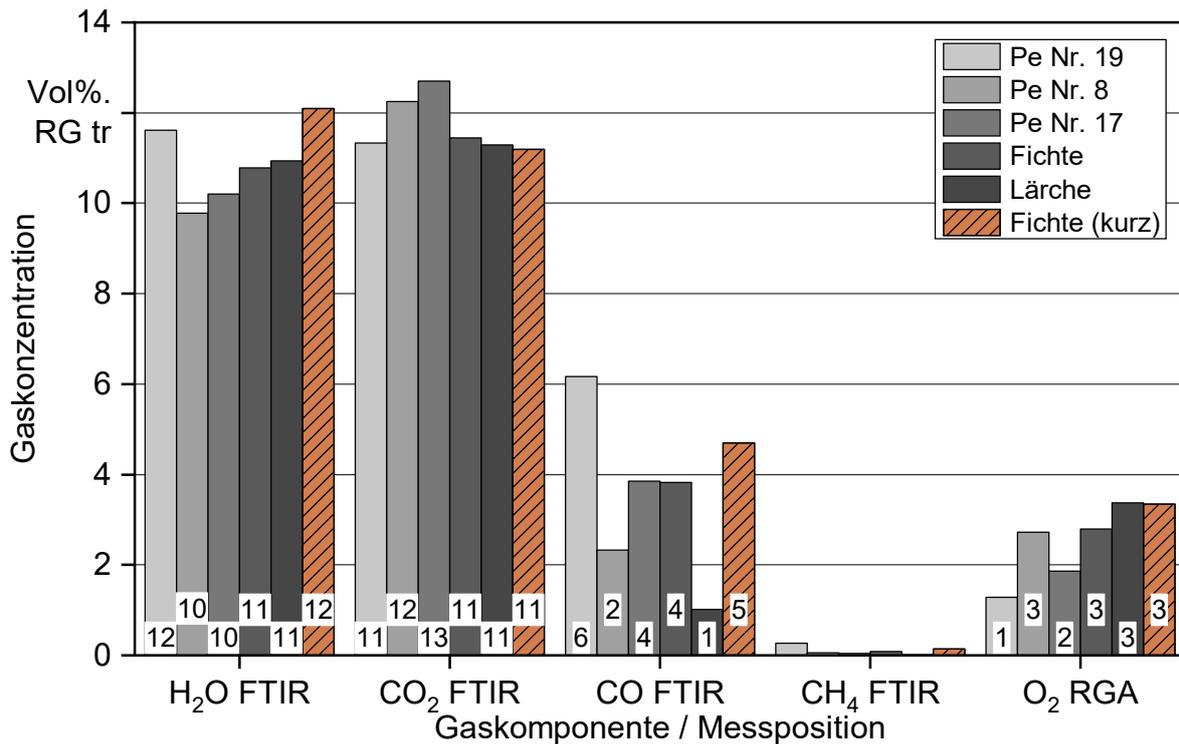


Abbildung 208: Gasphasenzusammensetzung am Betaustritt

Am Ende jedes Testlaufs wurden die Aschen aus der Brennschale sowie aus dem Feuer- raum gesammelt und verwogen und bezüglich ihrer Kohlenstoffgehalte (organischer und anorganischer Kohlenstoff) analysiert. Anhand der Analyseergebnisse wurde der anorganische Anteil in der Asche berechnet. Auch repräsentative Filter aus den Gesamt- staubemissionsmessungen wurden hinsichtlich ihrer Gehalte an organischen Kompo- nenten und Ruß analysiert und daraus der anorganische Anteil im Staub berechnet. Die dar- aus berechnete Summe anorganischer Aschen- und Flugaschenanteile wurde mit dem aus dem Brennstoffeinsatz und dem Aschegehalt des Brennstoffs berechneten theoretischen Ascheanfall verglichen. Für diese Berechnung wurde der Aschegehalt (bei 550 °C bestimmt) durch Messung des Karbonatanteils der veraschten Probe auf einen karbonat- freien Aschegehalt korrigiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 60 dargestellt und zeigen, dass der Ascheanfall laut Messung und Analyse gut vergleichbar ist und der Anteil der Staubemissionen am gesamten Ascheanfall bei 9 bis 20 m-% lag.

Im Anschluss an die Entnahme und das Quenchen der Brennschale am Testlaufende wurde das Brennstoff- bzw. Aschenbett schichtweise abgetragen und die Topografien einzelner optisch unterscheidbarer Bettschichten vermessen und fotodokumentiert. Es traten dabei immer drei Hauptschichten auf, nämlich eine oberste Schicht mit teilverkohlten Pellets, eine darunterliegende Schicht mit verkohlten Pellets und eine zuunterst liegende Ascheschicht. Abbildung 209 und Abbildung 210 zeigen am Beispiel der Testläufe mit Lärchen- und Fichtenpellets Ergebnisse dieser Bettevaluierungen. Man kann gut das aufgrund des geringeren Aschegehalts von Lärche niedrigere Aschebett am Ende dieses Testlaufs im Vergleich zum Testlauf mit Fichtenpellets erkennen. Besonders auffallend ist generell, dass das Züdelement für einen permanenten Lufteintrag in das Brennstoffbett sorgt, was sich auch an den Betthöhenprofilen im Bereich des Züdelements zeigte. Das Züdelement hat somit einen wesentlichen Einfluss auf das Abbrandverhalten des Brennstoffbetts. Der Lufteintrag über das Züdelement sollte somit aufgrund seiner punktuellen Auswirkung so gering wie möglich gehalten werden.

Tabelle 60: *Aschananfall und Aschenbilanz*

Brennstoff	Asche Brennschale	Asche gesamt	Asche gesamt inkl. Gesamtstaub- emissionen	Asche gesamt berechnet	Wiederfindung Asche
	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[g/h]	[%]
Pe Nr. 19	2,03	3,22	4,04	4,02	101,4
Pe Nr. 8	1,18	2,84	3,74	4,03	92,8
Pe Nr. 17	1,74	3,47	4,20	4,55	92,3
Fichte	1,66	3,29	3,89	4,30	90,3
Lärche	0,53	2,57	2,98	3,20	93,1
Fichte-kurz	2,12	3,74	4,31	4,73	91,1

Erläuterungen: $\text{Wiederfindung Asche [\%]} = (\text{ausgewogene Aschemengen} + \text{Staubemissionen}) \div (\text{aus dem Brennstoffaschegehalt und dem eingesetzten Brennstoffmassenstrom berechneter Aschanfall}) \times 100$
 Alle Mengenangaben beziehen sich auf TOC und TIC-freie Asche

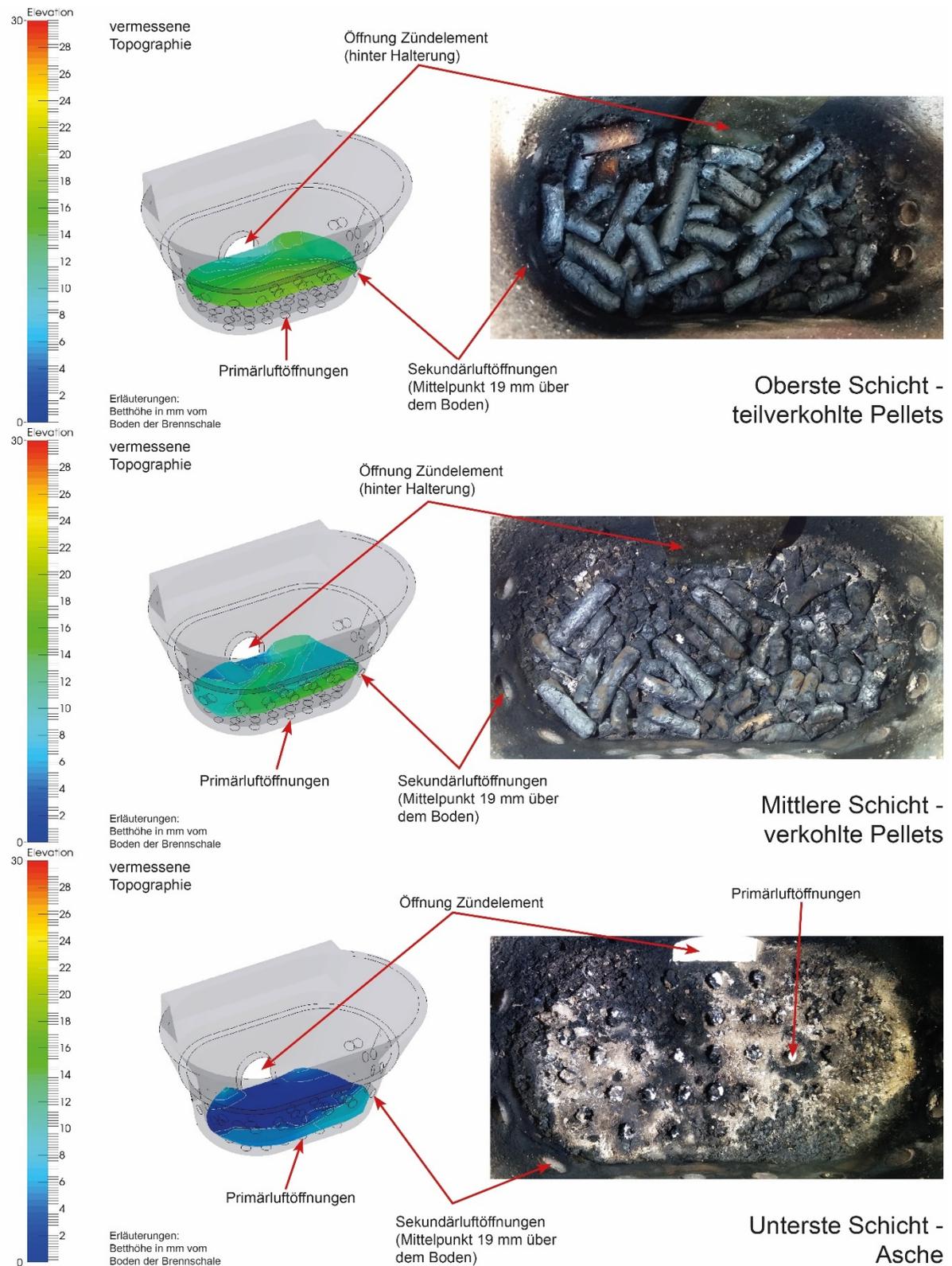


Abbildung 209: Brennstoffbettschichten und Höhenprofile – Lärche

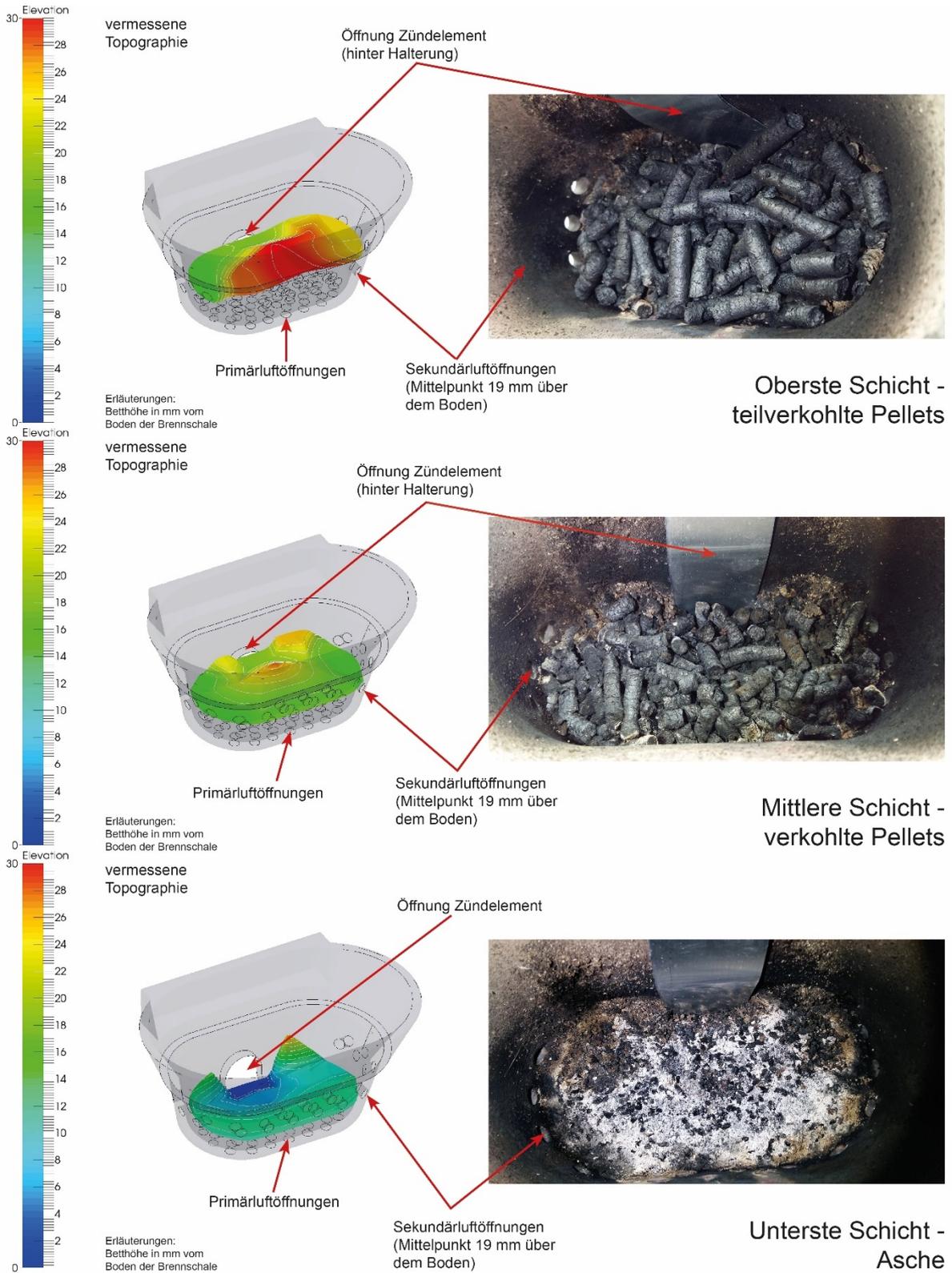


Abbildung 210: Brennstoffbettschichten und Höhenprofile – Fichte

Tabelle 61 fasst die Auswaagen der teilverkohlten und der verkohlten Schicht sowie die Ergebnisse von Wassergehaltsbestimmungen für beide Schichten und Dichtebestimmungen für die verkohlte Schicht zusammen. Diese Anteile des Brennstoffbetts weisen jeweils kollektiv gut vergleichbare Eigenschaften auf (z. B. Wassergehalt, Schüttdichten).

Tabelle 61: *Vergleich der je Brennstoff ermittelten Mengen der Schichten „Teilverkohlt“ und „Verkohlt“ in der Brennschale nach Testlauf sowie Schüttdichten der verkohlten Schicht*

Brennstoff	Betriebszeit	teilverkohlt	Anteil in	WG	verkohlt	Anteil in	WG	Schütt-	Schütt-
	[h]	Brenner- schale	Brenner- schale	teilverkohlt	Brenner- schale	Brenner- schale	verkohlt	dichte	dichte
		[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	verkohlt	Brennstoff
								[kg/m ³]	[kg/m ³]
Pe Nr. 19	9,90	3,28	10,06	0,84	9,25	28,37	3,65	165,71	670,00
Pe Nr. 8	6,90	1,56	8,54	1,07	8,57	46,93	2,88	142,93	681,00
Pe Nr. 17	7,70	2,07	8,99	1,09	7,53	32,71	3,62	157,43	700,00
Fichte	9,35	5,51	18,98	n.b.	7,96	23,43	1,85	221,20	692,00
Lärche	8,86	5,87	37,44	n.b.	5,10	59,84	2,08	178,20	701,00
Fichte-kurz	7,21	7,78	26,31	n.b.	6,69	35,70	2,22	253,20	714,00

Einzelne repräsentative Pellets aus der verkohlten Schicht aus der Messkampagne 1 wurden nachfolgend weiteren Analysen unterzogen. So wurden die Partikeldichte nach EN ISO 18847 (Eintauchen der Pellets in eine Wasser-Tensid-Mischung und Dichtebestimmung anhand Messung der Auftriebskraft), die Masse (Wiegung), die Oberfläche und das Volumen (optischer 3-D-Scan) einzelner Pellets bestimmt. Die Ergebnisse zeigen ähnliche Oberflächen/Volumen-Verhältnisse (1,23–1,30 m⁻¹), jedoch interessante Streuungen bezüglich der Oberfläche (183–272 mm²) und Partikeldichte (350–433 kg/m³).

Die in Abbildung 209 und Abbildung 210 sowie in Tabelle 61 dargestellten Daten sowie die Stoffdaten zu verkohlten und teilverkohlten Pellets wurden erstmals in dieser Form bestimmt und bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Bettabbrandmodells (siehe Teil II des Berichts). Generell konnten im Zuge der Testläufe neue Daten und tiefere Einblicke in den Brennstoffbettabbrand in Pelletkaminöfen gewonnen werden, die eine wichtige Basis für die Modellvalidierung darstellen (bezüglich vergleichender Messdaten und Partikelparameter).

8 Ergebnisse der Laborreaktorversuche

Am Laborreaktor von BIOS (siehe Abschnitt 4.4.5) wurden drei Versuchsserien mit insgesamt 13 Pelletsortimenten durchgeführt. In der Versuchsserie 1 wurden die marktverfügbaren Sortimente Nr. 8, 17 und 19 untersucht. Versuchsserie 2 widmete sich Längenvariation und beinhaltete Tests mit Fichtenpellets „normal“, „mittel“, „kurz“ und „lang“. Während Versuchsserie 3 lag der Fokus auf der Untersuchung von Pellets aus verschiedenen Holzarten, nämlich Eiche, Buche, Tropenholz, Lärche, Kiefer und Fichte.

Im Zuge der Versuchsserien sollten Basisdaten zu verbrennungstechnisch relevanten Parametern wie Zündverhalten, Freisetzungsverhalten flüchtiger Komponenten und Ascheausbrandverhalten erarbeitet werden. Außerdem konzentrierte sich Versuchsserie 1 auf die Erlangung wichtiger Basisdaten (Stoffdaten der Pellets bei unterschiedlichen Ausbrandzuständen), die für die Entwicklung des Brennstoffbettmodells im Zuge speziell dafür konzipierter Abbruchversuche gesammelt werden. Derartige Abbruchversuche wurden im Zuge des FuturePelletSpec-Projekts erstmals durchgeführt, weshalb eine entsprechende Methodenentwicklung mit Vortests den eigentlichen Testläufen vorausging (siehe auch Abschnitt 4.4.5).

8.1 Marktverfügbare zertifizierte Holzpellets (Pelletscreening)

Es wurden Abbrandtests im Laborreaktor entsprechend der in Abschnitt 4.4.5 beschriebenen Methodik mit den marktverfügbaren Sortimenten 8, 17 und 19 (siehe Tabelle 3) durchgeführt. Pro Sortiment erfolgten zwei Testläufe, um die Wiederholbarkeit zu prüfen. Da sich bei allen drei Sortimenten eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Testläufe ergab, werden im Folgenden immer nur die Ergebnisse eines Testlaufs präsentiert.

In Tabelle 62 sind die wichtigsten Daten zu diesen Testläufen zusammengefasst. Abbildung 211 bis Abbildung 214 zeigen die Verläufe der Massenverluste und Betttemperaturen sowie der Hauptkomponenten O₂, H₂O, CO, CO₂ und CH₄ über die einzelnen Testläufe und in Abbildung 217 sind die relativen Aufteilungen der N-haltigen Spezies (NO_x-Vorläufersubstanzen) über den jeweiligen Testlauf zusammengefasst.

Für das Sortiment 8 wurde aufgrund der höheren Schüttdichte eine etwas größere Einwage vorgesehen (500 g im Vergleich zu 490 g), da laut der definierten Testlaufmethodik in allen Fällen dasselbe Brennstoff-Volumen in den Probenhalter gefüllt wurde. Daraus ergeben sich jedoch keine wesentlichen Unterschiede im Abbrandverhalten.

Die Wiederfindungsraten für die Asche ($\text{Auswaage} \div \text{Brennstoffeinsatz} \times \text{Aschegehalt} \times 100$) liegen mit 85,5 bis 89 % in einem akzeptablen Bereich. Da auch die Elementbilanzen für C, H und O zwischen 98 % und 109 % liegen, können die Testlaufergebnisse als plausibel bewertet werden.

Der Vergleich der Testläufe zeigt kaum Unterschiede zwischen den drei Pelletsortimenten. Alle dargestellten Trends folgen dem für Nadelholzpellets typischen Verlauf. Während der ersten Testlaufphase nimmt die Masse des Brennstoffs im Reaktor durch das Austrocknen

des Brennstoffbetts im Zuge der Erwärmung nur leicht ab (Trocknungsphase). Nach diesem Zeitpunkt („Zündung“ bei ca. 400 s) ändert sich die Abbaucharakteristik und die Massenfreisetzung steigt stark an (Abbrandphase: „Abbau flüchtiger Komponenten und Holzkohlevergasung“). Gleichzeitig steigt das Temperaturniveau über dem Brennstoffbett und an Sensor B1. Die Konzentrationen von CO, CO₂, CH₄, H₂ und H₂O im Rauchgas über dem Brennstoffbett steigen ebenfalls stark an, die Konzentration von O₂ sinkt auf beinahe null. Ca. 1.500 bis 1.600 s nach dem Versuchsstart ändert sich die Charakteristik erneut und die Abbaurate wird deutlich geringer (Abbrandphase: „Abbrand Restholzkohle“). Gleichzeitig steigt die Temperatur von Sensor B3 stark an. Die Konzentrationen aller Rauchgaskomponenten außer CO₂ sinken stark. Die Temperatur an Position B3 bleibt bis zum Versiegen der Reaktionen (Ausbrand des Brennstoffs) auf sehr hohem Niveau. Die Konzentration von O₂ im Rauchgas steigt ab ca. 1.650 s kontinuierlich an.

Tabelle 62: Laborreaktortestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Holzpellets – Eckdaten

Sortiment		8	17	19
Ein-, Auswaage und Aschebilanz				
Einwaage (Brennstoff)	[g FS]	500,0	490,0	490,0
Einwaage (Brennstoff)	[g TS]	474,6	455,7	451,8
Auswaage (Asche)	[g TS]	1,21	1,35	1,30
Auswaage Asche (ohne TIC und TOC)	[g TS]	1,06	1,18	1,14
erwarteter Ascheanfall laut Aschegehaltbestimmung (ohne TIC)	[g TS]	1,19	1,43	1,28
Charakteristische Kenngrößen				
maximale Betttemperatur	[°C]	1.108	1.071	1.110
Fortschrittsgeschwindigkeit der Reaktionsfront	[mm/s]	0,16	0,16	0,15
durchschnittliche Abbaurate während Pyrolyse (bezogen auf die freigesetzte Menge)	[%/min]	5,22	5,06	4,87
Durchschnittliche Abbaurate während Holzkohlenausbrand (bezogen auf die freigesetzte Menge)	[%/min]	6,41	6,62	6,12
Ergebnisse der Elementbilanzierungen				
Kohlenstoff	[%]	108,8	98,0	104,0
Wasserstoff	[%]	100,4	99,9	99,7
Sauerstoff	[%]	108,1	102,3	105,3
Asche (ohne TIC und Aerosole)	[%]	89,1	82,5	89,0
Charakteristische Zeiten				
Dauer bis Zündung	[s]	416	416	344
Dauer Freisetzung Flüchtiger + Holzkohlevergasung	[s]	1.150	1.186	1.232
Dauer Restholzkohlenausbrand	[s]	936	906	980
Dauer gesamte Reaktionsphase (ab Zündung)	[s]	2.086	2.092	2.212

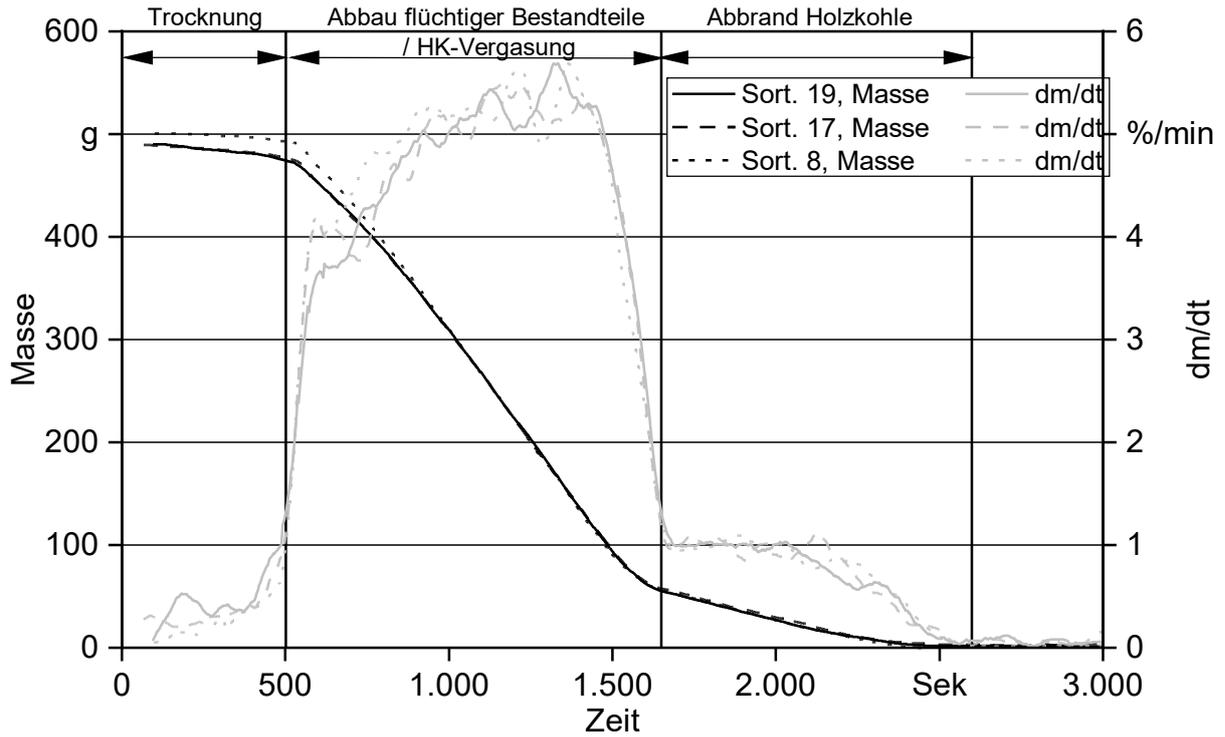


Abbildung 211: Laborreaktorstestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Massenabnahme

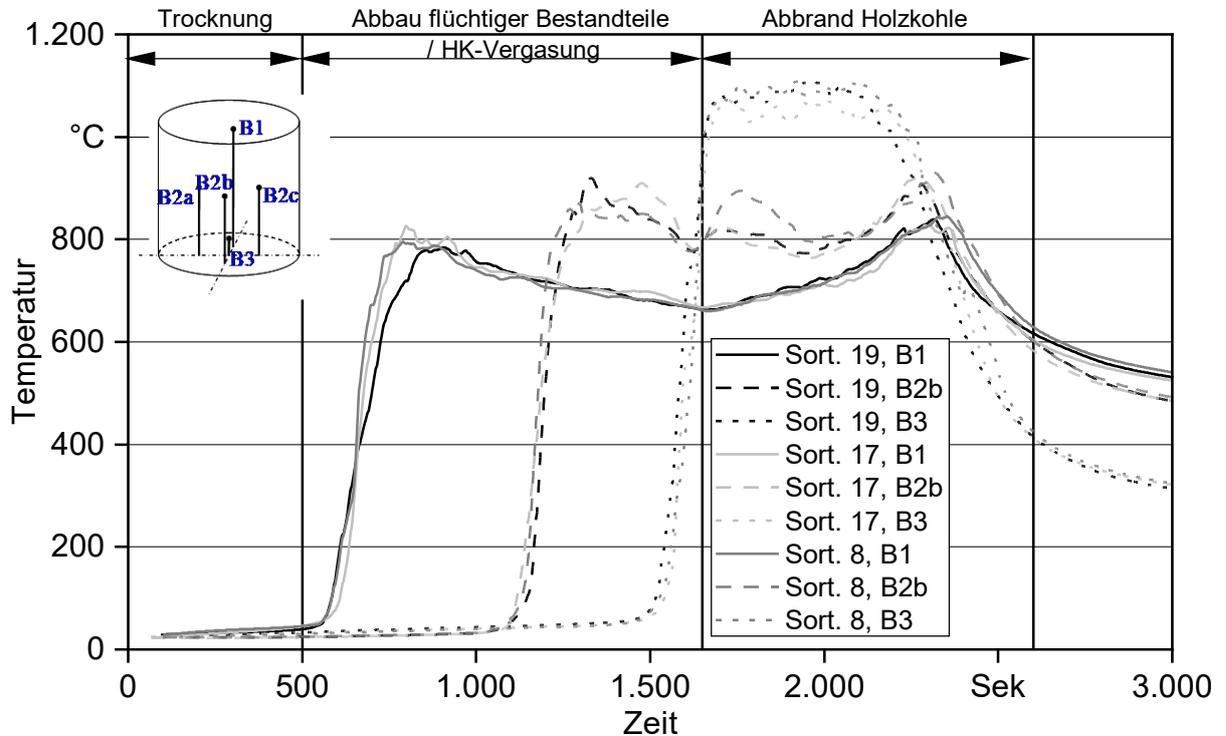


Abbildung 212: Laborreaktorstestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Brennstoffbetttemperaturen

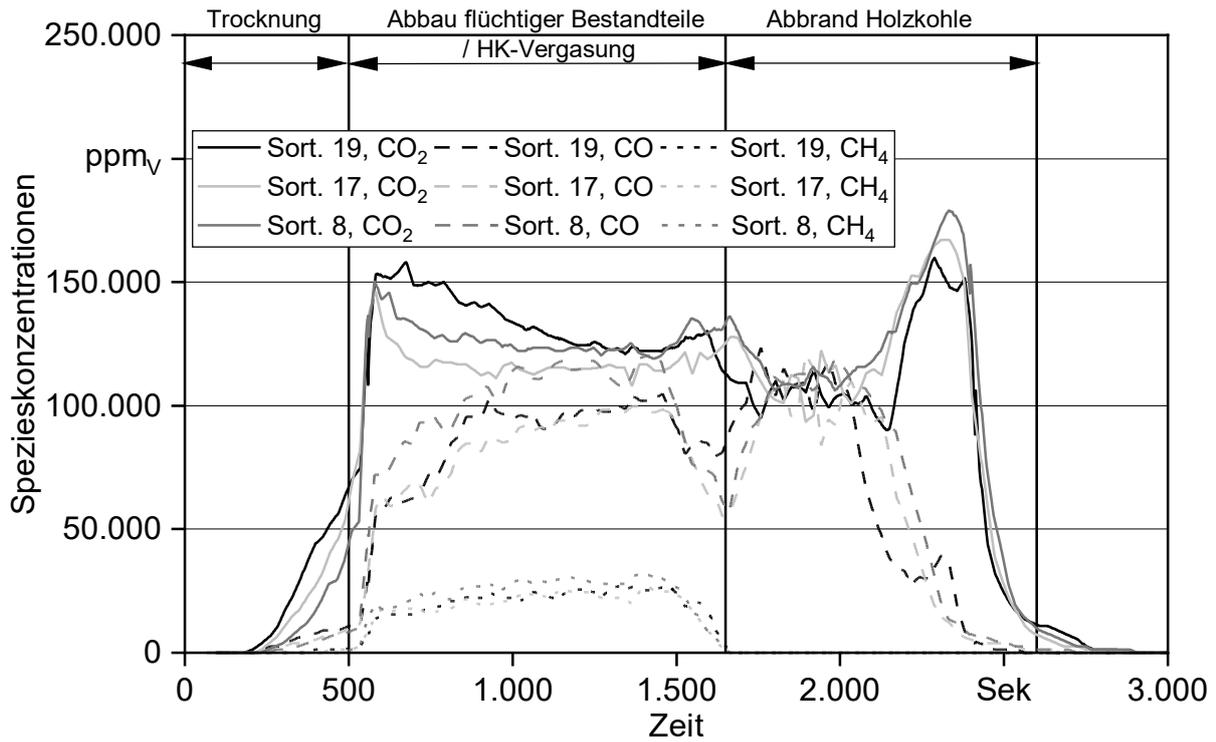


Abbildung 213: Laborreaktor-testläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der O₂- und H₂O-Gehalte im Abgas

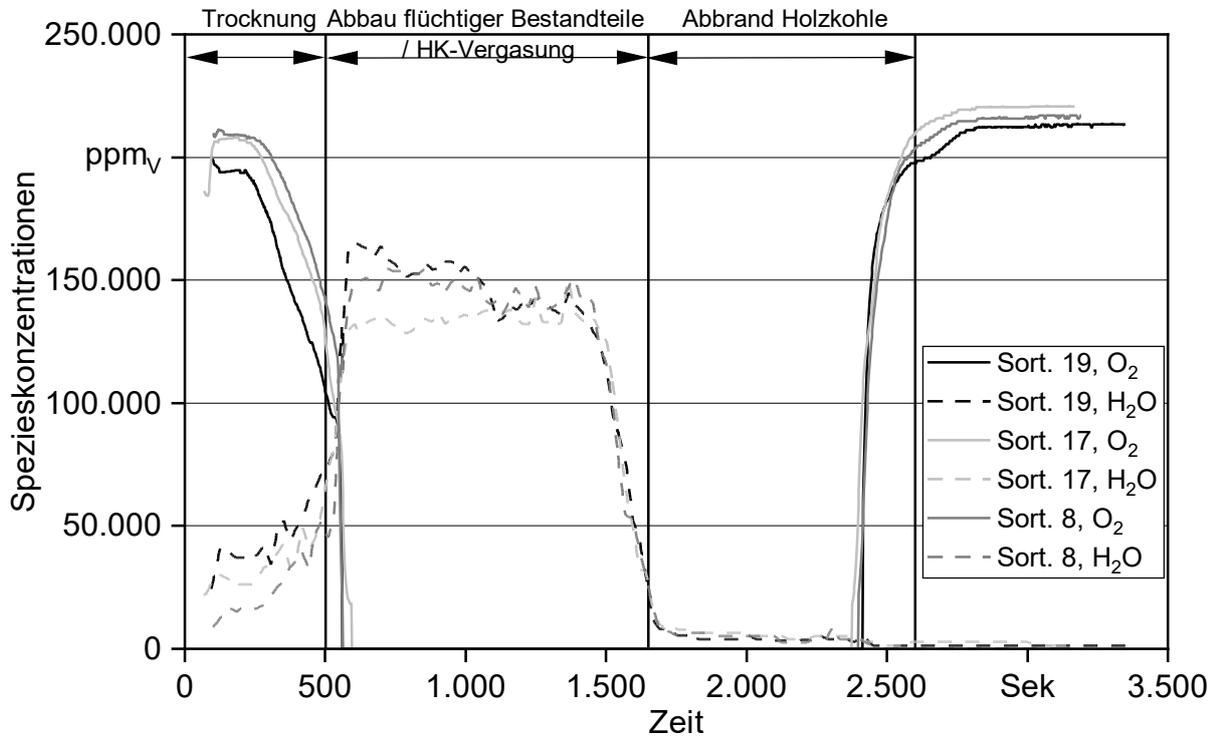


Abbildung 214: Laborreaktor-testläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der CO-, CO₂- und CH₄-Gehalte im Abgas

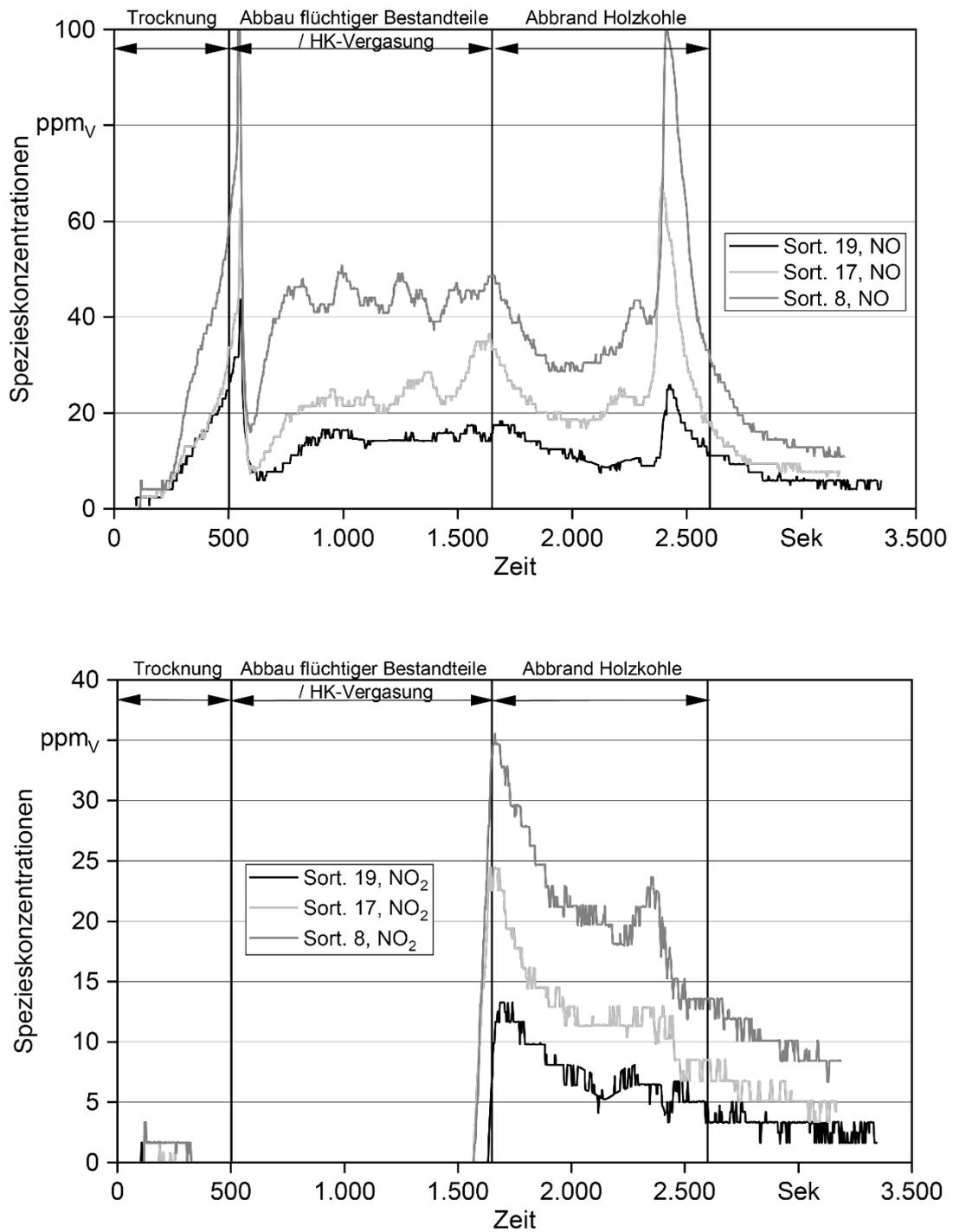


Abbildung 215: Laborreaktorstläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der NO- und NO₂-Gehalte im Abgas

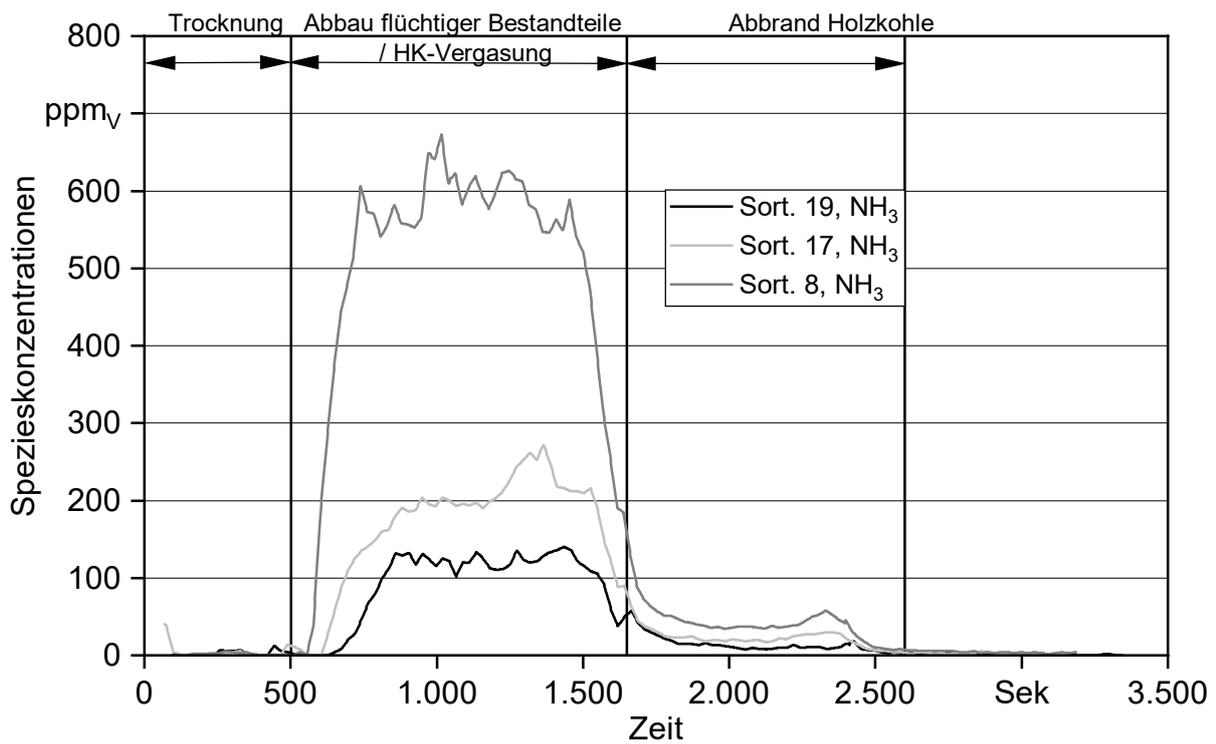
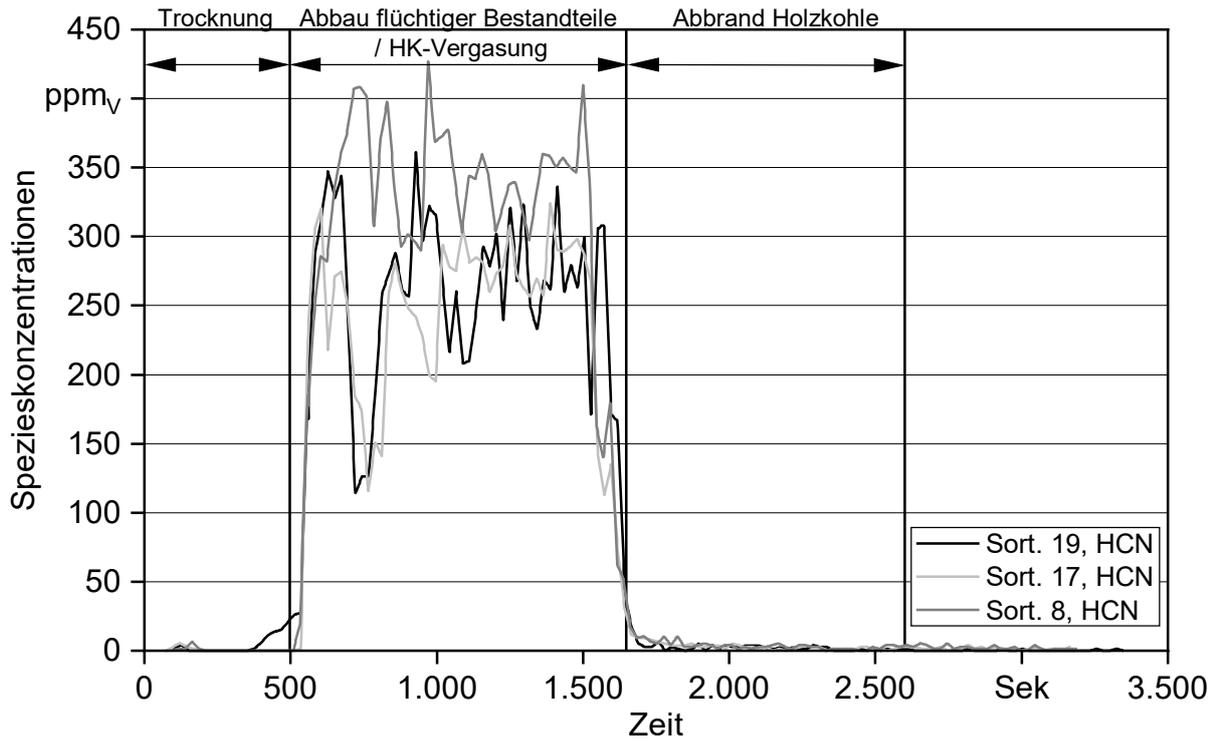


Abbildung 216: Laborreaktorstestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Verläufe der NH₃- und HCN-Gehalte im Abgas

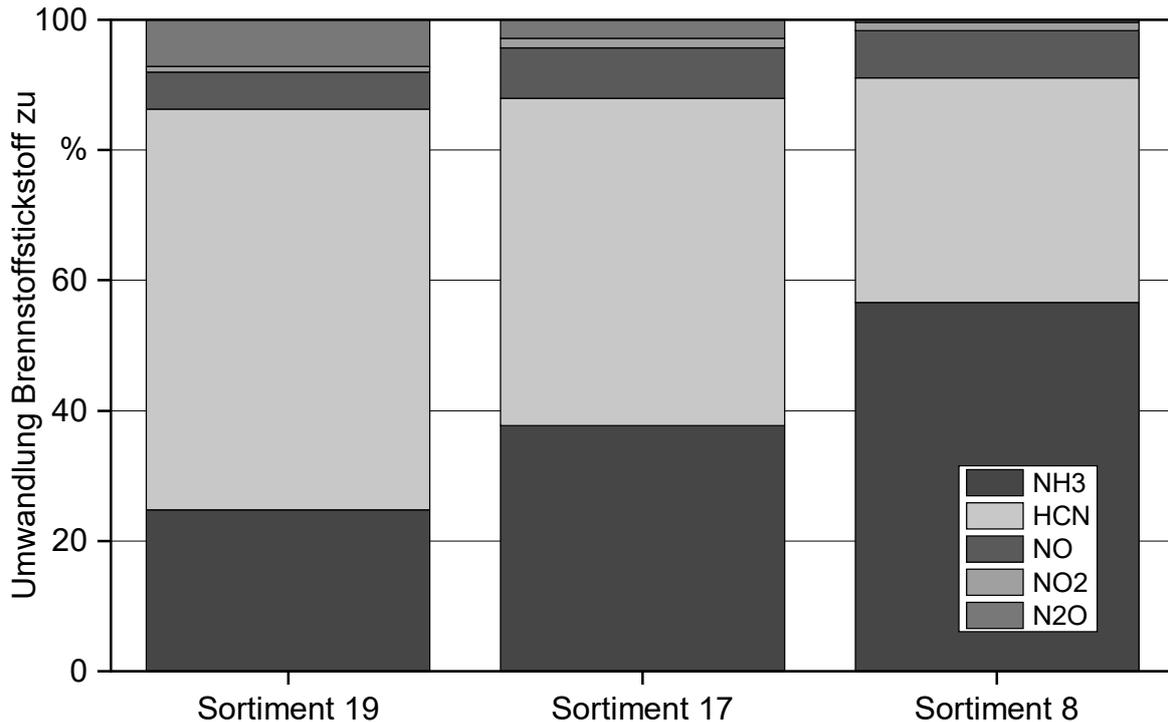


Abbildung 217: Laborreaktorstestläufe mit marktverfügbaren zertifizierten Pelletsortimenten – Aufteilung der N-Spezies im Abgas in m-%

Da die eingangs erläuterten Verläufe wesentlicher Prozessparameter für die drei untersuchten Sortimente sehr ähnlich sind, zeigen sich auch keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der charakteristischen Größen wie der maximalen Betttemperatur, der Fortschrittsgeschwindigkeit der Reaktionsfront, der durchschnittlichen Abbauraten während der Pyrolyse und der durchschnittlichen Abbauraten während des Holzkohlenausbrands. Auch die charakteristischen Abbrandzeiten liegen auf gut vergleichbaren Niveaus. Bezüglich des Abbrandverhaltens im Laborreaktor konnten somit keine nennenswerten Unterschiede zwischen den drei untersuchten marktverfügbaren Sortimenten festgestellt werden.

Beim Stickstoffgehalt der untersuchten Sortimente zeigen sich Unterschiede, die sich in den Freisetzungskurven der stickstoffhaltigen Spezies (siehe Abbildung 215 und Abbildung 216) widerspiegeln. Die Auswertung dieser Trends (siehe auch Abbildung 217) zeigt, dass generell HCN und NH₃ die höchsten Anteile an den freigesetzten N-Komponenten aufweisen, wobei HCN bei Sortiment 17 und 19 und NH₃ bei Sortiment 8 dominieren. Die Laborreaktorstests mit Pellets aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien (siehe Abschnitt 8.2.2) zeigten, dass bei Nadelholzpellets HCN einen deutlich höheren Anteil an den freigesetzten Stickstoffkomponenten aufweist als NH₃, während bei Pellets aus Laubhölzern im Vergleich zu Nadelhölzern verstärkt NH₃ freigesetzt wird (siehe Abbildung 234). Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Erfahrungen von BIOS aus anderen Laborreaktorstestläufen. Während sich somit die Sortimente 17 und 19 bezüglich der Freisetzung von N-Komponenten wie typische Nadelholzpellets verhalten, weist die erhöhte NH₃-Freisetzung bei Sortiment 8 auf einen gewissen Laubholzanteil hin. Dies wird allerdings nicht von den

NIR-Analysen (siehe Abbildung 44) bestätigt, die Sortiment 8 den Nadelholzpellets zuzuordnen.

8.2 Versuchspellets mit definierten Eigenschaften und Ausgangsmaterialien

8.2.1 Versuchspellets (Fichte) mit unterschiedlichen Längen

In einer zweiten Versuchsserie wurde die Auswirkung unterschiedlicher Pelletlängen auf das Abbrandverhalten im Laborreaktor untersucht. In Abbildung 218 sind die mittleren Längen und die Standardabweichungen der Längen der untersuchten Fichtenpellet-Sortimente dargestellt. Die Bestimmungen erfolgten jeweils mit dem Gerät pelletVision und mit der von BIOS entwickelten fotometrischen Methode, wobei die beiden Methoden eine gute Übereinstimmung zeigen.

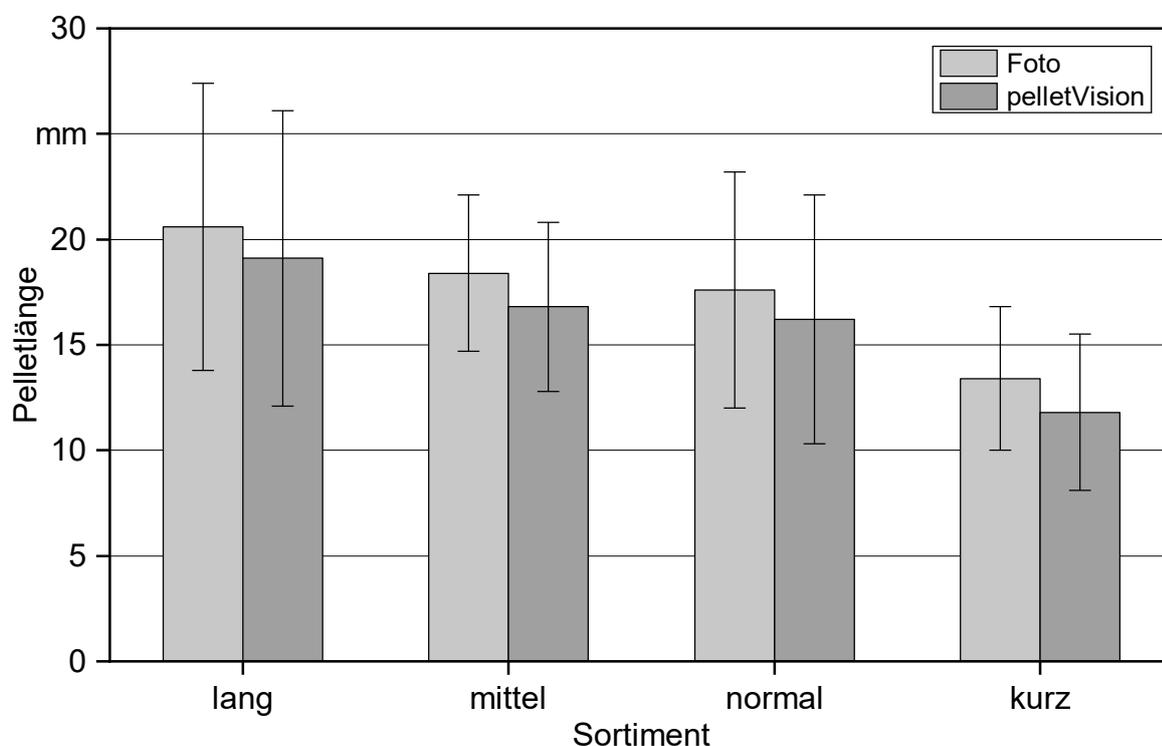


Abbildung 218: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – mittlere Längen der eingesetzten Sortimente

Pro Sortiment erfolgten zwei Testläufe, um die Wiederholbarkeit zu prüfen. Da sich bei allen drei Sortimenten eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Testläufe ergab, werden im Folgenden immer nur die Ergebnisse eines Testlaufs präsentiert. In Tabelle 63 sind relevante Eckdaten zu den Testläufen zusammengefasst.

Da aus unterschiedlichen Pelletlängen auch unterschiedliche Schüttdichten resultieren und immer dasselbe Brennstoffvolumen eingesetzt wurde, ergeben sich gewisse Abweichungen bezüglich der Einwaagen bei den einzelnen Testläufen (480 bis 520 g), wobei

der längenabhängige Trend bei den Schüttdichten (kürzere Pellets bedingen höhere Schüttdichten) zu erkennen ist. Das Sortiment „mittel“ stellt hierbei eine Ausnahme dar, da dort der Anteil kurzer Pellets durch Aussieben bewusst niedrig gehalten wurde. Wie schon bei den Testläufen mit den marktverfügbaren Sortimenten schließen sich auch hier die Bilanzen bezüglich C, H und O mit ausreichender Genauigkeit. Bei allen Abbrandtests wurden gut vergleichbare maximale Betttemperaturen festgestellt. Unterschiede sind jedoch bei der Abbranddauer bezogen auf die unterschiedlichen Abbrandphasen festzustellen. Die Daten dazu sind in Abbildung 219 visualisiert. Abbildung 220 bis Abbildung 223 zeigen die Verläufe der Massenverluste und Betttemperaturen sowie der Hauptkomponenten O₂, H₂O, CO, CO₂ und CH₄ über die einzelnen Testläufe.

Tabelle 63: Laborreaktor-testläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längen – Eckdaten

Sortiment		kurz	mittel	normal	lang
Ein-, Auswaage					
Einwaage (Brennstoff)	[g FS]	520,0	515,0	500,0	480,0
Einwaage (Brennstoff)	[g TS]	479,0	474,4	461,6	444,5
Auswaage (Asche)	[g TS]	1,52	1,50	1,30	1,27
Charakteristische Kenngrößen					
maximale Betttemperatur	[°C]	1.135	1.113	1.112	1.103
Fortschrittsgeschwindigkeit der Reaktionsfront	[mm/s]	0,15	0,16	0,18	0,17
durchschnittliche Abbaurate während Pyrolyse (bezogen auf die freigesetzte Menge)	[%/min]	4,78	4,98	5,29	5,24
durchschnittliche Abbaurate während Holzkohlenausbrand (bezogen auf die freigesetzte Menge)	[%/min]	6,37	5,70	5,76	6,09
Ergebnisse der Elementbilanzierungen					
Kohlenstoff	[%]	107,7	109,7	108,7	105,9
Wasserstoff	[%]	102,7	101,1	101,7	102,0
Sauerstoff	[%]	112,6	113,6	111,5	113,3
Asche (ohne TIC und Aerosole)	[%]	108,7	108,3	96,4	97,8
Charakteristische Zeiten					
Dauer bis Zündung	[s]	470	466	522	500
Dauer Freisetzung Flüchtiger + Holzkohlevergasung	[s]	1.726	1.672	1.656	1.644
Dauer Restholzkohlenausbrand	[s]	942	1.052	1.042	986
Dauer gesamte Reaktionsphase (ab Zündung)	[s]	2.198	2.258	2.176	2.130

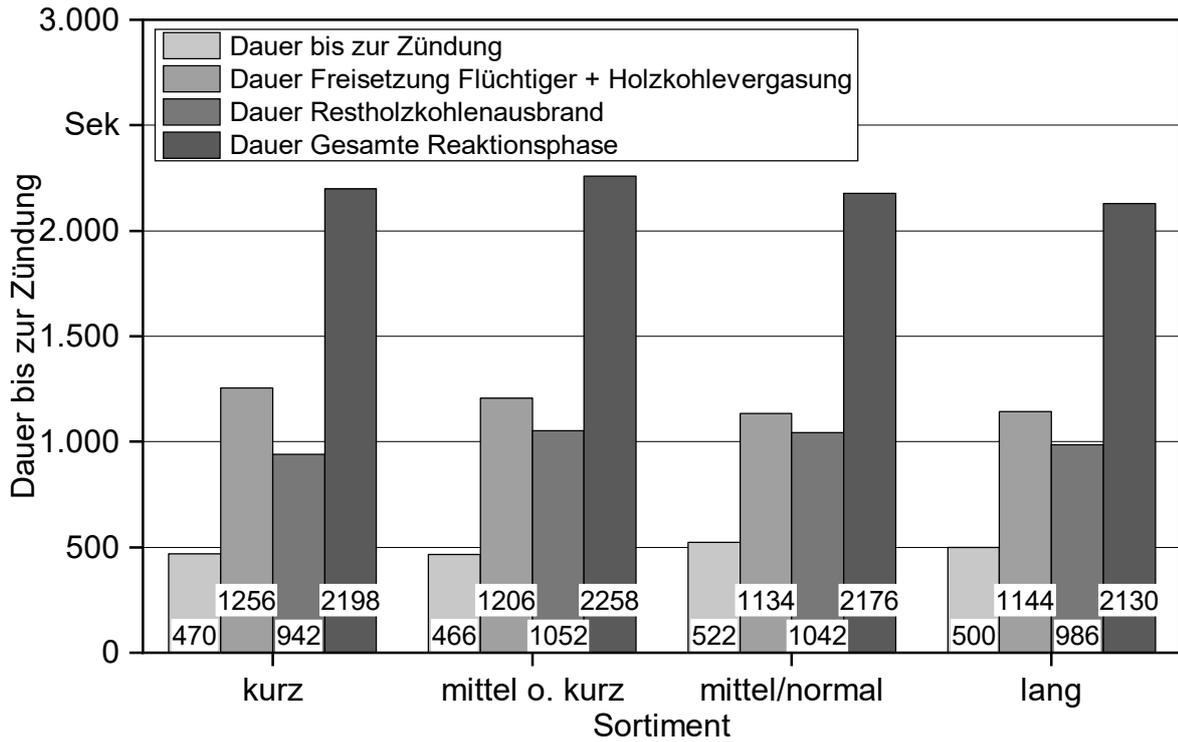


Abbildung 219: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Dauer der Abbrandphasen

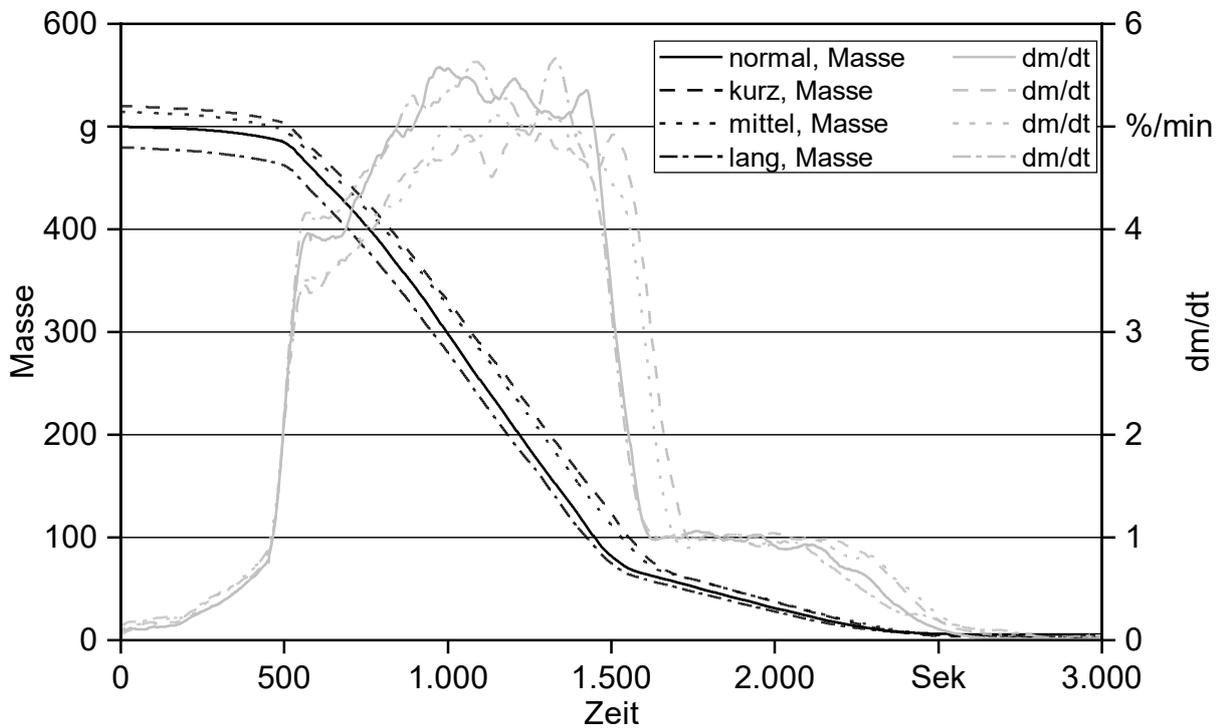


Abbildung 220: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Abbauraten (Reihung nach absteigender Schüttdichte)

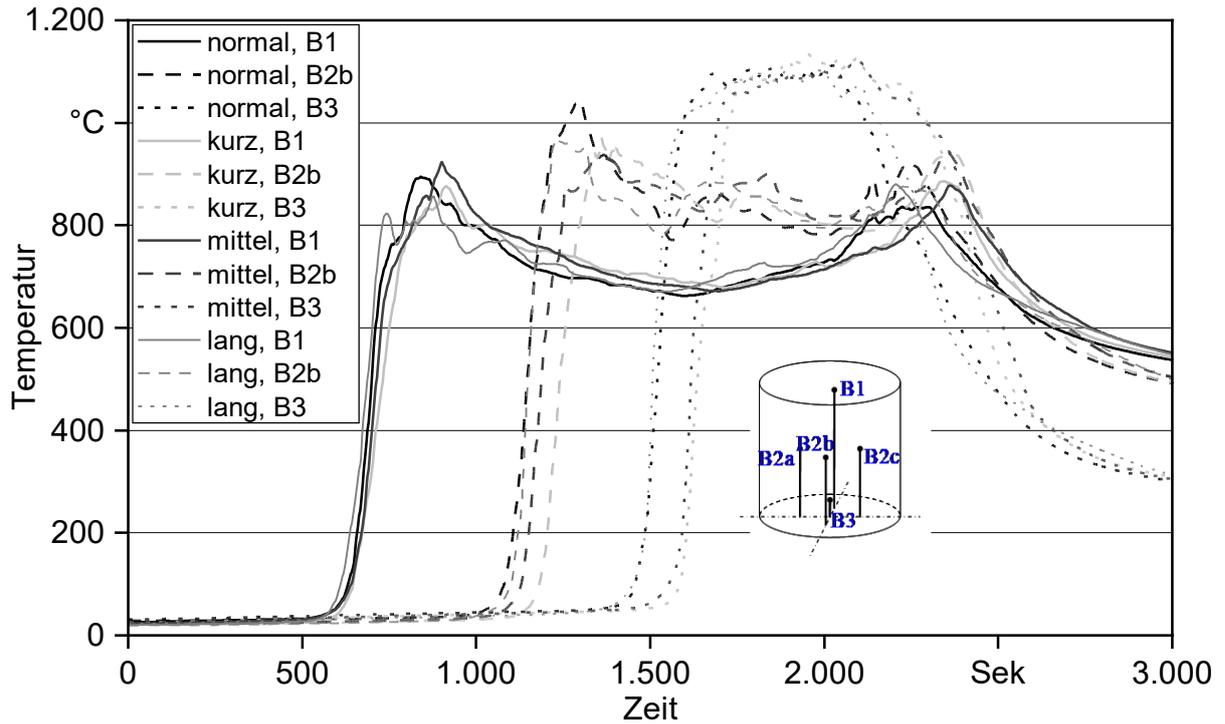


Abbildung 221: Laborreaktor testläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Betttemperaturen (Reihung nach absteigender Schüttdichte)

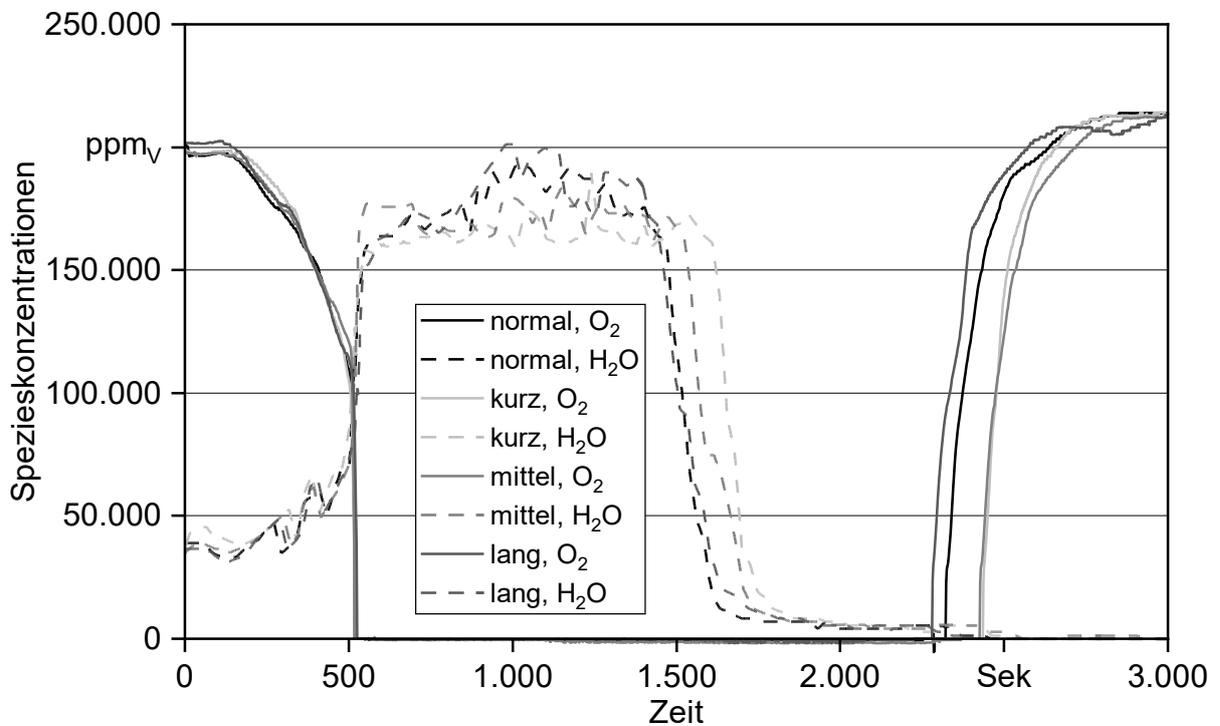


Abbildung 222: Laborreaktor testläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Verläufe der O₂- und H₂O-Gehalte im Abgas (Reihung nach absteigender Schüttdichte)

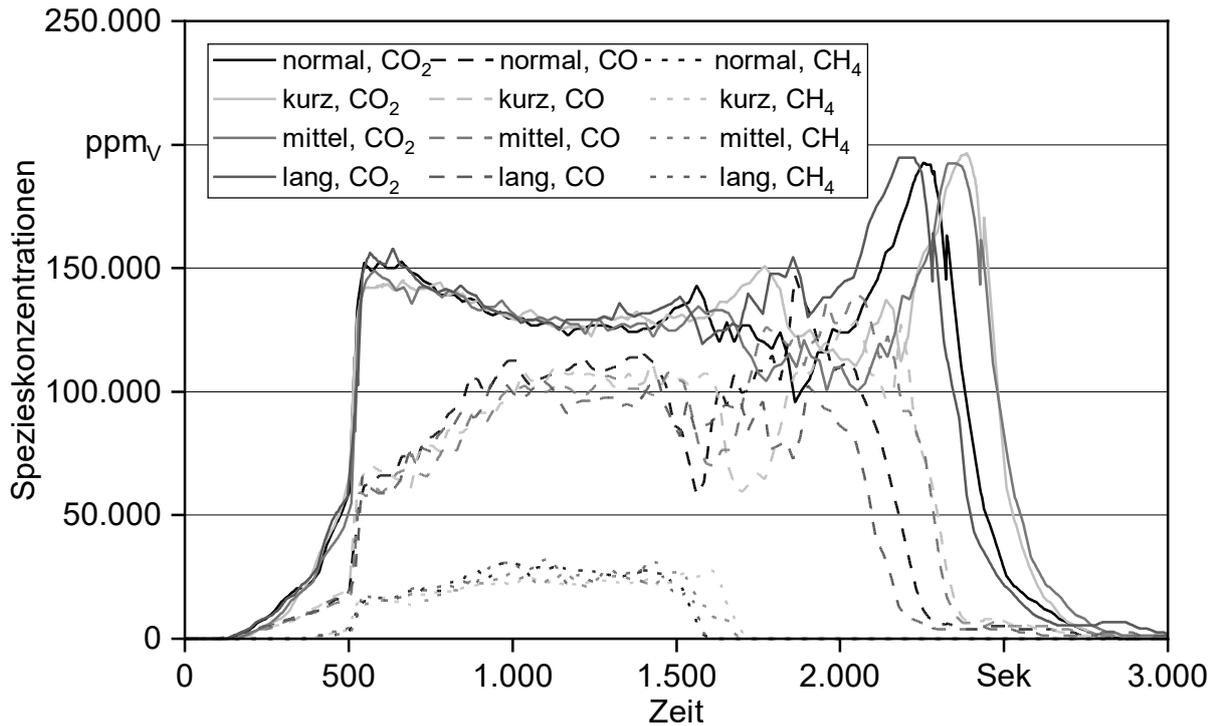


Abbildung 223: Laborreaktortestläufe mit Fichtenpellets mit unterschiedlichen Längenverteilungen – Verläufe der CO-, CO₂- und CH₄-Gehalte im Abgas (Reihung nach absteigender Schüttdichte)

Der Vergleich in Abbildung 219 zeigt, dass die Dauer der Flüchtigensfreisetzung tendenziell mit der Schüttdichte (und somit mit zunehmender Pelletlänge) abnimmt. Das zeigt sich nicht nur in der dargestellten Auswertung der Dauern der Reaktionsphasen, sondern auch im Vergleich der Massenabbau-Kurven und bei den Spezies-Verläufen (nicht dargestellt). Beim Vergleich der Dauer des Restholzkohleausbrands über die einzelnen Versuchsbrennstoffe zeigt sich dieser Trend nicht. Auch ist kein eindeutiger Trend bezüglich des Einflusses der Längenverteilung auf den Zeitpunkt der Zündung zu erkennen. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass ein Einfluss unterschiedlicher Pelletlängen auf das Abbrandverhalten besteht, nämlich dass kurze Pellets flüchtige Komponenten langsamer freisetzen als längere. Längere Pellets brennen somit schneller ab als kürzere, was auch durch die mit dem im Projekt neu entwickelten Bettabbrandmodell durchgeführten Simulationsrechnungen bestätigt wurde (siehe Berichtsteil II).

8.2.2 Versuchspellets aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Holzart (= des Ausgangsmaterials von Pellets) auf den Bettabbrand wurde eine Testlaufserie mit Pellets aus den Holzarten Eiche, Buche, Tropenholz (= Sortiment 26), Lärche, Kiefer und Fichte durchgeführt. Pro Sortiment erfolgten dabei zwei Testläufe, um die Wiederholbarkeit zu prüfen. Da sich bei allen Sortimenten eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Testläufe ergab, werden im Folgenden immer nur die Ergebnisse eines Testlaufs präsentiert.

In Tabelle 64 sind die wichtigsten Daten zu diesen Testläufen zusammengefasst. Abbildung 224 bis Abbildung 230 zeigen die Verläufe der Massenverluste und Betttemperaturen sowie der Hauptkomponenten O₂, H₂O, CO, CO₂ und CH₄ über die einzelnen Testläufe. Die Kurven wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf der Zeitachse so verschoben, dass die Zündung (definiert durch die Anstiegsflanke der dm/dt-Kurve) für alle dargestellten Versuche zusammenfällt. Unterschiede in der Dauer bis zur Zündung sind daher in den Diagrammen nicht erkennbar. Es kann vorweg generell gesagt werden, dass die thermische Zersetzung der untersuchten Sortimente erwartungsgemäß dem Schema folgte, das bereits in Unterkapitel 8.1 im Detail erläutert wurde. In Abbildung 234 sind die relativen Aufteilungen der N-haltigen Spezies (NO_x-Vorläufersubstanzen) für die Testläufe zusammengefasst. In Abbildung 235 sind Bilder der eingesetzten Pelletsortimente sowie der Rückstände der Testläufe (= Aschen) dargestellt.

Die Schüttgewichte der untersuchten Pelletsortimente liegen zwischen 650 kg/m³ (Sortiment 26) und 700 kg/m³ Lärche, weshalb sich auch (wie schon bei den Längenvorgängen) etwas abweichende Einwaagen ergaben. Außerdem ist bezüglich der unterschiedlichen Sortimente anzumerken, dass die Partikeldichten zwischen 1.247 kg/m³ (Sortiment 26) und 1.319 kg/m³ (Lärche) variierten und auch die Aschegehalte (TIC-frei) stark streuten (zwischen 0,19 m-% TS für Eiche und 0,57 m-% für Kiefer). Letzterem entsprechend streut auch der Ascheanfall in Tabelle 64 erheblich. Die Wiederfindungsraten (Tabelle 64) für die Asche ($\text{Auswaage} \div \text{Brennstoffeinsatz} \times \text{Aschegehalt} \times 100$) liegen mit 81,4 bis 97,3 % in einem akzeptablen Bereich. Da auch die Elementbilanzen für C, H und O zwischen 99 % und 117 % liegen, können die Testlaufergebnisse als plausibel bewertet werden.

Bezüglich der Dauer der Abbrandphasen lassen sich wesentliche Unterschiede feststellen. Die Zeit bis zur Zündung ist für Lärchenpellets mit 898 s deutlich länger als für die anderen Holzarten. Die schnellste Zündung erfolgt für Tropenholz und Buche (296 bzw. 308 s). Die Dauer der Phase „Freisetzung flüchtiger Komponenten und Holzkohlevergasung“ schwankt hingegen nur in einem engen Bereich zwischen 1.116 s (Lärche) und 1.284 s (Tropenholz). Die Dauer des Restholzkohleausbrands hingegen variiert zwischen 886 s (Kiefer) und 1.268 s (Lärche).

Bei der Fortschrittsgeschwindigkeit der Reaktionsfront während der Pyrolyse zeigen sich für Lärche und Fichte (0,2 und 0,19 mm/s) höhere Werte als für die anderen Hölzer (0,15 bis 0,17 mm/s). Die durchschnittlichen Abbauraten während der Pyrolyse sind für Lärche (5,38 %/min) am höchsten und für Tropenholz (4,67 %/min) am geringsten. Eiche, Buche, Fichte und Kiefer liegen bei ca. 4,77–5,05 %/min.

Tabelle 64: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Eckdaten

Sortiment		Eiche	Buche	Trpnh.	Lärche	Kiefer	Fichte
Ein-, Auswaage und Aschebilanz							
Einwaage (Brennstoff)	[g FS]	520,0	530,0	490,0	500,0	500,0	500,0
Einwaage (Brennstoff)	[g TS]	483,1	497,0	447,8	451,4	456,4	466,8
Auswaage (Asche)	[g TS]	0,84	2,27	2,20	1,29	1,98	1,45
Auswaage Asche (ohne TIC und TOC)	[g TS]	0,67	1,95	2,09	1,10	1,95	1,30
Erwarteter Ascheanfall (ohne TIC)	[g TS]	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Charakteristische Kenngrößen							
maximale Betttemperatur	[°C]	1.065	1.049	1.096	1.060	1.143	1.098
Fortschrittsgeschwindigkeit der Reaktionsfront	[mm/s]	0,17	0,16	0,15	0,20	0,16	0,19
durchschnittliche Abbaurate während Pyrolyse (bez. auf die freigesetzte Menge)	[%/min]	5,02	4,78	4,67	5,38	5,05	4,77
Durchschnittliche Abbaurate während Holzkohleausbrand (bez. auf die freigesetzte Menge)	[%/min]	5,05	6,09	6,37	4,73	5,28	6,77
Ergebnisse der Elementbilanzierungen							
Kohlenstoff	[%]	110,2	113,0	109,2	108,2	106,8	99,5
Wasserstoff	[%]	101,1	99,8	102,5	100,8	98,8	101,6
Sauerstoff	[%]	116,8	117,3	115,9	111,8	115,4	111,4
Asche (ohne TIC und Aerosole)	[%]	92,9	95,7	92,3	93,1	81,4	97,3
Charakteristische Zeiten							
Dauer bis Zündung	[s]	382	308	296	898	396	358
Dauer Freisetzung Flüchtiger + Holzkohlevergasung	[s]	1.196	1.256	1.284	1.116	1.188	1.258
Dauer Restholzkohleausbrand	[s]	1.188	986	942	1.268	1.136	886
Dauer gesamte Reaktionsphase (ab Zündung)	[s]	2.384	2.242	2.226	2.384	2.324	2.144

In Abbildung 224 bis Abbildung 233 sind die Trends wesentlicher Parameter über die Laborreaktortestläufe zusammengefasst. Die Kurven wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf der Zeitachse so verschoben, dass die Zündung (definiert durch die Anstiegsflanke der dm/dt -Kurve) für alle dargestellten Versuche zusammenfällt. Unterschiede in der Dauer bis zur Zündung sind daher in den Diagrammen nicht erkennbar.

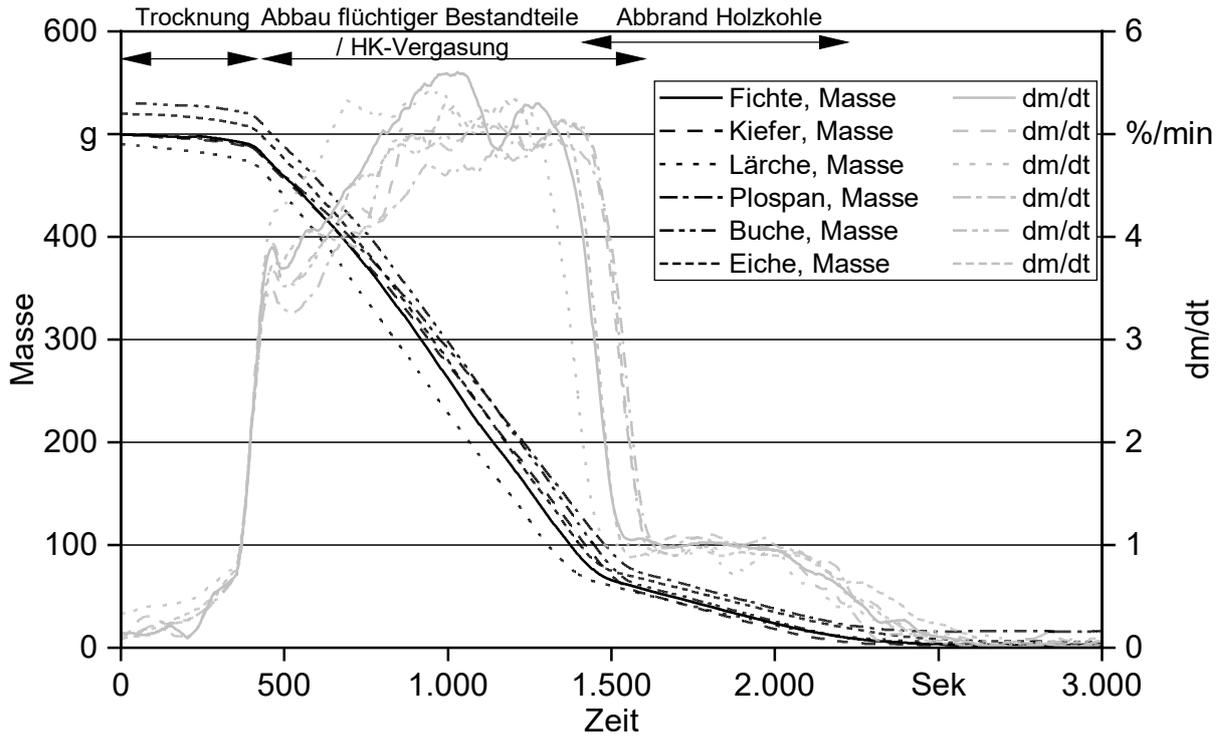


Abbildung 224: Laborreaktorstestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Massenabbau

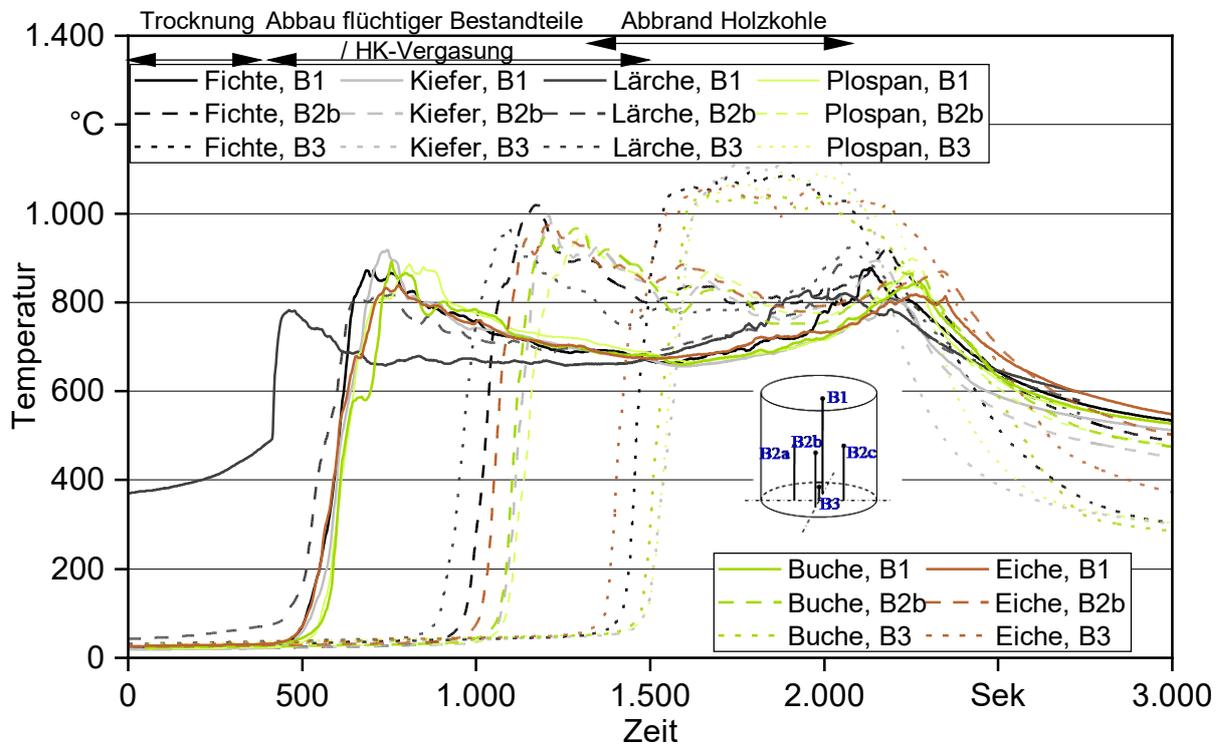


Abbildung 225: Laborreaktorstestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Betttemperaturen

Das im Vergleich zu den anderen Hölzern deutlich unterschiedliche Verhalten der Lärchenpellets (langsame Zündung, schneller Abbau) spiegelt sich in den Temperaturverläufen und im Massenabbau wider (Abbildung 224 und Abbildung 225). Die charakteristischen Temperaturanstiege an den einzelnen Messpositionen erfolgen bei Lärche schneller und die Zeit zwischen den beiden Knickpunkten der Massenabbaukurve ist kürzer. Die während des Abbrands im Bett erreichten Maximaltemperaturen liegen zwischen 1.049 °C (Buche) und 1.143 °C (Kiefer).

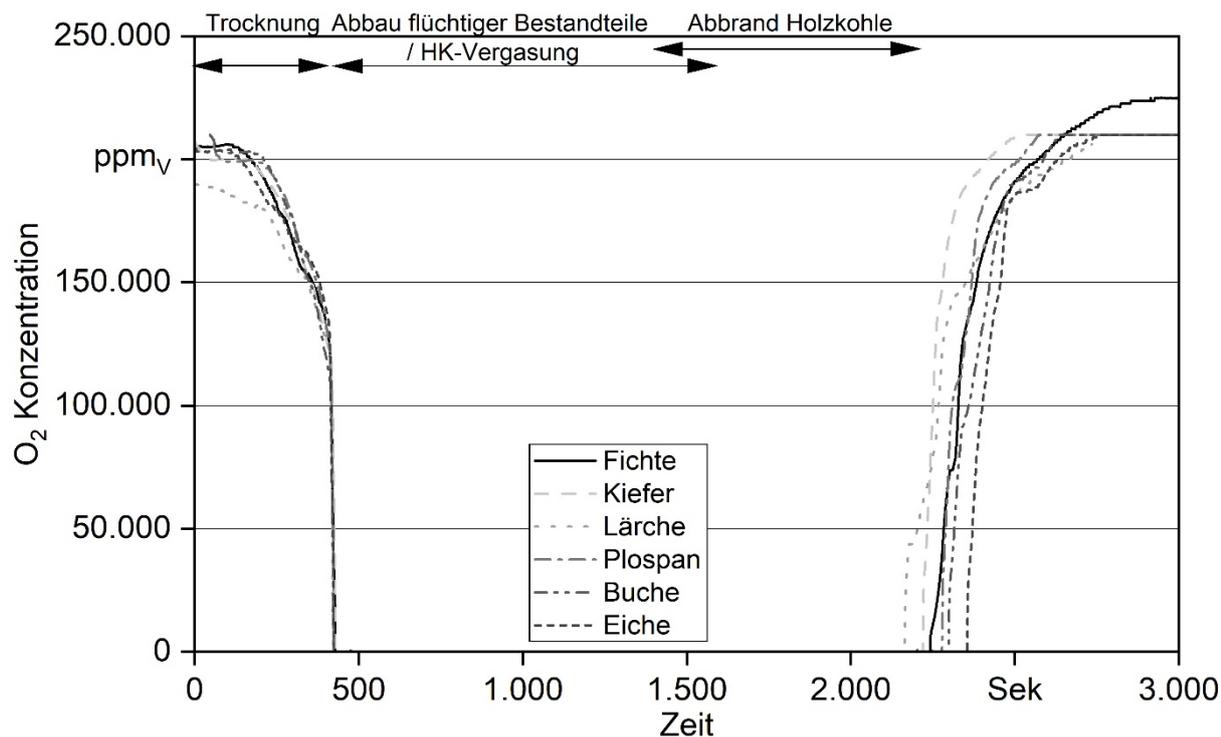


Abbildung 226: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – O₂-Konzentrationen

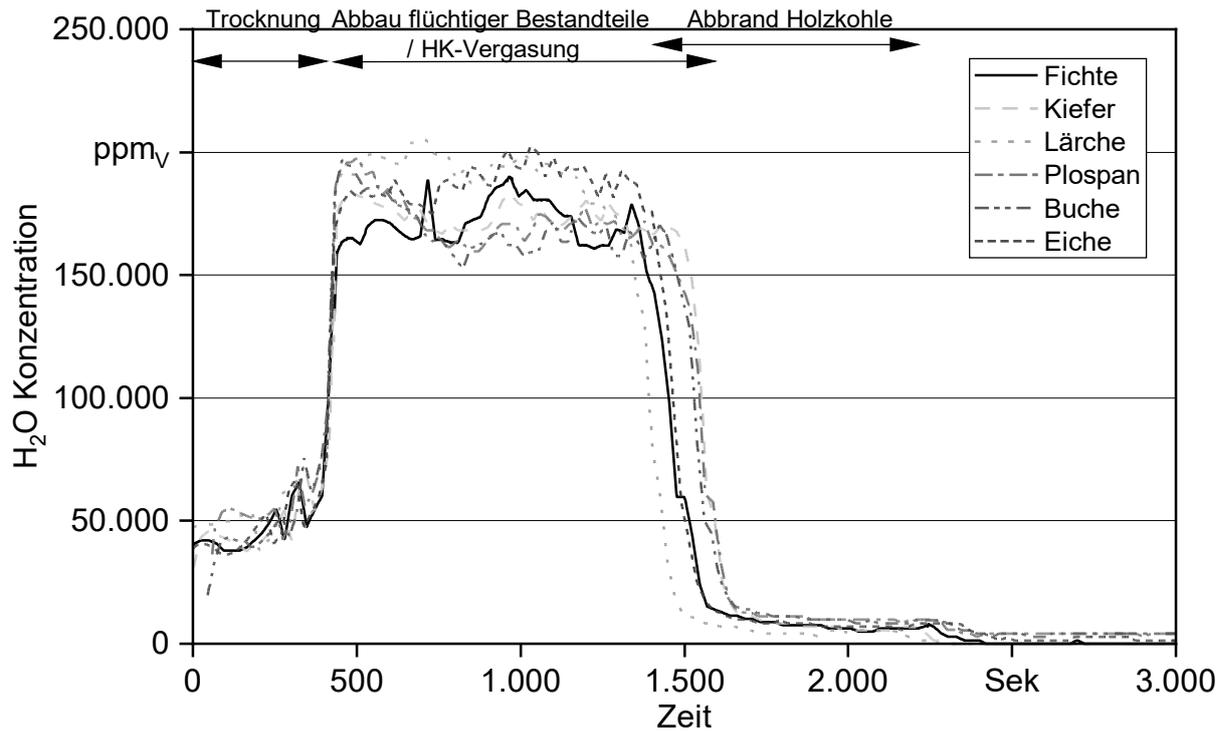


Abbildung 227: Laborreaktorstestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – H₂O-Konzentrationen

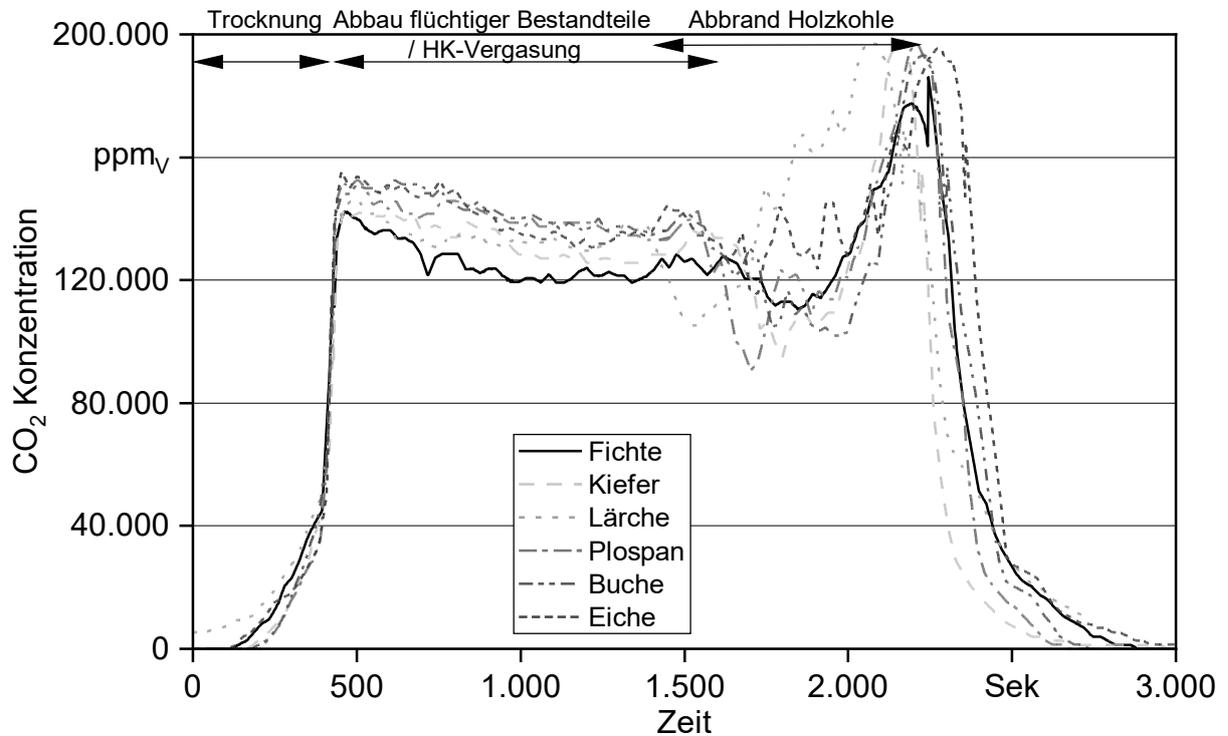


Abbildung 228: Laborreaktorstestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – CO₂-Konzentrationen

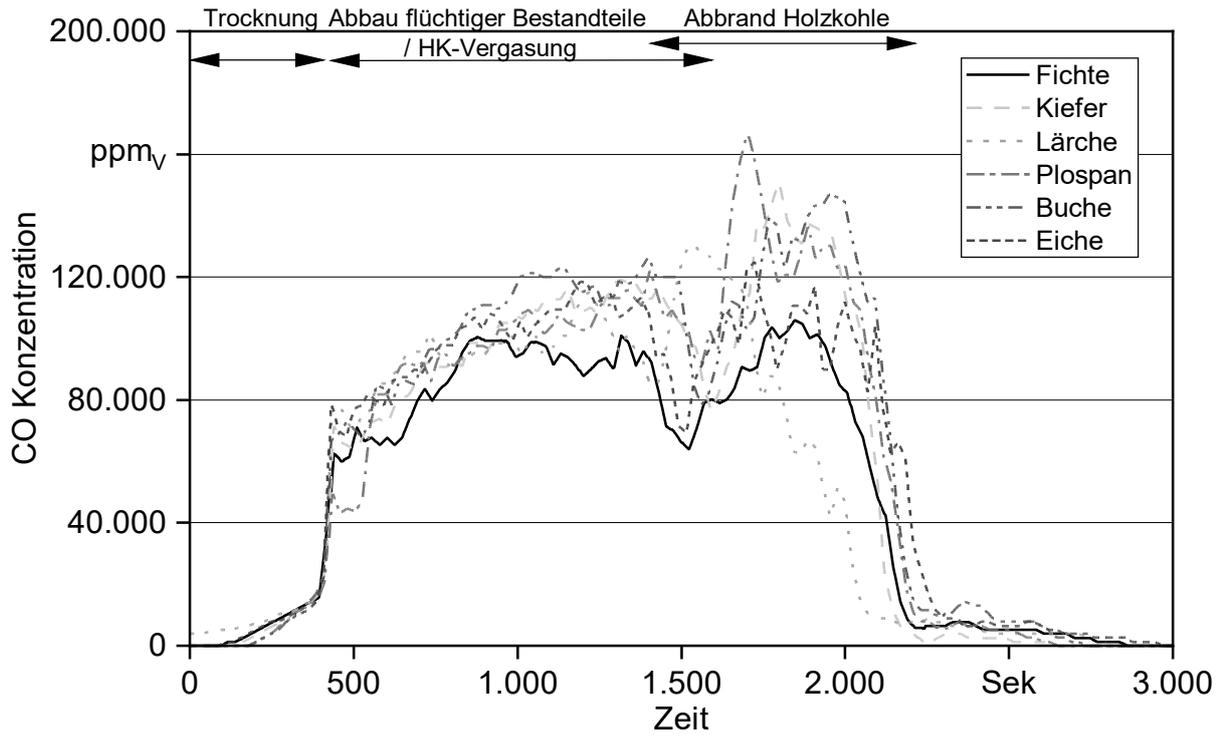


Abbildung 229: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – CO-Konzentrationen

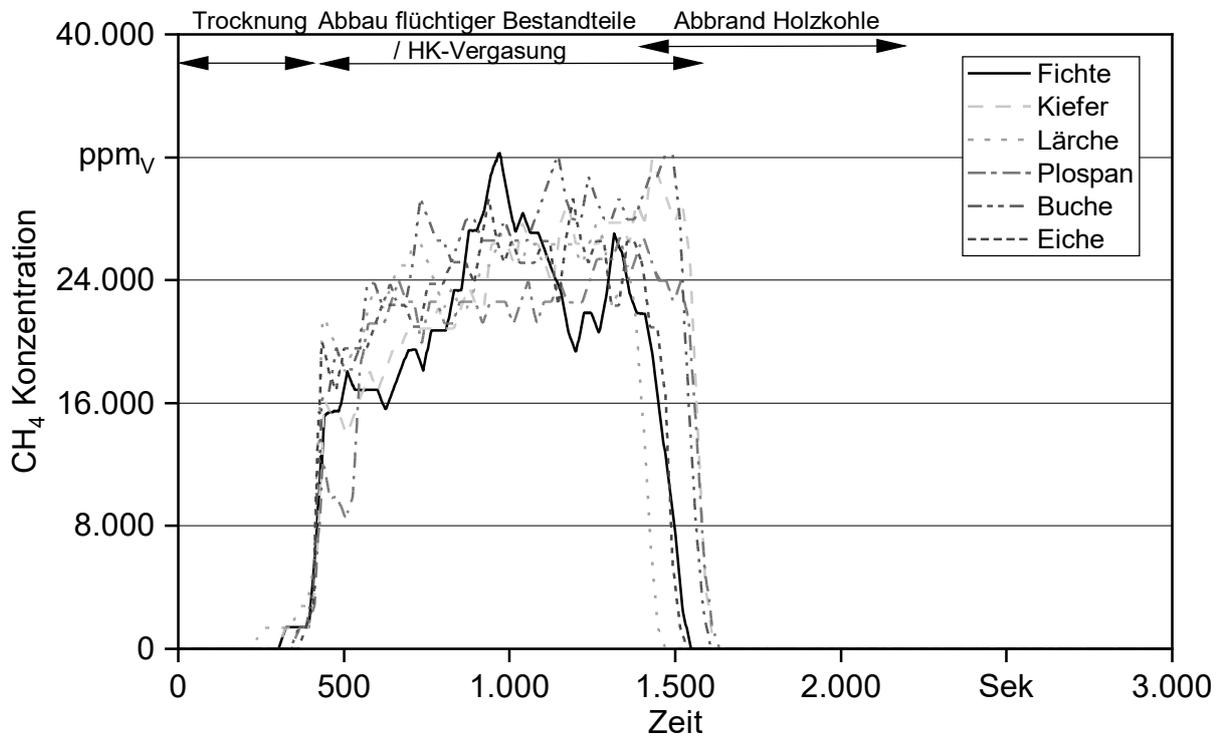


Abbildung 230: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – CH₄-Konzentrationen

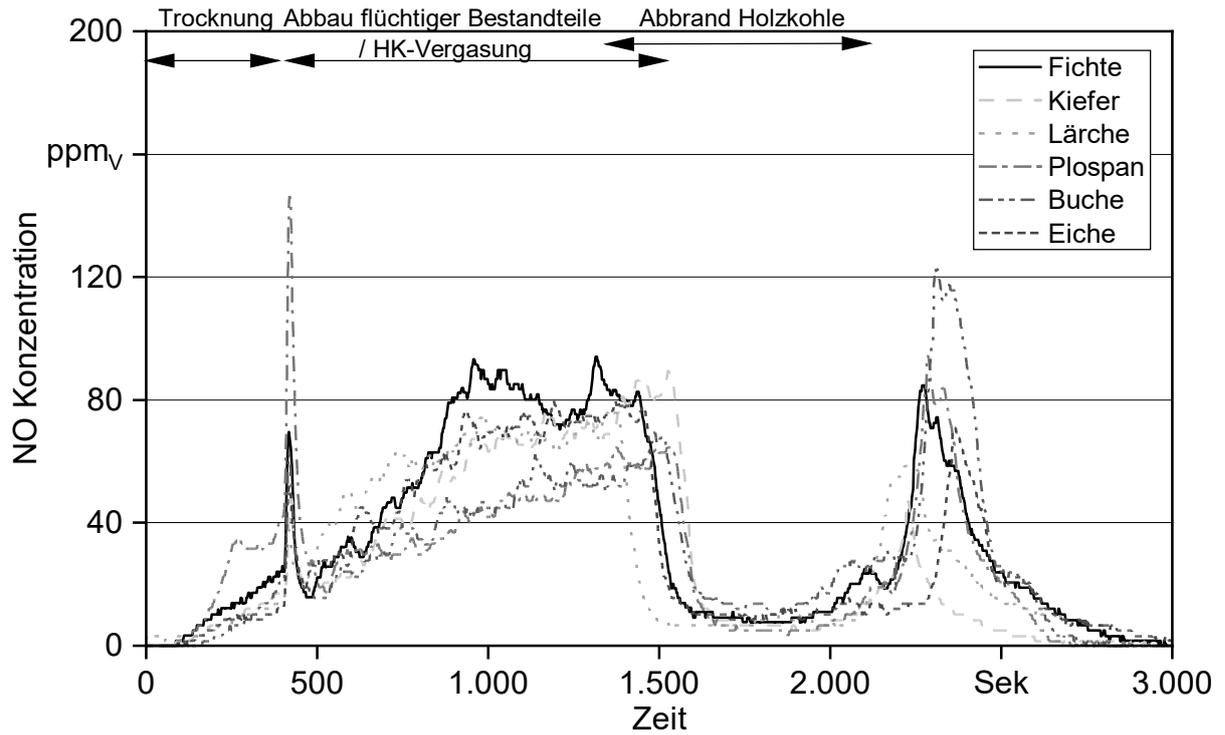


Abbildung 231: Laborreaktorstestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – NO-Konzentrationen

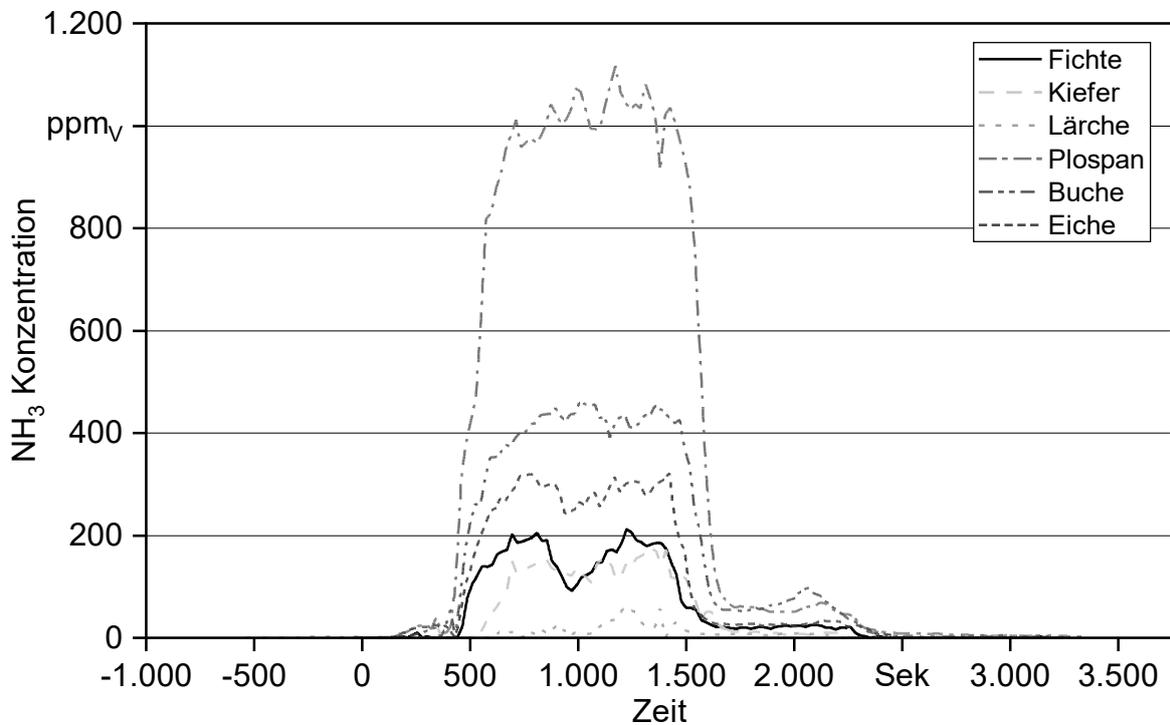


Abbildung 232: Laborreaktorstestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – NH₃-Konzentrationen

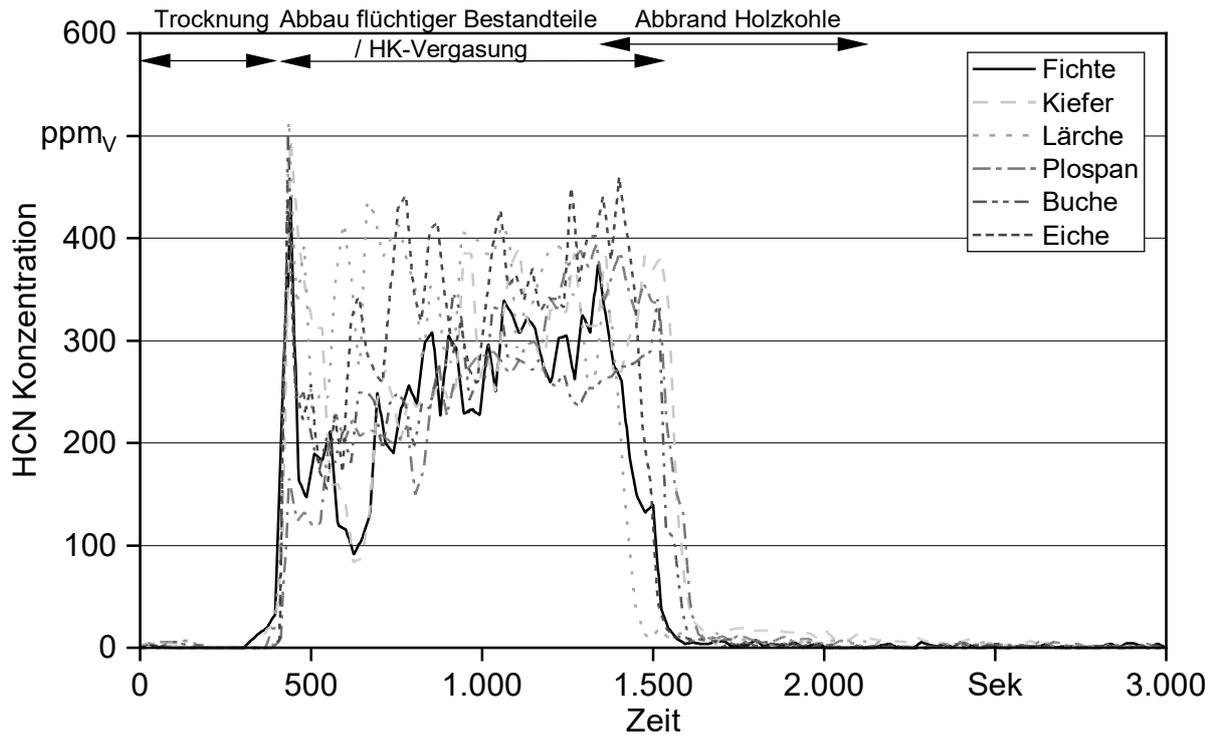


Abbildung 233: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – HCN-Konzentrationen

Hinsichtlich der Gasspeziesverläufe sind O_2 , H_2O und CH_4 gemäß der Dauer der einzelnen Abbrandphasen gegeneinander verschoben, gleichen sich aber in Bezug auf die Maxima und die Verläufe. In Bezug auf CO_2 und CO zeigen sich Unterschiede zwischen Lärche und den anderen Holzarten. Die CO_2 -Konzentrationen zeigen während des Holzkohle-Ausbrands einen charakteristischen Anstieg, der bei Lärchenpellets allerdings deutlich früher als bei den anderen betrachteten Pelletsortimenten erfolgt. Auch die CO -Konzentrationen steigen für Lärche zu einem früheren Zeitpunkt an, um dann früher als bei den anderen Hölzern wieder zu sinken.

Bezüglich der Stickstofffreisetzung lassen sich deutliche Unterschiede feststellen. Unter allen untersuchten Hölzern hat Tropenholz den höchsten Stickstoffgehalt. Im Vergleich der Verläufe der Spezieskonzentrationen ist das vor allem an der vermehrten Freisetzung von NH_3 sichtbar, während die anderen N-haltigen Spezies von allen Sortimenten in ähnlichem Maße freigesetzt werden. In Bezug auf die Aufteilung des freigesetzten Stickstoffs auf die Spezies NH_3 , HCN , NO , NO_2 und N_2O kann man zwischen drei Gruppen unterscheiden. Bei Harthölzern (Buche, Tropenholz) ist die Freisetzung NH_3 -dominiert, während bei Weichhölzern (Lärche, Kiefer, Fichte) HCN -dominiert. Eiche liegt zwischen diesen beiden Sortimenten mit ca. gleich großen HCN - und NH_3 -Anteilen.

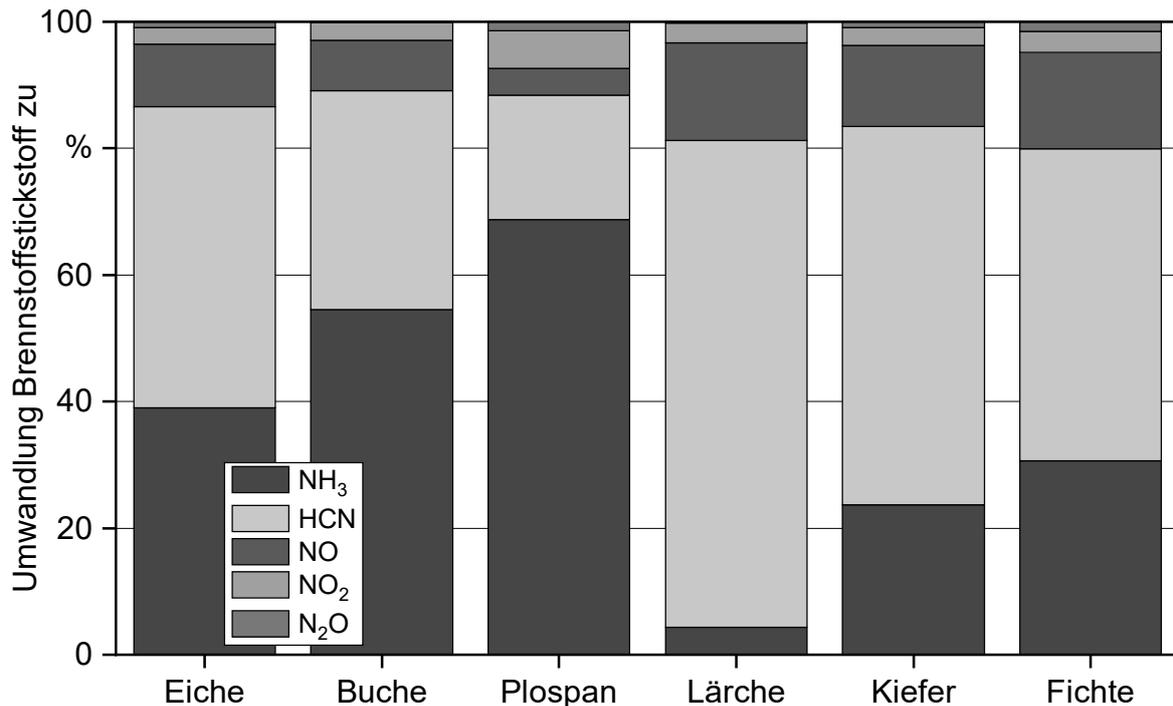


Abbildung 234: Laborreaktor-testläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Aufteilung der Stickstofffreisetzung auf relevante NO_x-Vorläufer-substanzen (in m-%)

Bei optischer Beurteilung (siehe Abbildung 235) des Einsatzmaterials zeigen Eiche, Buche und Tropenholz eine deutlich dunklere Färbung der Pellets als Lärche, Kiefer und Fichte. Die Oberfläche der Lärchenpellets erscheint im Vergleich zu den anderen Pellets härter und glänzender. Die optische Beurteilung der Rückstände (Aschen) ergibt auch deutliche Unterschiede bezüglich Färbung und Struktur. Bei Eiche, Buche und Fichte ist eine eher einheitliche Färbung feststellbar, während bei Tropenholz, Lärche und Kiefer am Rand des Rosts deutlich hellere (bräunliche) Aschen als in der Mitte zu sehen sind. Bezüglich der Struktur der Aschen ist bei allen Holzarten – ausgenommen Eiche – die zylindrische Form des Ausgangsmaterials (Pellets) noch zu erkennen. Der Durchmesser der Zylinder ist beim Rückstand der Kiefernpellets am größten, gefolgt von den Lärchenpellets. Das unterschiedliche Erscheinungsbild von Aschen aus dem Testlauf mit Eiche ist wahrscheinlich auf den geringen Aschegehalt (deutlich niedriger als bei den anderen Hölzern) zurückzuführen. Dieser führt zu einer geringeren Stabilität des Ascheskeletts und damit zu einem schnelleren Zerfallen der Asche. Es ist hervorzuheben, dass bei keinem der Testläufe Zeichen von Versinterungen oder Schlackenbildung optisch festgestellt werden konnten. Diese Beobachtung wurde durch die Ergebnisse von 3-D-Siebungen der Aschen durch das TFZ bestätigt. Diese zeigten für alle Brennstoffe außer Lärche Massenanteile von Partikeln > 1 mm von weniger als 20 %. Für Lärche liegt dieser Wert bei ca. 20 %. Man geht allgemein erst bei Werten über 20 % von deutlichen Versinterungstendenzen aus (siehe dazu auch 0 hinsichtlich gleichartiger Untersuchungen mit den Rückständen aus den Verbrennungstests an den Pelletöfen).

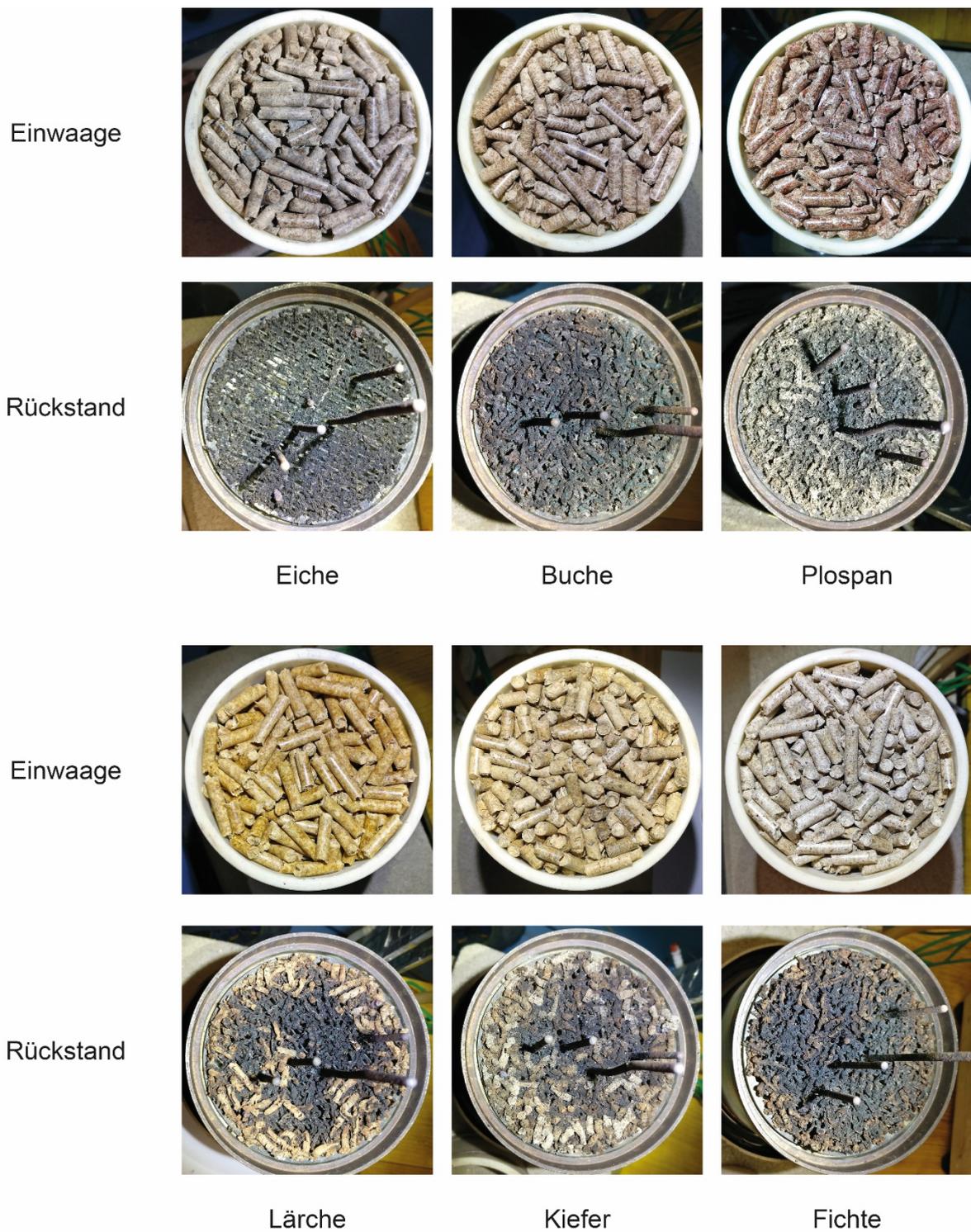


Abbildung 235: Laborreaktortestläufe mit Pelletsortimenten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien – Bilder der Brennstoffe und der Rückstände (Aschen)

8.3 Abbruchversuche

Im Normalfall läuft ein Laborreaktor-Testlauf, wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, bis zum vollständigen Ausbrand des Brennstoffs. Um zusätzlich Stoffdaten von Holzpellets bei unterschiedlichen Abbrandzuständen ermitteln zu können, wurde die Methodik der Laborreaktortestläufe so angepasst, dass die Reaktionen während des Abbrands plötzlich zum Erliegen gebracht werden konnten (siehe Abschnitt 4.4.5). Um den Zeitpunkt dieses Versuchsabbruchs genau zu definieren, wurden drei unterschiedliche Abbruchzeitpunkte (Abbruchkriterien) wie folgt festgelegt.

Abbruchkriterium 1 (AK-1): Während des Abbaus flüchtiger Bestandteile; definiert durch beginnenden Temperaturanstieg an den Sensoren B2a, B2b, B2c (Reaktionsfront erreicht Mitte des Brennstoffbetts)

Abbruchkriterium 2 (AK-2): Nach Beginn der Holzkohlen-Ausbrandphase; definiert durch Erreichen eines Temperaturmaximums an Sensor B3 (Reaktionsfront hat unteren Bereich des Brennstoffbetts passiert)

Abbruchkriterium 3 (AK-3): Kurz vor Ende der Holzkohlen-Ausbrandphase; definiert durch Abfall der Temperatur an Sensor B3 sowie Erreichen eines Maximums der CO₂-Konzentrationen im Abgas

So kann in weiterer Folge eine „Momentaufnahme“ des Brennstoffbetts zum Zeitpunkt des Abbruchs untersucht werden. Derartige Abbruchversuche wurden mit Fichtenpellets sowie mit den marktverfügbaren Sortimenten 8, 17 und 19 durchgeführt.

In Abbildung 236 bis Abbildung 238 sind beispielhaft für einen Referenztest mit Fichtenpellets sowie die beiden Testläufe mit Reaktionsabbruch (Abbruchkriterium 1 und 2 gemäß Abschnitt 4.4.5) die Massenabbauraten, Temperaturen und Spezieskonzentrationen dargestellt. Man kann am Verlauf des Waagensignals erkennen, dass durch die Spülung mit Stickstoff, die Deaktivierung der Reaktorbeheizung und das Entfernen der Probe aus dem Reaktor ein weiterer Massenabbau weitgehend unterbunden werden konnte, da die dm/dt -Kurve binnen weniger Sekunden deutlich abfällt. Die aus dem Referenztest erhaltenen Verläufe der Abbauraten, Temperaturen sowie Spezieskonzentrationen zeigen im Vergleich mit den Verläufen aus den Abbruchversuchen gute Übereinstimmungen (für die dargestellte Testserie wie auch für alle anderen).

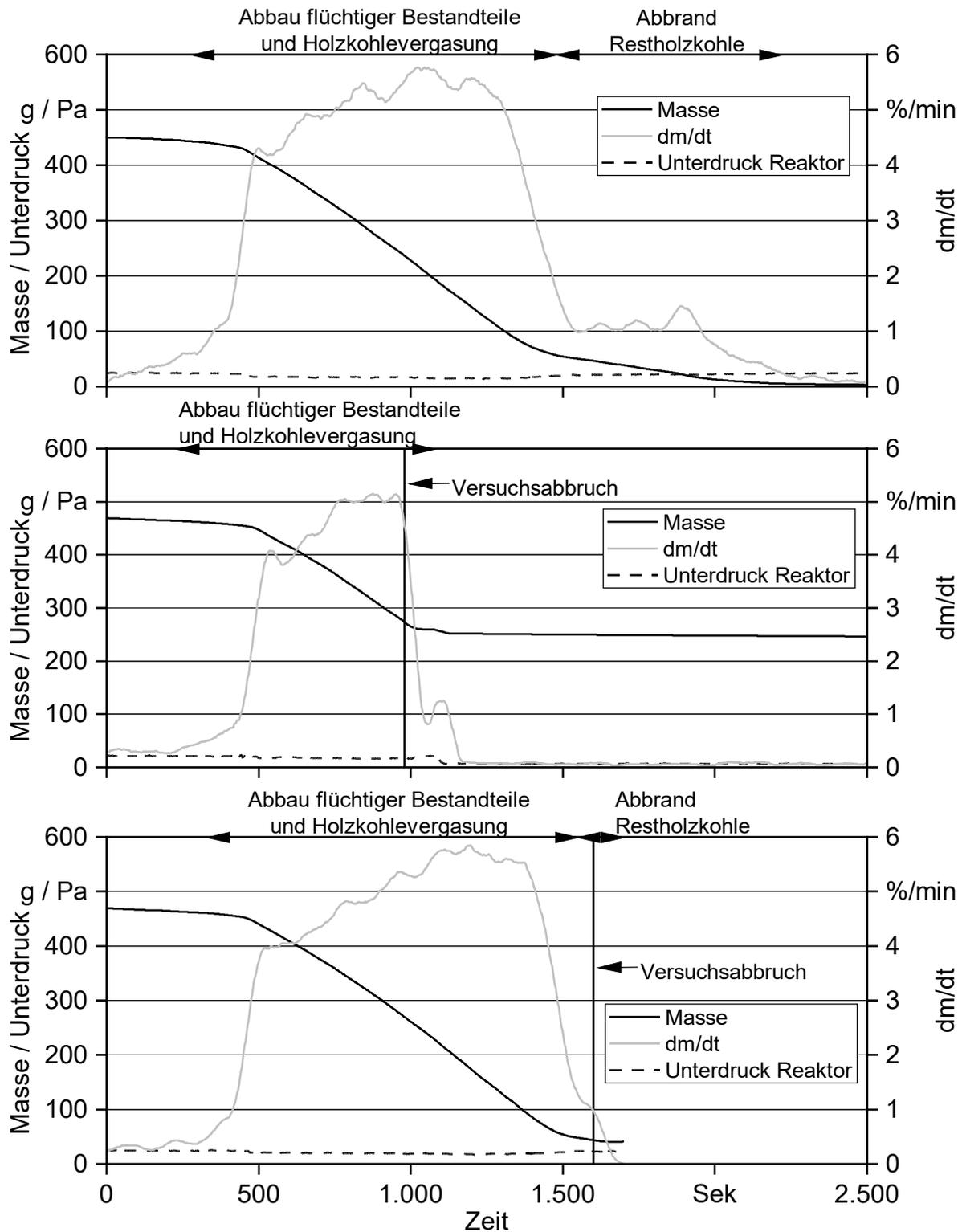


Abbildung 236: Laborreaktor testläufe mit Reaktionsabbruch – Vergleich der Massenabbauraten bei Testläufen mit Fichtenpellets (oben: Referenztest, Mitte: AK-1, unten: AK-2)

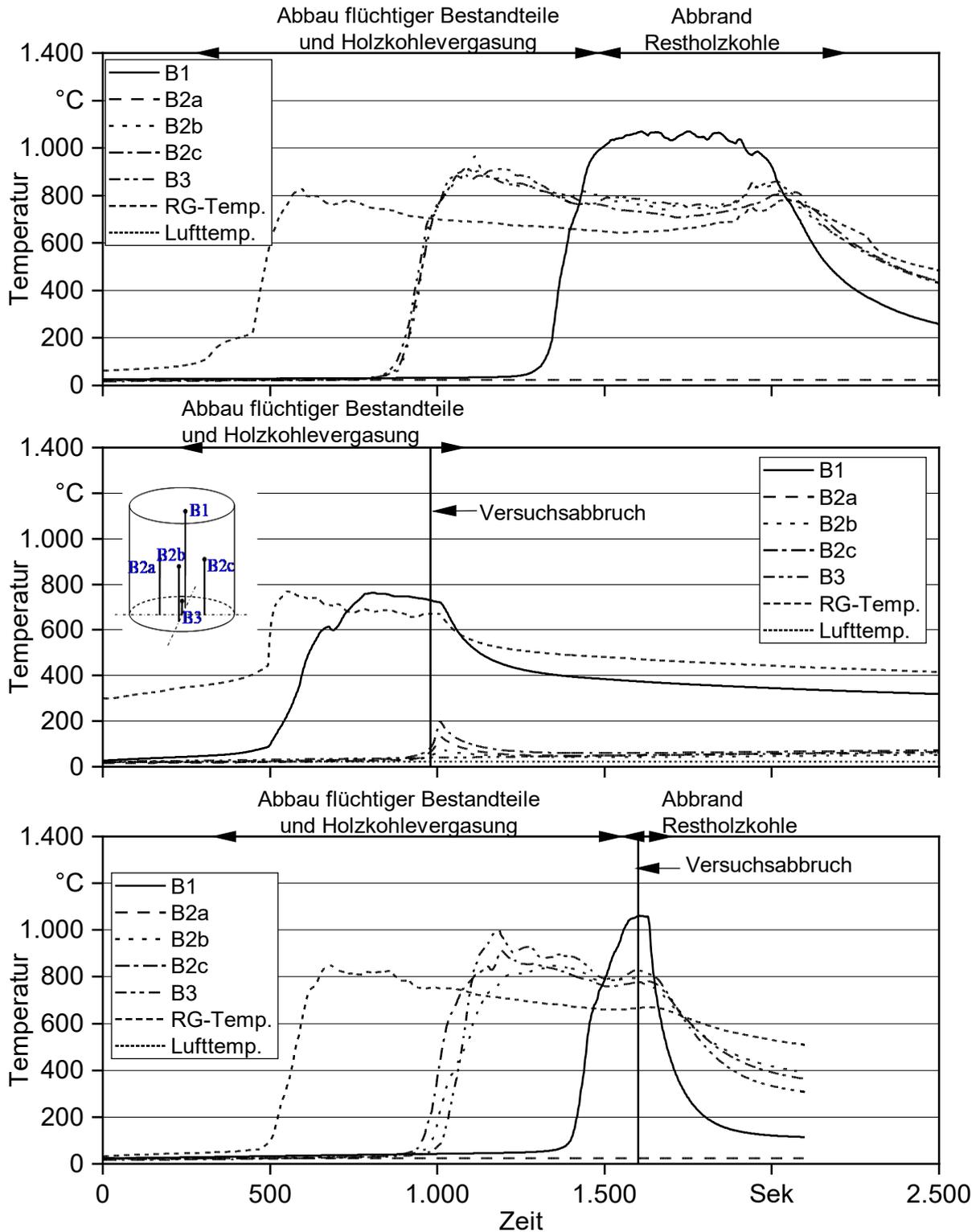


Abbildung 237: Laborreaktorstläufe mit Reaktionsabbruch – Vergleich der Brennstoffbetttemperaturen bei Testläufen mit Fichtenpellets (oben: Referenztest, Mitte: AK-1, unten: AK-2)

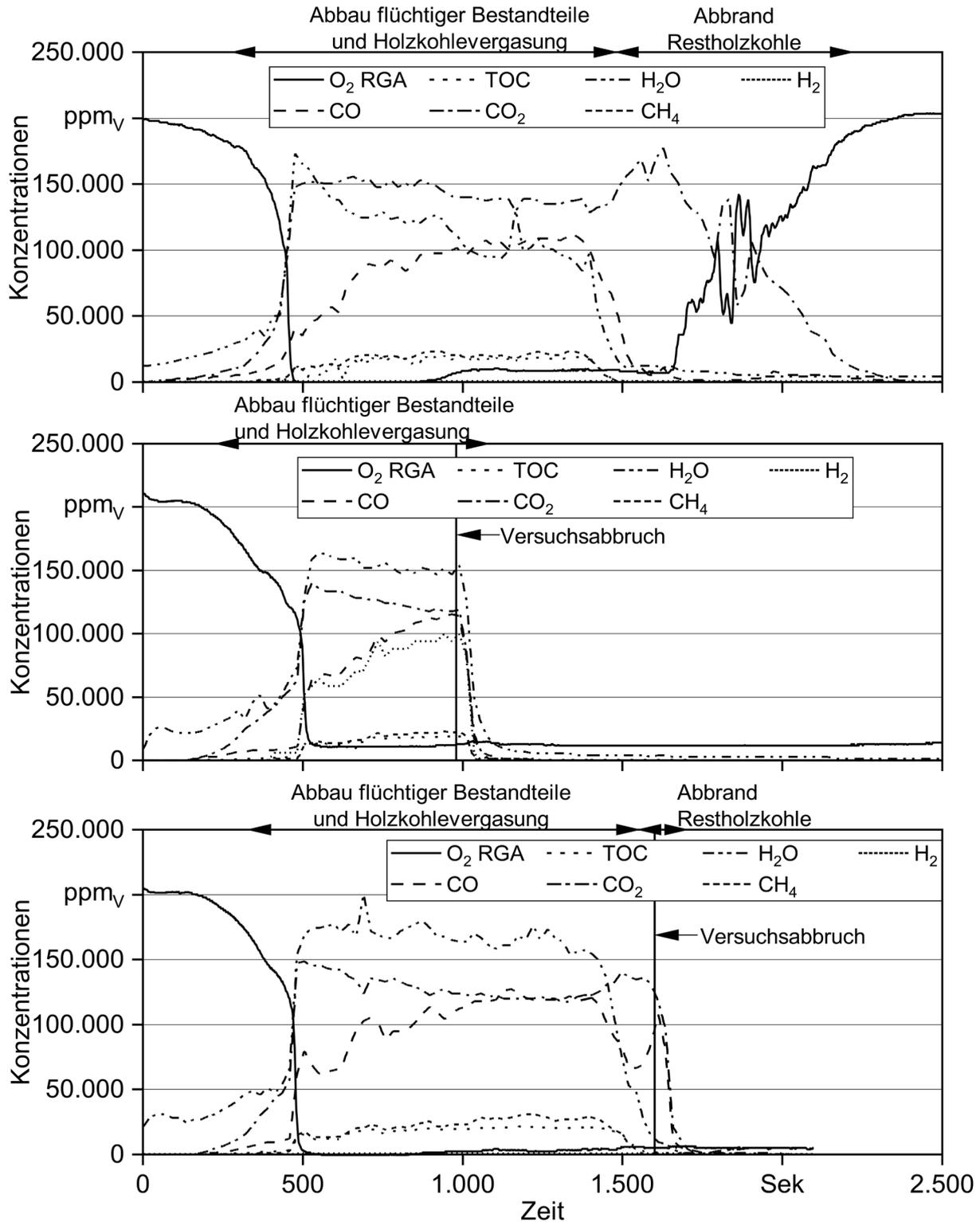


Abbildung 238: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Vergleich der Gasphasenspezieskonzentrationen bei Testläufen mit Fichtenpellets (oben: Referenztest, Mitte: AK-1, unten: AK-2)

Nach Reaktionsabbruch wurde das Brennstoffbett entsprechend der in Abschnitt 4.4.5 geschilderten Methodik untersucht. Abbildung 239 zeigt die eingesetzten Pellets sowie die Schichten „verkohlt“, „teilverkohlt“ und „nicht verkohlt“ aus den Versuchen mit Fichtenpellets bei Abbruchkriterium 1 und Abbruchkriterium 2.



Abbildung 239: Laborreaktor testläufe mit Reaktionsabbruch – Brennstoffbettbewertung am Beispiel Fichtenpellets (oben: AK-1, unten: AK-2)

In Tabelle 65 sind die Einwaagen der Testläufe sowie die Auswaagen der einzelnen beprobten Schichten zusammengefasst. Es wurden insgesamt drei Testläufe zu jedem Abbruchkriterium durchgeführt. Die drei Testläufe sind jeweils gut miteinander vergleichbar.

Tabelle 65: Laborreaktor testläufe mit Reaktionsabbruch – Massen der entnommenen Schichten des Brennstoffbetts – Testläufe mit Fichtenpellets

Abbruchkriterium 1							
Bezeichnung	Einwaage	Verkohlt	Teilverkohlt	Nichtverkohlt (oben)	Nichtverkohlt (unten)	Summe Rückstand	Masse umgesetzt
	[g FS]	[g FS]	[g FS]	[g FS]	[g FS]	[g FS]	[g FS]
AK-1 Test 1	470	23,9	48,0	97,5	84,8	254,1	215,9
AK-1 Test 2	470	23,2	47,6	68,1	132,5	271,5	198,6
AK-1 Test 3	470	24,9	48,6	76,9	111,5	261,9	208,1

Abbruchkriterium 2					
Bezeichnung	Einwaage [g]	Verkohlt [g]	Aschebehaftet (am Rost) [g]	Summe Rückstand [g]	Masse umgesetzt [g]
AK-2 Test 1	470	41,7	6,5	48,2	421,8
AK-2 Test 2	470	36,4	9,7	46,1	423,9
AK-2 Test 3	470	39,8	11,2	51,0	419,0

Die Geometrien der einzelnen Schichten sind in Tabelle 66 zusammengefasst. Auch hier lässt sich eine akzeptable Übereinstimmung der Wiederholungen feststellen. Anzumerken ist, dass die nicht verkohlte Schicht nochmals in zwei Schichten geteilt wurde (oben und unten in Tabelle 65), von denen getrennt der Wassergehalt bestimmt wurde, um zusätzliche Informationen über den Trocknungsfortschritt zu erhalten.

Tabelle 66: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Höhe der entnommenen Schichten des Brennstoffbetts vom Rost aus gemessen in [mm] – Testläufe mit Fichtenpellets

Abbruchkriterium 1																				
Bezeichnung	Brennstoffbett					Teilverkohlt					Nichtverkohlt					Teilung Nichtverkohlt in oben/unten				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
AK-1 Test 1	74	71	75	73	80	51	48	52	48	60	35	33	34	31	46	15	15	15	15	23
AK-1 Test 2	75	73	76	74	82	54	51	54	52	65	40	39	44	42	49	21	21	21	21	21
AK-1 Test 3	76	74	76	72	79	49	49	52	51	59	38	35	39	37	47	19	19	19	19	19

Abbruchkriterium 2										
Bezeichnung	Brennstoffbett					Aschebehaftet (am Rost)				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
AK-2 Test 1	42	38	44	43	47	9	9	9	9	9
AK-2 Test 2	45	39	47	43	47	12	12	12	12	12
AK-2 Test 3	47	45	49	46	51	13	13	13	13	13

Das Diagramm zeigt ein kreisförmiges Brennstoffbett mit fünf Pellets (P1 bis P5) an den Ecken eines Kreises. In der Mitte befindet sich ein Pellet (P5) mit einer Aschebehaftungsstelle (B1). Um dieses Pellet herum sind drei weitere Aschebehaftungsstellen (B2a, B2b, B2c) angeordnet.

Die einzelnen Schichten bzw. ausgewählte repräsentative Pellets aus den einzelnen Schichten wurden nachfolgend hinsichtlich der Parameter Wassergehalt, Aschegehalt, Gehalte an C, H und N, Dichte, Porosität und Druckfestigkeit (in Anlehnung an EN ISO 604) untersucht. Zur Untersuchung der Abmessungen von Einzelpellets aus der teilverkohlten Schicht wurde eine 3-D-Vermessung (Scan) durchgeführt. In Tabelle 67 sind relevante Daten zu diesen Charakterisierungen der Schichten aus AK-1 und AK-2 zusammengefasst. Generell darf angemerkt werden, dass derartige Datenmaterial erstmals generiert wurde und dies eine wertvolle Basis für die Entwicklung und Validierung des Bett-simulationsmodells im Rahmen des Projekts bildet.

Tabelle 67: Laborreaktorstläufe mit Reaktionsabbruch – Charakterisierung der entnommenen Schichten und von Einzelpellets

	Test 1, AK-1	Test 2, AK-1	Test 3, AK-1	Mittelwert	Standard- abweichung
Nichtverkohlt unten					
Wassergehalt [m-% FS]	0,98	2,15	2,47	1,87	0,64
Nichtverkohlt oben					
Wassergehalt [m-% FS]	0,84	1,80	1,92	1,52	0,48
Teilverkohlt					
Wassergehalt [m-% FS]	1,93	1,86	2,39	2,06	0,24
Verkohlt					
Wassergehalt [m-% FS]	1,75	1,80	2,06	1,87	0,14
Aschegehalt [m-% TS]	2,92	2,85	2,88	2,88	0,03
H [m-% TS]	1,50	1,50	1,40	1,47	0,05
C [m-% TS]	92,00	91,90	91,80	91,90	0,08
N [m-% TS]	0,06	0,12	0,07	0,08	0,03
O [m-% TS]	3,52	3,63	3,85	3,67	0,14
Dichte [kg/m ³]	602,30	596,60	562,80	587,23	17,43
Einzelpellet 1 (verkohlt)					
Druckfestigkeit horizontal [MPa]	0,46	0,50	0,40	0,45	0,04
Länge [mm]	14,68	19,54	17,70	17,31	2,00
Durchmesser [mm]	4,26	4,19	4,33	4,26	0,06
Einzelpellet 2 (verkohlt)					
Druckfestigkeit vertikal [MPa]	0,55	0,78	0,66	0,66	0,09
Länge [mm]	10,97	12,02	10,10	11,03	0,78
Durchmesser [mm]	4,72	4,41	4,56	4,56	0,13
	Test - 1, AK - 2	Test - 2, AK - 2	Test - 3, AK - 2	Mittelwert	Standard- abweichung
Verkohlt					
Wassergehalt [m-% FS]	0,27	0,07	0,25	0,20	0,09
Aschegehalt [m-% TS]	3,35	3,33	3,21	3,30	0,06
H [m-% TS]	1,00	0,90	0,90	0,93	0,05
C [m-% TS]	92,50	93,10	93,20	92,93	0,31
N [m-% TS]	0,08	0,10	0,07	0,08	0,01
O [m-% TS]	3,07	2,57	2,62	2,75	0,22
Holzkohledichte [kg/m ³]	545,60	536,90	586,20	556,23	21,49
Einzelpellet 1 (verkohlt)					
Druckfestigkeit horizontal [MPa]	0,31	0,43	0,43	0,39	0,06
Länge [mm]	12,25	14,15	16,58	14,33	1,77
Durchmesser [mm]	4,60	4,19	4,30	4,36	0,17
Einzelpellet 2 (verkohlt)					
Druck [MPa]	0,75	0,70	0,44	0,63	0,14
Länge [mm]	11,19	10,88	10,34	10,80	0,35
Durchmesser [mm]	4,44	4,53	4,49	4,49	0,04

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die aus der Bettbewertung gewonnene Holzkohle sich zwischen den Abbruchkriterien im Mittel nur in geringem Maße unterscheidet. Die nach EN ISO 18847 ermittelte Holzkohledichte der verkohlten Pellets nimmt von AK-1 auf AK-2 leicht ab (587 kg/m³ im Vergleich zu 556 kg/m³). Der Kohlenstoffgehalt und der Aschegehalt steigen leicht, und der H- und O-Gehalt nehmen geringfügig ab.

Die Druckfestigkeit reduziert sich ebenfalls leicht, die maximale horizontale Belastungsfähigkeit sinkt von 3,4 kg für AK-1 auf 2,5 kg für AK-2, die vertikale von 1,1 kg auf 1,0 kg. Der im Zuge der Belastungsmessungen ermittelte Durchmesser bleibt ungefähr konstant. Es zeigte sich somit, dass sich die Zusammensetzung der Holzkohle während des Fortschritts der Reaktionsfront nach unten nur leicht ändert.

Die detaillierten Untersuchungen des Brennstoffbetts erlauben die im Folgenden geschilderten Rückschlüsse auf den Abbrandverlauf. Die Umsetzung des Brennstoffs beginnt am äußeren Rand an der Oberfläche des Brennstoffbetts. Es bildet sich eine scharfe, weitgehend waagerechte Reaktionsfront aus, die sich von oben nach unten durch das Brennstoffbett im Reaktor bewegt. Diese hinterlässt verkohlte Pellets. Der Ausbrand der Restholzkohle startet im Bereich direkt über dem Rost, nachdem die erste Reaktionsfront den Rost erreicht hat. Das ist gekennzeichnet von einem starken Temperaturanstieg des Thermoelements B3. Es ist anzunehmen, dass sich der Ausbrand der Restholzkohle von unten nach oben vollzieht (Umkehr der Reaktionsfront). Durch die detaillierte Vermessung der aus AK-1 bzw. AK-2 gewonnenen verkohlten Holzpellets konnten präzise Informationen über Holzkohledichte, Partikeldichte, innere Porosität sowie Oberfläche/Volumen-Verhältnis und die Struktur verkohlter Holzpellets gewonnen werden. Diese gehen als wesentliche Parameter direkt in das in AP3 zu entwickelnde Abbrandmodell für Holzpellets ein. Außerdem sind die Erkenntnisse zum Fortschritt der Reaktionsfront im Laborreaktor ebenfalls sehr wertvoll für die Modellierung, da die Struktur des Brennstoffbetts insbesondere zu den Abbruchzeitpunkten von der Simulation reproduziert werden muss.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Abbruchtests mit Fichtenpellets wurden weitere Abbruchtests mit den marktverfügbaren zertifizierten Sortimenten 8, 17 und 19 durchgeführt. Dabei wurde AK-1 nicht mehr angewendet, da die aus AK-2 und AK-1 gewonnenen Proben von verkohlten Pellets bei den Abbruchversuchen mit den Fichtenpellets keine großen Unterschiede aufwiesen. Zusätzlich wurde dafür AK-3 untersucht.

Abbildung 240 zeigt das Einsatzmaterial sowie Rückstände der Testläufe mit Abbruchkriterium AK-2. In Tabelle 68 sind die Einwaagen und Auswaagen der Tests mit AK-2 zusammengefasst (jeweils zwei Testläufe pro Brennstoff wurden durchgeführt). Darüber hinaus sind in der Tabelle die aus den Bettvermessungen resultierenden Höhenprofile und Volumina angegeben.

Generell zeigten die durchgeführten Wiederholungen bei den Abbruchversuchen mit AK-2 der einzelnen Pelletsortimente untereinander sehr gute Übereinstimmungen. Auch zeigten sich gute Übereinstimmungen zwischen den Referenztestläufen ohne Versuchsabbruch und den Abbruchversuchen in Bezug auf die Verläufe von Massenabbau, Temperaturen und Spezieskonzentrationen. Bezüglich der Betttopografie kann bei AK-2 gesagt werden, dass die Höhe am Rand des Brennstoffbetts generell niedriger war als in der Mitte. Bei AK-2 bestand das gesamte Brennstoffbett aus verkohlten Pellets. Die Einteilung in mehrere Schichten ist sehr willkürlich und wurde daher nicht vorgenommen.



Abbildung 240: Laborreaktorstestläufe mit Reaktionsabbruch – Fotos des Einsatzmaterials sowie der Rückstände bei AK-2 – Testläufe mit marktverfügbaren Sortimenten

Tabelle 68: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Masse, Höhenprofil und Volumen der verkohlten Schicht bei AK-2 – Testläufe mit marktverfügbaren Sortimenten

Sortiment Nr.		19 AK-2_1	19 AK-2_2	17 AK-2_1	17 AK-2_2	8 AK-2_1	8 AK-2_2
Einwaage	[g FS]	490,0	490,0	490,0	490,0	500,0	502,0
Summe Rückstand	[g]	51	54	51	53	54	50
Masse umgesetzt	[g]	439	436	439	437	446	452
Massenverlust	[%]	89,7	89,0	89,5	89,2	89,1	90,0
Höhenprofil Brennstoffbett		<p>● P1...P5: Messposition Betthöhe ● B1...B3: Positionen der Betttemperaturmessungen ● Probenhalter</p>					
P1	[mm]	49	47	50	58	54	55
P2	[mm]	42	47	50	51	60	50
P3	[mm]	43	43	52	53	58	50
P4	[mm]	46	45	50	55	62	49
P5 (Mitte)	[mm]	54	50	58	56	63	52
Volumen Brennstoffbett	[cm ³]	389,2	375,1	426,3	433,0	477,2	404,5
Volumenverlust	[%]	50,5	52,2	45,7	44,9	39,2	48,5

Wie Tabelle 68 zeigt, bestehen zwischen den einzelnen untersuchten Pelletsortimenten bezüglich der gemessenen Profile der Brennstoffbetthöhen gewisse Unterschiede. Diese korrelieren nicht mit dem Aschegehalt. Schüttdichte und Partikeldichte zeigen die gleiche Tendenz mit dem Volumenverlust (je niedriger die Dichte desto größer der Volumenverlust).

Aufgrund der großen Ähnlichkeiten wurden Detailanalysen sowie ein Abbruchversuch mit dem Abbruchkriterium AK-3 nur für das Sortiment 19 durchgeführt, da dieser auch als Referenz zur Validierung des CFD-Abbrandmodells ausgewählt wurde. Beim Abbrandversuch mit AK-3 kam eine Einwaage von 490 g Frischsubstanz zum Einsatz. 481 g der Pellets wurden umgesetzt, was einem Massenverlust von 98,2 % entspricht. Die Bettbewertung für den Abbruchversuch zeigte keine Symmetrie der Brennstoffbett-Oberfläche. Auf einer Seite war die Umsetzung des Brennstoffs deutlicher fortgeschritten und es bestand keine Erhöhung des Holzkohlebetts in der Mitte wie bei AK-2. An der niedrigeren Seite des Brennstoffbetts zeigte sich unterhalb einzelner verkohlter und stark aschebehafteter Pellets eine poröse Struktur, die dem Rückstand nach dem vollständigen Ausbrand entspricht.

Auf der anderen Seite fand sich unterhalb der verkohlten Pellets keine solche Struktur. Es kann daher vermutet werden, dass nur die oberste Schicht der Pellets als erkennbare Struktur am Rost zurückbleibt, da diese keinerlei mechanischen Belastungen durch darüberliegende Pellets ausgesetzt ist. Der Rest der Pelletasche fällt durch den Rost bzw. zerbricht am Rost.

Soweit möglich (aus Stabilitätsgründen) wurden die verkohlten, aschebehafteten Pellets aus AK-3 beprobt und im Anschluss analysiert. Bilder des Einsatzmaterials sowie des Rückstands nach Testlaufabbruch sind in Abbildung 241 dargestellt. Die Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 69 im Vergleich mit Analysen des Brennstoffs sowie der verkohlten Pellets aus AK-2 dargestellt. Zusätzlich bestimmt wurden die Dichte (nach EN 18847) sowie die mittlere Länge und der mittlere Durchmesser (fotometrische Messung).



Abbildung 241: Bilder des Einsatzmaterials und der Rückstände beim Testlauf mit Pelletsortiment 17 und AK-3

Tabelle 69: Laborreaktortestläufe mit Reaktionsabbruch – Charakterisierung des Rückstands bei AK-3 sowie Vergleich mit AK-2 und dem Brennstoff (Pelletsortiment 17)

		Brennstoff		AK-2_1		AK-2_2		AK-3	
		Wert	s	Wert	s	Wert	s	Wert	s
Aschegehalt	[m-% TS]	0,35		2,39		2,36		3,04	
H	[m-% TS]	6,2		1,0		1,0		0,7	
C	[m-% TS]	49,8		95,9		96,4		91,9	
N	[m-% TS]	0,1		0,1		0,1		0,1	
O	[m-% TS]	43,6		0,6		0,1		4,3	
Dichte	[g/cm ³]	1,29		0,67	0,13	0,74	0,12	0,71	0,10
mittlere Länge	[mm]	14,3	5,1	10,8	2,9	10,9	3,1	10,4	2,7
mittlerer Durchmesser	[mm]	6,2	0,2	4,8	0,4	4,9	0,4	4,6	0,4

Die mechanisch nicht belasteten Pellets behalten ihre Struktur bis zum vollständigen Ausbrand bei. Die beprobten verkohlten Pellets aus dem oberen Bereich des Brennstoffbetts zeigen eine ähnliche Geometrie (Durchmesser und Länge) wie die Pellets aus AK-2, der Aschegehalt nimmt erwartungsgemäß zu. Die Schrumpfung der Pellets in Längsrichtung und in radialer Richtung ist prozentuell fast gleich (jeweils ca. –30 %). Die verkohlten Pellets verlieren bis zu den Versuchsabbrüchen im Vergleich zum Ausgangsmaterial stark an Dichte. Diese liegt bei AK-3 nur mehr bei rund 54 % der Ausgangsdichte.

Insgesamt darf angemerkt werden, dass die Abbruchversuche wichtige neue Einblicke in den Pelletbettabbrand erbrachten und diese Erkenntnisse sowie die neuen erarbeiteten Stoffdaten zu teilverkohlenen und verkohlten Pellets eine wichtige Basis für die Entwicklung des Bettabbrandmodells bilden.

9 Schlussfolgerungen

In den folgenden Abschnitten sollen ableitbare Anforderungen identifiziert werden, die sich aus dem Erkenntnisstand des Projekts ergeben. Dabei wird unterschieden nach Anforderungen an den Brennstoff und Anforderungen an die Feuerungstechnik.

9.1 Anforderungen an den Brennstoff

Die Untersuchungen zeigen einen signifikanten Einfluss der Pelletlänge auf die gasförmigen, jedoch nicht auf die Gesamtstaubemissionen bei Pelletöfen (siehe Abschnitt 7.2.1.1). Eine Begrenzung der möglichen Pelletlängen, z. B. durch den Anteil an Pellets < 10 mm, wie dies derzeit im Entwurf des neuen ENPLUS-HANDBUCHS [43] (siehe Tabelle 70) vorgesehen ist, erscheint demnach sinnvoll. Inwieweit auch eine Begrenzung der maximalen Pelletlänge sinnvoll sein könnte, bleibt jedoch nach der vorliegenden Untersuchung unklar. Die Untersuchungen von WÖHLER ET AL. [95] sowie KHALSA ET AL. [53] hatten eine solche Forderung nahegelegt, jedoch galt das für deren relativ lange Pellets, während sich aus der Bestimmung der mittleren Pelletlänge bei den hier untersuchten 28 marktverfügbaren Pelletsortimenten kein größerer Handlungsbedarf ableiten lässt. Für eine praktische Umsetzung der Forderung nach einer sinnvollen Begrenzung der Pelletlänge (z. B. der Anteil Pellets > 30 mm) kann die vorliegende Untersuchung somit keinen unmittelbaren Beitrag leisten.

Die Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehalts (siehe Abschnitt 7.2.2) zeigen einen negativen Effekt bei zu trockenen Pellets (Wassergehalt 3 m-%) auf die gasförmigen- und Gesamtstaubemissionen beim hierzu untersuchten Pelletofen. Daher scheint die Forderung nach einem minimalen Wassergehalt von 5 m-% sinnvoll (Tabelle 70). Somit könnte entsprechende Importware aus Übersee, die aus Gründen der Frachtraumauslastung oft sehr trocken hergestellt wird, für eine Nutzung in Pelletöfen ausgeschlossen werden.

Auch ein hoher Feinanteil (Abschnitt 7.2.3) zeigt einen negativen Effekt auf die Emissionen bei Pelletöfen und dürfte vor allem relevant für Abwurffeuerungen sein. In Verbindung mit den Ergebnissen der Förderversuche (Unterkapitel 5.3) ergibt sich aber die Problematik, dass der Feinanteil der bisherigen Brennstoffanforderungen im Anlieferungszustand der Pellets nicht dem Feinanteil nach dem Durchlaufen der Förderschnecke und damit dem realen in der Feuerung ankommenden Feinanteil entspricht. Eine reine Begrenzung des Feinanteils bei Anlieferung scheint somit nicht zielführend zu sein, um die Emissionen zu begrenzen. Zur Bewertung des feuerungstechnisch relevanten Feinanteils bei mechanischer Belastung von Holzpellets könnte es sinnvoll sein, ein Prüfverfahren mit standardisierter Schneckenförderung zu entwickeln, auf dessen Grundlage ein Grenzwert für diesen Feinanteil angegeben werden kann.

Auch ein erhöhter Anteil an Bindemitteln kann sich je nach Art des verwendeten Bindemittels negativ auf die Emissionen auswirken (Abschnitt 7.2.5). Auch zeigen die Ergebnisse der Stärkeuntersuchung der marktverfügbaren Pellets (Abschnitt 5.1.2), dass Dosierungen von bis zu 1,8 m-% Bindemittelzuschlag im Markt vorkommen. Eine Limitierung des maxi-

mal zulässigen Bindemittelanteils (z. B. auf ≤ 1 m-%) scheint aufgrund der hier vorliegenden Ergebnisse sinnvoll, lässt sich jedoch in der Praxis nur schwierig mit vertretbarem Aufwand realisieren und prüfen.

Nach statistischer Betrachtung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 7.3.3) ergeben sich neben den bereits von der Norm erfassten Parametern folgende für das Emissionsverhalten besonders relevanten Parameter:

- Kaliumgehalt im Brennsstoff oder Laubholzanteil aus NIR-Analyse,
- Karbonatanteil der bei 550 °C gewonnenen Brennstoffasche,
- Energiedichte und
- Si/K-Verhältnis.

Diese Parameter werden derzeit weder von der DIN EN ISO 17225-2, der EN*plus* noch von DIN*plus* abgedeckt. Bevor diese jedoch zur Normung oder Zertifizierung herangezogen werden können, gilt es, geeignete Schnellbestimmungsmethoden zu finden.

Der Kaliumgehalt lässt sich vermutlich näherungsweise aus dem mittels NIR-Analyse bestimmten Laub-/Nadelholzanteil ableiten. Diese Methode sollte weiter optimiert werden, um mittelfristig ein solches Schnellverfahren etablieren zu können. Eine Erweiterung der NIR-Analyse auf weitere Parameter, wie z. B. Aschegehalt oder Energiedichte, wird derzeit von den Partnern der UNIVPM entwickelt. Würde man – nur für Pelletöfen – eine Limitierung des Kaliumgehalts im Brennstoff erwägen, so wäre eine Begrenzung bei ≤ 500 mg/kg sinnvoll (siehe Tabelle 70). Eine mögliche Schnellbestimmungsmethode könnte auch RAPPOD (rapid potassium determination) darstellen, die aktuell am DBFZ entwickelt und validiert wird [66].

Das Versinterungsverhalten der Asche durch die Bildung von Karbonatschmelzen scheint nach den vorliegenden Ergebnissen ebenfalls ein relevanter Faktor für das Emissionsverhalten in Pelletöfen, aber auch in Pelletkesseln zu sein und könnte sich durch den Karbonatgehalt in der Brennstoffasche (550 °C) mittels TIC-Analyse vorhersagen lassen. Hierzu sind aber weitere umfassende Untersuchungen, vor allem anhand der gesammelten Aschen aus den hier vorgestellten Feuerungsversuchen sowie möglicherweise eine Weiterentwicklung der Methode zur TIC-Gehaltsbestimmung (Abschnitt 4.3.2) notwendig. Eine Brennstoffanforderung hinsichtlich des Karbonatgehalts der Asche ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht möglich.

Höhere Si/K-Verhältnisse führen zur verstärkten Einbindung von Kalium in die Asche, senken aber gleichzeitig den Ascheschmelzpunkt und können Versinterungen im Brennstoffbett bewirken. Derzeit müssen Kalium und Silizium noch mittels Laboranalyse bestimmt werden. Eine Beschränkung des Siliziumgehalts könnte für nur kurzzeitig eingesetzte Prüfbrennstoffe sinnvoll sein, da sich ein günstiges Si/K-Verhältnis positiv auf die Staubemissionen auswirkt, jedoch im Langzeitbetrieb eventuell Versinterungen begünstigt. Für eine Festlegung dieser Brennstoffanforderung liegen aktuell noch nicht genügend Daten vor, auch müssen mögliche vereinfachte Bestimmungsverfahren für Kalium (z. B. NIR) und

Silizium erst entwickelt bzw. validiert werden. Eventuell könnte auch die PASSA-Methode durch weitere Anpassungen geeignet sein, um das Ascheschmelzverhalten bzw. das Versinterungsverhalten durch Karbonatbildung abzuschätzen und so dem jeweiligen Verwendungszweck zuzuordnen. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

Eine einfache und kurzfristig durchführbare Möglichkeit, die Bandbreite dieser Parameter etwas einzugrenzen, könnte die Reduzierung des zulässigen Aschegehalts in der A1-Klasse auf $\leq 0,5$ m-% darstellen. Hierdurch würde sich die Bandbreite der gemessenen Kaliumgehalte der marktverfügbaren Sortimente auf 404–676 mg/kg einschränken und die Siliziumgehalte auf 50–412 mg/kg. Bei den Versuchspellets läge die Bandbreite an Kaliumgehalten bei 337–833 mg/kg und Silizium bei 111–604 mg/kg. Durch den sehr niedrigen Aschegehalt bei Eiche bei gleichzeitig relativ hohem Kaliumgehalt lässt sich durch die Reduzierung des Aschegehalts allein für Kalium aber noch kein zufriedenstellender Effekt erzielen. Damit stellt die Reduzierung des Aschegehalts bestenfalls eine Übergangslösung dar.

Um eine endgültige Bewertung des Einflusses neuer Brennstoffanforderungen auf die Emissionen abgeben zu können, sind weitere Ergebnisse z. B. bezüglich der Begrenzung der Pelletlänge nach oben hin, des Karbonatanteils und des Feinanteils bei Einbringung in das Brennstoffbett notwendig. Außerdem sollten für die Bewertung neuer Brennstoffanforderungen die Ergebnisse weiterer Feuerungen herangezogen werden. Diese Arbeiten sind unter anderem im beantragten Teil 2 des FuturePelletSpec-Projekts vorgesehen.

Tabelle 70: *Brennstoffanforderungen an Holzpellets der Qualitätsklasse A1 nach den aktuellen Entwürfen der DIN EN ISO 17225-2 [33] sowie des ENplus-Handbuchs [43] und Empfehlung der Brennstoffanforderungen (für Pelletöfen) aus dem Projekt sowie Bandbreite der 28 marktverfügbaren Pelletsortimente und deren möglicher Ausschluss bei Anwendung der empfohlenen Brennstoffanforderung*

Eigenschaftsklasse	DIN EN ISO 17225-2 A1 (Entwurf 2020)	ENplus A1 (Entwurf 2020)	Empfehlung aus Projekt	Bandbreite aus Pelletscreening	Anteil der ausgeschlossenen Sortimente aus dem Pelletscreening von insgesamt 28
Durchmesser D [mm]	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1	$6,0 \pm 1$	6,0–6,3	
Länge L [mm]	$3,15 \leq l \leq 40^1$	$3,15 \leq l \leq 40$		Mittel 8,7–18,1 Min 3,14–9,0 Max 16,9–36,3	
Längenverteilung Masse < 10 mm Kategorie: L < 20 m-% 20 m-% \leq M \leq 30 m-% S > 30 m-%	(3,15 mm \leq FP < 5,6 mm) sollte angegeben werden	Wert und Kategorie müssen angegeben werden	M und L \geq 40; < 1 m-% \geq 30; < n. f. m-%	*1,0–58,0 m-% 14 \times L 7 \times M 7 \times S	25 %
Wassergehalt M[m-%]	≤ 10	≤ 10	$5 \leq M \leq 10$	3,3–9,3	
Aschegehalt (d) [m-%]	$\leq 0,7$ (für Pelletöfen $\leq 0,5$ empfohlen)	$\leq 0,7$	$\leq 0,5$	0,28–0,81	21 %
mech. Festigkeit [m-%]	$\geq 98,0$	≥ 98	$> 99,0$	96,9–99,5	39 %

Eigenschaftsklasse	DIN EN ISO 17225-2 A1 (Entwurf 2020)	ENplus A1 (Entwurf 2020)	Empfehlung aus Projekt	Bandbreite aus Pelletscreening	Anteil der ausgeschlossenen Sortimente aus dem Pelletscreening von insgesamt 28
Feinanteil [m-%]	≤ 1,0	≤ 1,0 (Schüttgut)	< 0,5	0,0–1,0	
		≤ 0,5 (Sackware)			
grober Feinanteil (< 5,6 mm) [m-%]	sollte angegeben werden	muss angegeben werden		n. b.	
Additive (d) [m-%]	≤ 2 ² Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 ²	≤ 1	0,06–1,89 (Stärke)	10 %
Heizwert Hu (ar) [MJ/kg]	≥ 16,5	16,5 ≤ Hu ≤ 192	≥ 17,3	18,5–19,3	
Schüttdichte (ar) [kg/m ³]	≥ 600, ≤ 750	≥ 600, ≤ 750	660–720	614–710	21 %
Partikeldichte (ar) [kg/m ³]	–	muss angegeben werden	≥ 1.250	1.239–1.330	7 %
Stickstoff (d) [m-%]	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,15	< 0,05–0,21	7 %
Schwefel (d) [m-%]	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04	< 0,005–0,023	
Chlor (d) [m-%]	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	< 0,005–0,008	
Arsen (d) [mg/kg]	≤ 1	≤ 1	≤ 1	< 0,8	
Cadmium (d) [mg/kg]	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	< 0,2–0,4	
Chrom (d) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10	< 1–9	
Kupfer (d) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10	< 1–7	
Blei (d) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10	< 2	
Quecksilber (d) [mg/kg]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	< 0,05–0,07	
Nickel (d) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10	< 1–3	
Zink (d) [mg/kg]	≤ 100	≤ 100	≤ 100	< 1–16	
Kalium (d) [mg/kg]	–	–	≤ 500	372–1.020	21 %
Silizium (d) [mg/kg]	–	–	≤ 300	< 100–785	25 %
Ascheschmelzverhalten [°C]	Erweichungstemperatur ≥ 1.200	Erweichungstemperatur ≥ 1.200	Erweichungstemperatur > 1.200	n. b.	

¹ Die Masse an Pellets > 40 mm darf 1 m-% betragen. Überlange Pellets müssen ≤ 45 mm sein.

² Die Menge der Additive in der Produktion ist auf 1,8 m-% beschränkt, die Menge der Additive, die nach der Produktion eingesetzt werden (z. B. Beschichtungsöle), ist auf 0,2 m-% beschränkt.

n. f.: Aufgrund unzureichender Datenlage noch nicht festgelegt; * berechnet aus Pelletlängen und Rohdichte

9.2 Anforderungen an die Feuerungstechnik

Generell haben die durchgeführten Testläufe gezeigt, dass hinsichtlich der Emissionen Pelletöfen sehr sensibel auf wechselnde Pelleteigenschaften reagieren, während Pelletkessel diese durch ihre höher entwickelte Regelungstechnik, Rost- und Brennraumgestaltung sowie auch durch die höheren Verbrennungstemperaturen in der Sekundärverbrennungszone, die aufgrund des besser isolierten Feuerraums (kein Sichtfenster) vorherr-

schen, gut kompensieren können. Es ist somit vor allem hinsichtlich Pelletöfen ein erheblicher Optimierungsbedarf gegeben.

Aus den fördermechanischen Versuchen in Verbindung mit Beobachtungen aus den Feuerungsversuchen zeigt sich, dass mit einer Optimierung der Förderschnecke eine wesentliche Schwachstelle bei Pelletöfen beseitigt werden könnte, um hinsichtlich der mechanischen Belastung der Pellets und der Gleichmäßigkeit der Brennstoffzufuhr Verbesserungen zu erzielen. Es wird empfohlen, die Fördertechnik so weiterzuentwickeln, dass sie den Brennstoff möglichst schonend, gleichmäßig sowie weitgehend ohne Zerkleinerung der Pellets in den Ofen einbringt, da die Testläufe gezeigt haben, dass der Feinanteil, der in erheblichem Maß durch die Brennstoffzufuhr mittels Schnecke verursacht wird, die Verbrennung negativ beeinflusst. Außerdem führt eine ungleichmäßige Brennstoffförderung zur Bildung von Abgasstrahlen und zu deutlichen Emissionsspitzen.

Des Weiteren zeigten die Testläufe klare Defizite bezüglich der Regelungstechnik, v. a. hinsichtlich der Leistungsregelung. Die Regelungstechnik, und dabei vor allem die Regelung des Brennstoffeinschubes, sollte so weiterentwickelt werden, dass auch bei unterschiedlichen Pelletlängen, Schüttdichten bzw. Energiedichten sowie Transporteigenschaften unterschiedlicher Pelletsortimente die Nennleistung erreicht, aber nicht überschritten werden kann. Eine flexibel anpassbare und über die Brennkammertemperatur geregelte Drehzahlregelung der Stokerschnecke könnten dafür die Basis bilden.

Testserien mit Messungen der Brennstoffbetttemperaturen sowie der Gaszusammensetzungen und Gastemperaturen knapp oberhalb des Brennstoffbetts und in der Brennkammer erbrachten wichtige Erkenntnisse, die eine Basis zur weiteren Verbesserung der Feuerungstechnik darstellen. So wurde im Zuge dieser Testläufe festgestellt, dass die über das Zündelement in das Brennstoffbett eingebrachte Verbrennungsluft einen erheblichen Einfluss auf das Abbrandverhalten des Pelletbetts hat. Sie wirkt sich im stationären Betrieb durch den punktuell verstärkten Bettabbrand negativ auf die Bettentwicklung aus, weshalb dieser Luftertrag nach erfolgter Zündung weitgehend unterbunden werden sollte. Außerdem zeigten diese spezifischen Messserien, dass Pelletöfen tendenziell mit zu hohem Primärluftverhältnis betrieben werden. Dies führt zu Kanalbildungen im Brennstoffbett und damit zu Strahlenbildung. Deshalb sollten die Brennerschalen so weiterentwickelt werden, dass sie mit weniger Primärluft betrieben werden, wodurch bei gleichbleibendem Gesamtluftüberschuss mehr Sekundärluft eingebracht wird. Werden zusätzlich die Sekundärluftdüsen einer entsprechenden Optimierung hinsichtlich Geometrie und Anordnung unterzogen, so kann eine bessere Durchmischung der Sekundärluft mit den aus dem Brennstoffbett austretenden Gasen erzielt werden. Dadurch können Strahlen aufgebrochen und insgesamt ein besserer Gasphasenausbrand erzielt werden. Wichtig dabei ist auch, dass die Sekundärluftdüsen immer so platziert werden, dass es auch bei anwachsender Bettgröße zu keinem direkten Eintrag der Sekundärluft in das Brennstoffbett kommt.

Die zyklische Abreinigung der Brennerschale mittels Erhöhung der Gebläsedrehzahl erwies sich als nicht optimal, da hierdurch erhöhte Staub- und CO-Emissionen begünstigt werden. Eine mechanische Abreinigung des Rosts ohne zyklischen Ausbrand könnte helfen, den Aufbau versinterter Ascheschichten zu minimieren. Außerdem würden so auch

Emissionsspitzen während der Ausbrandphasen verhindert und somit die Emissionen insgesamt weiter reduziert.

Im Zuge der oben genannten spezifischen Testläufe konnten auch neue Daten zu Temperaturen und Gaszusammensetzungen am Brennstoffbettaustritt und in der Brennkammer, zu Temperaturschichtungen im Brennstoffbett im kontinuierlichen Betrieb sowie Informationen zur Änderung der Brennstoffbetthöhe über die Zeit sowie bezüglich der Aschedichte im Brennstoffbett erlangt werden. Diese Daten gaben weitere tiefere Einblicke in den Pelletbettaustritt und stellen eine sehr wichtige Grundlage für die Arbeiten zur Abbrandmodellierung dar.

Durch die umfangreichen TGA-Versuche konnten wesentliche Unterschiede zwischen Laubhölzern und Nadelhölzern hinsichtlich ihrer Gehalte an Hemicellulose, Cellulose und Lignin sowie ihres thermischen Zersetzungsverhaltens unter Pyrolysebedingungen festgestellt werden. Diese Daten bildeten eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Pelletbrennstoffbett-Abbrandmodells, die in Berichtsteil II dokumentiert ist. Unterstützt wurde die Modellentwicklung außerdem durch Verbrennungstests an einem speziell für derartige Versuche konzipierten Laborreaktor, aus denen neue Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der Holzart auf das Abbrandverhalten (Lärchenpellets zeigten in Vergleich zu den anderen untersuchten Holzarten eine langsamere Zündung gefolgt von einem schnelleren Abbau), bezüglich des Einflusses der Pelletlänge auf das Abbrandverhalten (die Dauer der Flüchtigensfreisetzungsphase steigt bei kürzeren Pellets an) und bezüglich des Pelletabbrands in einer Schüttung im Allgemeinen resultierten. Letztere umfassten vor allem Daten zum Zündverhalten, zur Dauer der Flüchtigensfreisetzung und des Holzkohlensausbrands, zur Zusammensetzung der freigesetzten Gase und der Temperaturverteilungen über die Zeit, Daten zur Freisetzung von NO_x -Vorläufersubstanzen sowie Stoffdaten (Dichte, Schrumpfungsverhalten, mechanische Belastbarkeit) von Pellets in unterschiedlichen Ausbrandstadien. Diese Daten waren relevant für die Entwicklung, Prüfung und Bewertung des neuen Bettabbrandmodells.

Im neu entwickelten Brennstoffbett-Abbrandmodell (siehe Berichtsteil II) können relevante brennstoffspezifische Parameter (bekannte wie auch im Projekt neu identifizierte) getrennt variiert und somit ihr Einfluss auf den Abbrandvorgang untersucht werden. Die Kopplung des Brennstoffbett-Abbrandmodells mit einem verfügbaren Gasphasenverbrennungsmodell wurde implementiert und erfolgreich getestet. Mit diesem neuen, innovativen CFD-Simulationsmodell ist es nun möglich, in akzeptabler Simulationszeit Bewertungen des Bettabbrands vorzunehmen. In Zukunft soll dieses Modell zur Entwicklung neuer besonders emissionsarmer Pelletfeuerungen eingesetzt werden. Im vorliegenden Projekt wurde es dazu genutzt, die Einflüsse spezifischer Brennstoffparameter auf den Bettabbrand gezielt in Form von Sensitivitätsanalysen zu untersuchen (hinsichtlich Details siehe Berichtsteil II). Dabei konnten folgende Ergebnisse gewonnen werden, aus denen sich wiederum Rahmenbedingungen für die Entwicklung neuer emissionsarmer Pelletofentechnologien ableiten lassen, die speziell auf die Berücksichtigung unterschiedlicher Schüttdichten, Pelletlängen, Rohmaterialien für die Pellets und Holzkohleigenschaften abzielen.

Die Abbranddauer einer Pelletschüttung steigt mit der Schüttdichte. Die Simulationen zeigten, dass bei Vergleich von zwei Nadelholzsortimenten eine Steigerung der Schüttdichte um 8 % zu einer um ca. 6 % längeren Abbranddauer führt. Betrachtet man Pellets mit unterschiedlichen Längen, so verlängern sich die Abbrandzeiten mit kürzer werdenden Pellets. Längere Pellets brennen aufgrund der geringeren Schüttdichte sowie aufgrund der höheren resultierenden Partikeltemperaturen (und somit auch Betttemperaturen) schneller ab.

Bei Betrachtung verschiedener Holzarten (Fichte versus Buche) zeigt sich, dass sich die Gesamtabbranddauer aufgrund der schnelleren Zersetzungskinetik für Buchenholz (Laubholz) im Vergleich zu Fichte (Nadelholz) um rund 7 % verkürzt. Aufgrund des höheren Aschegehalts von Buchenpellets (im Durchschnitt um ca. 60 % höher) bildet sich nach dem Bettabbrand ein um ca. 50 % höheres Aschebett aus.

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen mit dem neuen Bettmodell bestätigten die experimentell festgestellten Trends. Sie ermöglichen einen besseren Einblick in die Vorgänge im Brennstoffbett und helfen, die komplexen Interaktionen einzelner Einflussparameter besser zu verstehen und daraus wichtige Informationen für die Gestaltung von Brennstoffmulden, Luftdüsen und die Regelung der Verbrennung zu erhalten.

10 Zusammenfassung

Brennstoffeigenschaften marktverfügbarer Holzpellets. Bei den insgesamt 28 marktverfügbaren Holzpelletsortimenten wurde hinsichtlich der nach DIN EN ISO 17225-2 geforderten Parameter eine Überschreitung des maximal zulässigen Aschegehalts von 0,7 m-% festgestellt und zweimal lag der Aschegehalt bei genau 0,7 m-%. Für 23 der 28 Sortimente lag der Aschegehalt unter 0,5 m-%. Zwei Sortimente wiesen eine zu niedrige mechanische Festigkeit auf und bei einem Sortiment lag der Feinanteil über 1,0 m-%. Damit erfüllten 26 der 28 untersuchten Sortimente die Anforderungen der Klasse A1 nach DIN EN ISO 17225-2. Bei den zusätzlich analysierten Parametern zeigte sich eine große Bandbreite bei den aerosolbildenden Elementen (383–1.036 mg/kg), wobei Kalium das dominierende Element war. Auch beim Si/K-Verhältnis lag eine große Bandbreite zwischen den untersuchten Sortimenten (0,2–2,4) vor. Der Karbonatgehalt in der bei 550 °C hergestellten Brennstoffasche lag zwischen 0,06 und 0,22 m-%. Der Laubholzanteil aus der NIR-Analyse deckt sich näherungsweise mit dem Gehalt an Kalium im Brennstoff. Die Partikeldichte der untersuchten Sortimente lag zwischen 1.239 kg/m³ und 1.330 kg/m³ und die Pellethärte zwischen 23 und 63 kg. Die Untersuchung des Stärkegehalts bestätigten die Angaben der Hersteller in den meisten Fällen. In zwei Fällen wurde allerdings ein erhöhter Anteil des Bindemittels (Stärkegehalt 1,7 m-% bis 1,9 m-%) festgestellt.

Hergestellte Versuchspellets. Bei den extra hergestellten Versuchspellets erfüllten neun Sortimente nicht die für die A1-Klasse erforderliche mechanische Festigkeit von 98 m-%. Dies kann für die jeweiligen Sortimente mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Verwendung gelagerten Pelletaushangsmaterials sowie die verwendete Holzart zurückgeführt werden. Außerdem standen zum Herstellungszeitpunkt dieser Pellets keine Matrizen zwischen 24 mm und 30 mm sowie zwischen 24 mm und 18 mm zur Verfügung. Bei der Verwendung von Fichte mit Rinde sowie Apfelhackschnitzel als Ausgangsmaterial wurde der zulässige Aschegehalt für A1-Pellets überschritten. Die Art der Zerkleinerung (Hammermühle oder Kollermühle) des Pelletaushangsmaterials konnte in der Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials nach Auflösen der Pellets näherungsweise nachvollzogen werden. Demnach weisen Pellets, bei denen das Ausgangsmaterial mit der Kollermühle zerkleinert wurde, einen höheren Anteil an Partikeln > 3,15 mm auf als bei der Trockenhammermühle. Die Summe der aerosolbildenden Elemente liegt für die untersuchten Laubhölzer und Fichte mit Rinde deutlich höher als für die untersuchten Nadelhölzer mit niedrigem Rindenanteil. Auch bei Zugabe von Bindemitteln wurde die Summe der aerosolbildenden Elemente teilweise erhöht. Die Holzarten Kiefer (2,61) und Douglasie (2,04) weisen ein vergleichsweise hohes Si/K-Verhältnis auf.

Schnellbestimmungsmethoden. Bei den untersuchten Schnellbestimmungsmethoden zeigte sich eine gute Vergleichbarkeit der Längenmessung nach Norm mit dem Messgerät pelletVISION, wobei eine leichte Überschätzung der Pelletlänge vor allem bei kurzen Pellets zu beobachten war. Der Ligno-Tester überschätzte die mechanische Festigkeit der untersuchten Pellets deutlich um durchschnittlich 0,7 m-%. Auch eine Nachrüstung des Siebkorbs beim Ligno-Tester brachte keine wesentliche Verbesserung. Zur Überprüfung der Brennstoffanforderungen scheint der Ligno-Tester eingeschränkt geeignet, wenn bei-

spielsweise die mechanische Festigkeit mindestens 98,7 m-% betragen soll, um sicherzustellen, dass bei Anwendung der Norm-Methode eine mechanische Festigkeit von über 98 m-% nachgewiesen werden kann. Die stereometrische Methode, d. h. Berechnung der Partikeldichte über Pelletlänge und Durchmesser, zeigte eine deutliche Unterschätzung der Partikeldichte im Vergleich zur Norm-Methode und ist daher ungeeignet. Die Methode mit einer Wasserverdrängung im Messzylinder lieferte ausreichend exakte Ergebnisse, wenn die Volumenteilung des Messzylinders hochauflösend gewählt wird (10 ml). In Abhängigkeit der gewählten Verweildauer der Pellets in der Tauchlösung ergab sich eine mittlere Unterschätzung von der Norm-Methode zwischen 0,5 % (fünf Sekunden) und 1,6 % (acht Sekunden). Ein weiterer Vorteil gegenüber der Norm-Methode ist neben dem geringeren Zeitaufwand, dass die Abhängigkeit des Messergebnisses von der Verweildauer der Pellets in der Lösung nur bis fünf Sekunden gegeben ist. Bei einer weiteren Erhöhung der Messdauer bleibt der Messwert des Messzylinders stabil, während sich der Wert der Norm-Methode weiter ändert. Daher scheint für die Messung der Partikeldichte mit dem Messzylinder eine Verweildauer von fünf Sekunden optimal. Wie bereits beschrieben, deckt sich der mittels NIR detektierte Laubholzanteil teilweise gut mit den Kaliumgehalten in den untersuchten Pellets. Die NIR-Methode könnte durch weitere Optimierung der hinterlegten Rechenmodelle eine mögliche Schnellbestimmungsmethode für den Kaliumgehalt, aber auch für die Energiedichte darstellen.

Förderversuche. Die fördermechanischen Versuche zeigten, dass der Feinanteil im Glutbett im Wesentlichen in der Förderschnecke der Pelletfeuerung sowie ggf. beim Einblasen in einen Lagerraum gebildet wird und nicht vom bereits im Brennstoff enthaltenen Feinanteil dominiert wird. Je nach mechanischer Festigkeit erhöhte sich der Feinanteil der untersuchten Sortimente beim Durchlaufen der Förderschnecke um bis zu 1,3 Prozentpunkte. Gleichzeitig erhöhte sich die Schüttdichte, aber die Pelletlänge wird durch die mechanische Beanspruchung in der Schnecke reduziert. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Feinanteil im Anlieferungszustand, wie er derzeit ermittelt wird, nur wenig Aussagekraft hinsichtlich des Emissionsverhaltens hat, da der tatsächliche Feinanteil in der Feuerung höher liegt und wiederum von der mechanischen Festigkeit und der Pelletlänge abhängt. Es scheint daher notwendig zu sein, eine geeignete Methode zu entwickeln, um den feuerungstechnisch relevanten Feinanteil des Brennstoffs zu ermitteln.

TGA-Versuche. Durch die umfangreichen TGA-Versuche konnten wesentliche Unterschiede zwischen Laubhölzern und Nadelhölzern hinsichtlich ihrer Gehalte an Hemicellulose, Cellulose und Lignin sowie ihres thermischen Zersetzungsverhaltens unter Pyrolysebedingungen festgestellt werden. Diese Daten bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Pelletbrennstoffbett-Abbrandmodells, die in Berichtsteil II dokumentiert ist.

Verbrennungsverhalten der marktverfügbaren Pellets. Die untersuchten marktverfügbaren Holzpellets weisen trotz A1-Qualität deutliche Unterschiede im Emissionsverhalten auf, sowohl bei den Pelletöfen als auch beim Pelletkessel. So liegt die Bandbreite der CO-Emissionen zwischen 68 und 468 mg/Nm³ für Pelletofen 1, während bei Pelletofen 2 CO-Emissionen zwischen 130 und 429 mg/Nm³ nachgewiesen wurden. Dabei wurden die geringsten CO-Emissionen nicht für das gleiche Sortiment an Pelletöfen 1 erzielt wie bei Pel-

letofen 2. Bei Pelletofen 1 wurde teilweise ein stark vom Druckverlust über das Glutbett oder vom Brennstoffmassenstrom abhängiges Emissionsverhalten festgestellt. Bei Betrachtung der Einzelwerte kann dies mit dem Aufbau des Glutbetts über die Messdauer von etwas mehr als zwei Stunden in Verbindung gebracht werden. Hier zeigt sich bei Pelletofen 1 ein technisches Defizit durch die nicht vorhandene Leistungsregelung bzw. durch die kaum mögliche automatische Anpassung der Brennstoffzufuhr, was jedoch bei Pelletofen 2 zumindest teilweise vorhanden ist. Die Gesamtstaubemissionen variieren zwischen 45 und 246 mg/Nm³ bei Pelletofen 1 und zwischen 22 und 58 mg/Nm³ auf einem deutlich niedrigeren Niveau bei Pelletofen 2. Dabei setzen sich bei Pelletofen 2 zu einem großen Teil die Partikel aus der unvollständigen Verbrennung (Ruß und Teere) zusammen, was vermutlich für Pelletofen 1 noch stärker ausgeprägt ist, jedoch aufgrund der vorgeschalteten Filterhülse nicht analysiert werden konnte.

Beim Pelletkessel liegen die Gesamtstaubemissionen größtenteils unter dem derzeit gültigen Grenzwert von 20 mg/Nm³, die Partikel bestehen überwiegend aus Salzen und Oxiden, die aus der Brennstoffzusammensetzung resultieren. Im Vergleich dazu besteht bei den untersuchten Pelletöfen noch erhebliches Minderungspotenzial durch eine entsprechende Optimierung der Feuerungstechnik. Während Pelletofen 1 und Pelletkessel 1 eine deutliche Übereinstimmung bei der Verschlackung in Form von Aschepartikeln > 2 mm zeigen, ist dies für Pelletofen 2 nicht der Fall. Hier scheinen weitere Mechanismen einen Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten bzw. die Versinterung zu haben. Es konnten für die Pelletöfen weder bei den gasförmigen noch den Gesamtstaubemissionen eindeutige Beziehungen zu einzelnen Brennstoffparametern der untersuchten Sortimente, wie z. B. zwischen Gesamtstaub und aerosolbildenden Elementen, identifiziert werden. Daher wird dieser Teil der Betrachtung in der statistischen Gesamtauswertung der Messergebnisse vertieft betrachtet (siehe Unterkapitel 7.3). Insgesamt scheint eine weitergehende Normierung der Brennstoffparameter hinsichtlich der großen Bandbreite bei den Emissionen der hier untersuchten marktverfügbaren A1-Pellets durchaus sinnvoll. Hierzu werden Ansatzpunkte in Unterkapitel 9.1 (siehe Tabelle 70) diskutiert.

Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen. Die Pelletlänge kann bei Pelletöfen einen signifikanten Einfluss auf die gasförmigen Emissionen haben. Hier wirken sich sowohl kurze als auch sehr lange Pellets negativ aus. Bei den Staubemissionen liegen keine signifikanten Unterschiede vor. In der Tendenz wirken sich längere Pellets eher positiv aus. Eine Anpassung der Brennstoffzufuhr, wie dies in vielen Bedienungsanleitungen empfohlen wird, kann sich sowohl positiv (gasförmige Emissionen und Staubemissionen bei der mittleren Pelletlänge) als auch negativ (Staubemissionen bei den kurzen Pellets) auswirken. Für den untersuchten Pelletkessel waren hingegen signifikante Unterschiede weder bei den gasförmigen noch bei den Gesamtstaubemissionen zu beobachten.

Hinsichtlich der Partikelanzahl zeigen lange Pellets einen sehr hohen Anteil ultrafeiner Partikel im Gegensatz zu mittleren und kurzen Pellets. Die wesentlichen Unterschiede bei der Zusammensetzung der Stäube entstehen durch unterschiedlich hohe Freisetzungen von Alkalimetallen aus dem Brennstoff, vermutlich temperaturbedingt oder durch Inhomogenität des Brennstoffs und unterschiedliche Anteile an elementarem Kohlenstoff (Ruß). Bei nicht leistungsgeregelten Pelletöfen führen kürzere Pellets zu einer höheren Verschla-

ckungsanfälligkeit durch höhere Glutbetttemperaturen. Dieser Effekt ist bei leistungsgeregelten Pelletöfen und Pelletkesseln vermutlich umgekehrt. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Pelletlänge an einer größeren Anzahl an Pelletöfen sowie mit Pellets aus homogenerem Rohstoff könnten hier differenziertere Informationen liefern, um bestimmte Effekte, wie z. B. die Änderung der Partikelanzahlverteilung, belastbar zu klären. Die Ergebnisse widersprechen teilweise den Ergebnissen aus der Literatur [95] [53], wobei die dort verwendeten Pelletsortimente wesentlich länger waren als die hier verwendeten Sortimente und auch wesentlich länger als die marktverfügbaren Pellets (Abschnitt 5.1.1).

Einfluss des Wassergehalts auf die Emissionen. Insgesamt scheinen sehr niedrige Wassergehalte zu erhöhten Emissionen zu führen. Dies gilt vor allem für Feuerungen ohne Regelung bzw. mit einer sehr einfachen oder sogar ganz fehlenden Leistungsregelung (v. a. Einzelraumfeuerungen). Zur Erhöhung der Gesamtstaubemissionen bei sehr trockenen Pellets tragen vor allem Partikel zwischen 40 und 127 nm aus elementarem Kohlenstoff bei. Dabei handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach vor allem um Rußpartikel, die durch die schnellere Brennstoffumsetzung sowie zu viel Energieeintrag in die Feuerungen (fehlende Leistungsregelung) und damit lokalen Sauerstoffmangel gebildet werden. Der Effekt des Wassergehalts auf die Verschlackung war für den untersuchten Pelletofen und -kessel gegenläufig. Hier ist keine feuerungsübergreifende Aussage möglich. Wassergehalte um 3 m-% kamen bei den marktverfügbaren Holzpellets einmal und Wassergehalte von 4–5 m-% dreimal vor, sie sind damit praxisrelevant. Dennoch sollten Pelletsortimente mit einem Wassergehalt von unter 5 m-% vor allem nicht bei Pelletöfen zum Einsatz kommen.

Einfluss des Feinanteils auf die Emissionen. Hohe Feinanteile können einen deutlich negativen Effekt auf die gasförmigen Emissionen (CO bis fünffach, org. C bis zehnfach) und die Gesamtstaubemissionen haben (bis 1,4-fach). Dies gilt vor allem für Abwurffeuerungen (die meisten Pelletöfen), da hier der Feinanteil von oben auf das Glutbett fällt, teilweise direkt als Funkenflug aufwirbelt und unverbrannte Partikel mit dem Abgasstrom mitgerissen werden oder die Flammen erstickt bzw. die Sauerstoffzufuhr zum Glutbett behindert wird. Der Effekt äußert sich bei Feinanteilen von ca. 3 m-% und steigert sich mit zunehmendem Feinanteil. Ein geringfügiger Effekt auf die Verschlackung scheint bei 3 m-% Feinanteil gegeben, wird aber bei höheren Feinanteilen von dem abkühlenden Effekt auf das Glutbett überlagert. Feinanteile von 3 m-% und darüber stammen meist entweder vom Abrieb in der Förderschnecke oder aus der Sedimentation im Pelletbunker und im Vorratsbehälter, vor allem wenn diese nicht regelmäßig gereinigt werden. Dieser Anteil des Feinanteils wird von den derzeitigen Normvorgaben nicht berücksichtigt, da hier nur der Feinanteil im Auslieferungszustand begrenzt ist.

Einfluss der Rohstoffaufbereitung auf die Emissionen. Es konnten keine signifikanten Einflüsse auf die gasförmigen Emissionen oder Gesamtstaubemissionen mit der Art der Rohstoffaufbereitung oder -lagerung in Verbindung gebracht werden. Wenn signifikante Unterschiede vorlagen, waren diese in den Inhomogenitäten der verwendeten Rohstoffe begründet. Unterschiede bei der Staubzusammensetzung waren einerseits wieder abhängig von der Inhomogenität der Rohmaterialien hinsichtlich des Kaliumgehalts. Anderer-

seits hatte bei den Emissionen an elementarem Kohlenstoff (Ruß) auch die Energiedichte einen Einfluss, die auch von der Rohstoffaufbereitung abhängt.

Einfluss von Bindemitteln auf die Emissionen. Die Untersuchungen zeigen, dass Bindemittel einen negativen Effekt auf die gasförmigen Emissionen und die Gesamtstaubemissionen haben können, der je nach Bindemittel unterschiedlich stark ausfällt. Die höheren Staubemissionen resultieren für den untersuchten Pelletkessel und Pelletofen aus einer durch das Bindemittel verursachten Erhöhung der Aerosolbildner, durch die höhere Gehalte an Salzen und Oxiden (meist Kaliumverbindungen) freigesetzt werden. Beim Pelletofen werden zusätzlich bei manchen Bindemitteln (hier weizenstärkehaltiges Mehl und Kartoffelstärke abfallender Qualität) die partikelförmigen Emissionen elementaren Kohlenstoffs erhöht. Beim Ascheschmelzverhalten zeigen zwei der untersuchten Bindemittel einen negativen und ein Bindemittel einen positiven Effekt. In allen Fällen zeigten sich die beobachteten negativen Effekte hinsichtlich der Emissionen und des Ascheschmelzverhaltens erst bei einer hohen Dosierung von 1,8 m-%, die der maximal erlaubten Bindemittelzugabe nach ENplus [34] entspricht. Daher wäre eine Reduzierung der Vorgabe für den maximal erlaubten Bindemittelgehalt zu empfehlen. Gleichzeitig ist nach Möglichkeit ein zu hoher Anteil in den Pellets sicher zu vermeiden.

Einfluss von Kaolinzugabe auf die Emissionen. Durch die Additivierung mit Kaolin wurden bei der hohen Dosierung von 0,34 m-% alle gasförmigen Emissionen sowohl für den Pelletofen als auch den Pelletkessel signifikant gesenkt. Bei der niedrigen Dosierung von 0,17 m-%, die nach Unterkapitel 3.4 berechnet wurde, wurden für den Pelletofen 2 im Vergleich zur reinen Fichte tendenziell leicht höhere CO- und Org.-C-Emissionen gemessen, beim Pelletkessel waren diese identisch mit denen der reinen Fichte. Die NO_x-Emissionen sanken für beide Feuerungen für beide Dosierungen leicht. Bei den Gesamtstaubemissionen zeigte sich für den Pelletofen bei der niedrigen Dosierung eine leichte (nicht signifikante) Abnahme, die dann bei der hohen Dosierung deutlich größer ausfiel (signifikant). Beim Pelletkessel dagegen zeigte sich für die niedrige Dosierung ein signifikanter Rückgang bei den Gesamtstaubemissionen, während diese sich bei der hohen Dosierung wieder auf das Niveau der reinen Fichte erhöhte. Hinsichtlich der Staubzusammensetzung führt eine Überdosierung von Kaolin beim Pelletofen zu einem Anstieg der EC- und OC-Emissionen, während beim Pelletkessel die Salze und Oxide der Aerosolbildner (Kaolin-austrag) anstiegen. Hier zeigt sich die nach Unterkapitel 3.4 berechnete Kaolindosierung als optimal. Dies gilt auch für das Ascheschmelzverhalten, das durch die niedrige Dosierung verbessert, jedoch durch die hohe Dosierung wieder verschlechtert wird. Eine weitere Erkenntnis ist, dass sich bei den mit Kaolin additivierten Pellets die Partikelverteilung der Staubpartikel deutlich in Richtung der ultrafeinen Partikel verschiebt. Dieser Effekt nimmt ebenfalls mit der Höhe der Kaolindosierung zu. Wenn Kaolin bei Holzpellets eingesetzt werden soll, müsste die nach Berechnung minimale Dosierung verwendet werden, die allerdings beim Pelletofen wahrscheinlich noch nicht den gewünschten Effekt auf die Staubemissionen hat. Die Beobachtung bezüglich der Verschiebung der Partikelgrößenverteilung hin zu den ultrafeinen Partikeln wäre anhand weiterer Feuerungsversuche in zukünftigen Projekten zu validieren.

Einfluss der Holzart auf die Emissionen. Die Untersuchungen zeigen, dass bei vergleichbarem Rindenanteil und Siliziumgehalt Nadelholzpellets niedrigere gasförmige und Gesamtstaubemissionen verursachen als Laubholzpellets. Die höheren Gesamtstaubemissionen ergeben sich vor allem durch den höheren Gehalt an Aerosolbildnern bei den Laubhölzern. Die Emissionen an NO_x sind maßgeblich vom Stickstoffgehalt der jeweiligen Holzart beeinflusst. Auch der meist höhere Aschegehalt (Ausnahme Eiche) kann sich bei Laubhölzern negativ auf die Emissionen auswirken. Laubhölzer neigen im Vergleich zu Nadelhölzern bei vergleichbarem Rindenanteil und Siliziumgehalt eher zur Versinterung.

Einfluss des Rindenanteils auf die Emissionen. Ein höherer Rindenanteil führt bei Fichte ebenfalls zu höheren gasförmigen und Gesamtstaubemissionen, kann sich aber positiv auf die Verschlackung auswirken. Ein höherer Siliziumgehalt bzw. ein höheres Si/K-Verhältnis hat einen deutlichen positiven Effekt auf die gasförmigen (CO , org.-C) und die Gesamtstaubemissionen, wirkt sich jedoch nachteilig auf die Verschlackung der Verbrennungsrückstände aus. Mit diesen Kenntnissen kann aber bei Typenprüfungen durch geschickte Auswahl siliziumreicher Brennstoffe kurzzeitig ein deutlich besseres Emissionsergebnis erzielt werden, da sich die Nachteile durch die Verschlackung erst bei einer längeren Versuchsdauer zeigen, als eine Nenn- bzw. Teillastmessung während der Typenprüfung üblicherweise in Anspruch nimmt.

Vorhersage zur Verschlackungsneigung mittels PASSA-Methode. In ihrem jetzigen Entwicklungsstand lieferte die bislang nur laborintern verwendete PASSA-Methode keine befriedigenden Ergebnisse hinsichtlich der Vorhersage bzw. Bewertung des Verschlackungsverhaltens der ausgewählten Pelletsortimente in realen Feuerungen. Sie führt teilweise zur Überschätzung bei eigentlich unproblematischen Sortimenten sowie zu einer deutlichen Unterschätzung der tatsächlich problematischen Sortimente mit hohem Si-Gehalt. Es sollte aber überprüft werden, inwieweit sich z. B. durch Anpassung der Gasatmosphäre im Muffelofen die PASSA-Methode optimieren lässt.

Schlackebildung in Langzeitmessungen. Es wurden Langzeitversuche mit vier ausgewählten Versuchspelletsortimenten aus dem Screening sowie aus eigener Herstellung an einem Kaminofen und einem Pelletkessel über acht Stunden und z. T. auch über 24 Stunden durchgeführt, um die Versinterungseffekte der Aschen zu studieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Brennstoffe und Feuerungen gerade im Langzeitverhalten sehr unterschiedlich und zum Teil unerwartet reagieren, weil sich nicht immer eine deutlich eintretende Agglomeratebildung, die auch durch eine deutliche Druckverlusterhöhung angezeigt wird, auf das Emissionsverhalten im Pelletofen auswirken muss. Die Versuche zeigen jedoch, dass Versinterungen, die vermutlich auch durch Karbonatschmelzen in der Asche begünstigt werden, erst bei größeren Aschemengen und langen Verweildauern der Asche in der heißen Zone des Brennertopfs eines Pelletofens auftreten. Hierdurch ergeben sich auch weitere Optimierungspotenziale bei der Feuerungstechnik.

Identifizierte Brennstoffparameter und deren Einfluss auf das Emissionsverhalten. Eine ausführliche Korrelationsanalyse zwischen den Brennstoffparametern und den ermittelten Emissionen wurde anhand der Daten zu den beiden Pelletöfen und zum Pelletkessel durchgeführt. Eine Übersicht über die in Unterkapitel 7.3 beschriebenen Korrelationen der

Emissionen mit den Brennstoffparametern ist in Form einer Matrix in Abschnitt 7.3.3, Tabelle 58 dargestellt. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse verdeutlichen, wie stark feuerungsspezifisch der Einfluss der relevanten Brennstoffparameter hinsichtlich der Feuerungsart (Pelletofen oder Pelletkessel), aber auch des Feuerraums oder der Brennerkopfgeometrie (Pelletöfen z. B. Energiedichte) ist. Dieser Umstand zeigt gerade bei den Pelletöfen die Dringlichkeit weiterer Untersuchungen an mehreren unterschiedlichen Pelletöfen, um hier eine belastbarere Datenbasis zu bekommen. Außerdem wird aus den Ergebnissen auch ersichtlich, dass moderne Pelletkessel wesentlich unempfindlicher auf die meisten Parameter aus der Liste reagieren als Pelletöfen.

Aus der Liste der mit ihrer Wirkung aufgeführten Brennstoffparameter sind lediglich die Pelletlänge, der Aschegehalt, der Feinanteil und der Heizwert in der aktuellen Norm bzw. in den Zertifizierungen (EN*plus*, DIN*plus*) reglementiert. Die Partikeldichte und der Massenanteil der Pellets < 10 mm werden derzeit diskutiert [43]. Die hier identifizierten zusätzlich wichtigen Brennstoffparameter mit dem größten Einfluss auf die Emissionen sind demnach der Kaliumgehalt bzw. der Laubholzanteil, der Karbonatgehalt in der 550 °C heißen Asche, die Energiedichte sowie das Si/K-Verhältnis bzw. der Siliziumgehalt. Der Laubholzanteil kann mittels NIR-Analyse bestimmt werden, die Bestimmung der Energiedichte ist aktuell in Entwicklung. Eine Schnellbestimmung von Kalium und Silizium wäre ebenfalls sinnvoll.

Des Weiteren ergab sich bei allen hier untersuchten Emissionen eine signifikante Korrelation mit den CO-Emissionen. Der Einsatz geeigneter CO-Sensoren könnte daher besonders für Pelletöfen einen Vorteil für die Optimierung der Regelung im Hinblick auf die Brennstoffflexibilität erbringen.

Umsetzungsprozesse im Feuerraum. Testserien mit Messungen der Brennstoffbetttemperaturen sowie der Gaszusammensetzungen und Gastemperaturen knapp oberhalb des Brennstoffbetts und in der Brennkammer erbrachten wichtige Erkenntnisse, die eine Basis zur weiteren Verbesserung der Feuerungstechnik darstellen. So wurde im Zuge dieser Testläufe festgestellt, dass die über das Zündelement in das Brennstoffbett eingebrachte Verbrennungsluft einen erheblichen Einfluss auf das Abbrandverhalten des Pelletbetts hat. Sie wirkt sich im stationären Betrieb durch den punktuell verstärkten Bettabbrand negativ auf die Bettentwicklung aus, weshalb dieser Lufteintrag nach erfolgter Zündung weitgehend unterbunden werden sollte. Außerdem zeigten diese spezifischen Messserien, dass Pelletöfen tendenziell mit zu hohem Primärluftverhältnis betrieben werden. Durch die Messungen konnten neue Daten zu Temperaturen und Gaszusammensetzungen am Brennstoffbettaustritt und in der Brennkammer, zu Temperaturschichtungen im Brennstoffbett im kontinuierlichen Betrieb sowie Informationen zur Änderung der Brennstoffbetthöhe über die Zeit sowie bezüglich der Aschedichte im Brennstoffbett erlangt werden. Diese Daten gaben weitere tiefere Einblicke in den Pelletbettabbrand und stellen eine sehr wichtige Grundlage für die Arbeiten zur Abbrandmodellierung dar.

Laborreaktorversuche. Die Verbrennungstests an einem bei BIOS speziell für derartige Versuche konzipierten Laborreaktor lieferten wichtige Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der Holzart auf das Abbrandverhalten (Lärchenpellets zeigten im Vergleich zu den

anderen untersuchten Holzarten eine langsamere Zündung, gefolgt von einem schnelleren Abbau), bezüglich des Einflusses der Pelletlänge auf das Abbrandverhalten (die Dauer der Flüchtigenfreisetzungphase nimmt bei kürzeren Pellets zu) und bezüglich des Pelletabbrands in einer Schüttung im Allgemeinen. Letztere umfassten vor allem Daten zum Zündverhalten, zur Dauer der Flüchtigenfreisetzung und des Holzkohlenausbrandes, zur Zusammensetzung der freigesetzten Gase und zu den Temperaturverteilungen über die Zeit, Daten zur Freisetzung von NO_x -Vorläufersubstanzen sowie Stoffdaten (Dichte, Schrumpfungsverhalten, mechanische Belastbarkeit) von Pellets in unterschiedlichen Ausbrandstadien. Diese Daten waren relevant für die Entwicklung, Prüfung und Bewertung des neuen Bettabbrandmodells (Berichtsteil II).

Quellenverzeichnis

- [1] AMANDUS KAHL GMBH & Co. KG (2012): Preßling – Härteprüfer. AK-14-D. Stand: 07/12. Amandus Kahl GmbH & Co. KG (Hrsg.). Hamburg, 2 Seiten
- [2] AMANDUS KAHL GMBH & Co. KG (2014): Kahl Fachmatrizenpressen für unterschiedlichste Einsatzbereiche. Typenübersicht. Reinbek bei Hamburg: Amandus Kahl GmbH & Co. KG, 2 Seiten
- [3] BERGHEL, J.; FRODESON, S.; GRANSTRÖM, K.; RENSTRÖM, R.; STÄHL, M.; NORDGREN, D. (2013): The effects of kraft lignin additives on wood fuel pellet quality, energy use and shelf life. *Fuel Processing Technology*, Jg. 112, Nr. 8 (August), S. 64–69
- [4] BOSCH, J.; SCHMERSAHL, R. (2013): Einmal um die Welt. Pellets – Markt und Trends, Nr. 04-13, S. 32–35
- [5] BRANCA, C.; ALBANO, A.; BLASI, C. (2005): Critical evaluation of global mechanisms of wood devolatilization. *THERMOCHIMICA ACTA*, Bd. 2005, Nr. 429, S. 133–141
- [6] BRUICE, P. Y.; LAZAR, T. (2013): Organische Chemie. Studieren kompakt; 5., aktual. Aufl. (2. Aufl. der dt. Ausg.). Pearson Studium – Media Packs. München: Pearson Studium, 1165 Seiten, ISBN 978-3-86894-102-9
- [7] BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I.; BORMAN, 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. March 2019. Graz: BIOS BIO-ENERGIESYSTEME GmbH, 31 Seiten
- [8] BRUNNER, T.; WOHLMUTHER, M.; KANZIAN, W.; OBERNBERGER, I.; PICHLER, W. (2015): Additivation Guideline - How to utilise inorganic additives as a measure to improve combustion related properties of agricultural biomass fuels. In: BAXTER, D.; OBERNBERGER, I. (Hrsg.): EUBCE 2015. Proceedings. 23rd European Biomass Conference & Exhibition. Messe Wien, Congress & Exhibition Center, Vienna, Austria, 1–4 June. Florence: ETA-Florence Renewable Energies, S. 1–11
- [9] BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (BMI) (2017): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV). Ausfertigungsdatum: 26.01.2010. Stand: zuletzt geändert durch Art. 16 Abs. 4 G. v. 10.03.2017 I 420. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). Berlin, 23 Seiten
- [10] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2005): PR CEN TS 15370: Feste Biobrennstoffe. Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche. Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen. Entwurf, Deutsche Fassung, Ausgabedatum 2005. Brüssel: Comité Européen de Normalisation (CEN), 12 Seiten
- [11] ANCA-COUCÉ, A.; TSEKOS, C.; RETSCHITZEGGER, S.; ZIMBARDI, F.; FUNKE, A.; BANKS, S.; KRAIA, T.; MARQUES, P.; SCHARLER, R.; JONG, W. D.; KIENZL, N. (2020): Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin. *Fuel*, Bd. 276, Nr. 4, S. 118002

- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (1990): DIN 51722: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Stickstoffgehaltes – Halbmikro-Kjeldahl-Verfahren. Berlin: Beuth-Verlag, 3 Seiten
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-1: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014); deutsche Fassung EN ISO 17225-1:2014; September 2014. Berlin: Beuth, 62 Seiten
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-2: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets (ISO 17225-2:2014); deutsche Fassung EN ISO 17225-2:2014; September 2014. Berlin: Beuth, 17 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16967: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Hauptelementen – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015); deutsche Fassung EN ISO 16967:2015; Juli 2015. Berlin: Beuth, 22 Seiten
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16968: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen (ISO 16968:2015); deutsche Fassung EN ISO 16968:2015; September 2015. Berlin: Beuth, 20 Seiten
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16994: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor (ISO 16994:2015); deutsche Fassung EN ISO 16994:2015; Juli 2015. Berlin: Beuth, 20 Seiten
- [18] 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 (ISO 18134-1:2015); deutsche Fassung EN ISO 18134-1:2015, Dezember 2015. Berlin: Beuth, 11 Seiten
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16948: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff (ISO 16948:2015); deutsche Fassung EN ISO 16948:2015; September 2015. Berlin: Beuth, 18 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18846: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an Feingut in Mengen von Pellets (ISO/DIS 18846:2015); deutsche und englische Fassung prEN ISO 18846:2015; Entwurf Mai 2015. Berlin: Beuth, 21 Seiten
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17827-2 : Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe – Teil 2: Vertikales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darunter (ISO 17827-2:2016); deutsche Fassung EN ISO 17827-2:2016; Oktober 2016. Berlin: Beuth, 19 Seiten
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17829: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets (ISO 17829:2015); deutsche Fassung EN ISO 17829:2015, März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten

- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17830: Biogene Festbrennstoffe – Partikelgrößenverteilung von Pellet-Ausgangsmaterial (ISO 17830:2016); deutsche Fassung EN ISO 17830:2016; November 2016. Berlin: Beuth, 18 Seiten
- [24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17831-1: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briquets – Teil 1: Pellets (ISO 17831-1:2015); deutsche Fassung EN ISO 17831-1:2015, Mai 2016. Berlin: Beuth, 16 Seiten
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18122: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes (ISO 18122:2015); deutsche Fassung EN ISO 18122:2015, März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17828: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte (ISO 17828:2015); deutsche Fassung EN ISO 17828:2015, Mai 2016. Berlin: Beuth, 17 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 14780: Biogene Festbrennstoffe – Probenherstellung (ISO 14780:2017); deutsche Fassung EN ISO 14780:2017; August 2017. Berlin: Beuth, 35 Seiten
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18125: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes (ISO 18125:2017); deutsche Fassung EN ISO 18125:2017; August 2017. Berlin: Beuth, 67 Seiten
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18135: Biogene Festbrennstoffe – Probenahme (ISO 18135 Biogene Festbrennstoffe – Probenahme (ISO 18135:2017); deutsche Fassung EN ISO 18135:2017; August 2017. Berlin: Beuth, 73 Seiten
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18134-2: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren (ISO 18134-2:2017); deutsche Fassung EN ISO 18134-2:2017; Mai 2017. Berlin: Beuth, 13 Seiten
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN EN ISO 21404: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens (ISO 21404:2020); Deutsche Fassung EN ISO 21404:2020; Juni 2020. Berlin: Beuth, 19 Seiten
- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): DIN EN ENTWURF 303-5: Heizkessel – Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung; deutsche und englische Fassung prEN 303-5:2018; Mai 2018. Berlin: Beuth, 195 Seiten
- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN EN ISO 17225-2 Entwurf: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets (ISO/DIS 17225-2:2020); deutsche und englische Fassung prEN ISO 17225-2:2020; April 2020. Berlin: Beuth, 31 Seiten
- [34] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI); PROPELLETS AUSTRIA; PROPELLETS.CH; EUROPEAN PELLET COUNCIL (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

- [35] 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. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 141 Seiten, ISSN 1614-1008
- [36] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): New indexes for the contamination of wood chips with mineral soil. In: FAAIJ, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy. Extracted from the Proceedings of the International Conference. 24th European Biomass Conference & Exhibition. RAI Amsterdam Exhibition and Congress Centre, Amsterdam, The Netherlands, 6–9 June. Florence: ETA-Florence Renewable Energies; WIP-Renewable Energies, S. 630–633, ISBN 9788889407165
- [37] DIN CERTCO GESELLSCHAFT FÜR KONFORMITÄTSMITBEWERTUNG MBH (2015): Holzpellets zur Verwendung in Kleinf Feuerungsstätten nach DIN EN ISO 17225-2 (A1). DIN plus – Zertifizierungsprogramm. Stand: Juni 2015. TÜV Rheinland AG (Hrsg.). Köln, Berlin: DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH, 17 Seiten
- [38] DÖRING, S. (2011): Pellets als Energieträger. Technologie und Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag, 257 Seiten, ISBN 978-3-642-01623-3
- [39] DÖHLING, F.; HARTMANN, I.; LENZ, V.; SCHRÖDER, T.; SONNTAG, J. V.; ULBRICHT, T.; HARTMANN, H.; SCHÖN, C.; TUROWSKI, P.; DIETRICH, D.; GAUGGEL, S.; AHLF, W.; GERTH, J.; GUTIÉRREZ, I.; HEGEMANN, B.; MÜLHOPT, S.; PAUR, H.-R.; BÖGE, O. (2012): Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen: Brennstoffeinfluss, Nutzer, Feuerungs-Wettbewerb, Sekundärmaßnahmen, Charakterisierung und Toxizität. Schlussbericht nach Anlage 2 zu Nr. 8.2 NKBF 98, FKZ 03MAP144, Projektnummer DBZ: 3130002. Stand: 03.12.2012. Leipzig. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), 188 Seiten
- [40] DORR-BIOMASSEHOF GMBH & Co. KG (2021): Wann entsteht hartnäckige Asche im Pelletofen? Asch bei Landsberg. URL: <https://pelletsabwerk.com/wann-entsteht-hartnaeckige-asche-im-pelletofen/>, 5 Seiten, (Stand: Februar 2021)
- [41] DUCA, D.; PIZZI, A.; ROSSINI, G.; MENGARELLI, C.; FOPPA PEDRETTI, E.; MANCINI, M. (2016): Prediction of Hardwood and Softwood Contents in Blends of Wood Powders Using Mid-Infrared Spectroscopy. Energy Fuels, Bd. 30, Nr. 4, S. 3038–3044
- [42] ELLNER-SCHUBERTH, F.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (2010): Partikelemissionen aus Kleinf Feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 22. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 135 Seiten, ISBN 1614-1008
- [43] EUROPEAN PELLET COUNCIL (EPC) (2020): ENplus® Wood Pellets – Requirements for Companies. ENplus® Standard 1001:201X DRAFT 34.31. Document valid worldwide including Germany. European Pellet Council (EPC) (Hrsg.). (Mitarb.): Ferrand, A., Franzen, J. Brussels, 44 Seiten
- [44] 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. 11, S. 10969–10977

- [45] 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. 11, S. 11724–11730
- [46] FÜRHAPPER, C.; WEIGL, M. (2020): Quantitative Untersuchung von Holzpellets hinsichtlich ihres Stärkegehalts. Bericht Auftrags-Nr.: 1286/2020 – HC vom 07.04.2020. Auftraggeber: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing. Wien: Holzforschung Austria, 5 Seiten
- [47] GEHRIG, M.; WÖHLER, M.; PELZ, S.; STEINBRINK, J.; THORWARTH, H. (2019): Kaolin as additive in wood pellet combustion with several mixtures of spruce and short-rotation-coppice willow and its influence on emissions and ashes. *Fuel*, Bd. 235, S. 610–616
- [48] 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, Nr. 1, S. 55–70
- [49] HÜLSMANN, T.; HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2018): Additivierung von Hackschnitzeln zur Emissionsminderung in Feuerungsanlagen. Abschlussbericht, gefördert unter dem Az 32975 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Laufzeit 16.01.2017–15.11.2017. Stand: 08.06.2018. Technische Universität Hamburg (Hrsg.). Hamburg: Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), 45 Seiten
- [50] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2016): CEN/TC 335; EN ISO 18847: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikeldichte von Pellets und Briketts (ISO 18847:2016). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 17 Seiten
- [51] 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
- [52] 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
- [53] KHALSA, J.; KIRSTEN, C.; LENZ, V.; THIEL, C.; ZENG, T. (2018): Grundlegende Voruntersuchungen zum Einsatz kleiner Holzpellets in Pelletöfen zur Emissionsminderung – Kleinpellets. Schlussbericht, Erstelldatum: 17.–19.12.2018, Laufzeit: 01.08.2016 bis 30.06.2018. Projektnummer DBFZ: 3130043; Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), 58 Seiten
- [54] 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
- [55] KUOKKANNEN, M.; VILPPO, T.; KUOKKANNEN, T.; STOOR, T.; NIINIMÄKI, J. (2011): Additives in wood pellet production – a pilot-scale study of binding agent usage. *Bio-Resources*, Bd. 6, Nr. 4, S. 4331–4355

- [56] 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
- [57] KUPTZ, D.; LESCHE, S.; MENDEL, T.; MACK, R.; RIST, E.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2020): Fuel properties, dry matter losses and combustion behavior of wood chips stored at aerobic and anaerobic conditions. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 142, S. 105745, 1–14
- [58] 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-Weihenstephan. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 506 Seiten
- [59] 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
- [60] LOO, S. V.; KOPPEJAN, J. (2007): *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. Authorized translation from the English language edition published by Twente University Press. Beijing: Chemical Industry Press, 256 Seiten, ISBN 978-7-122-01468-9
- [61] 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, S. 50–62
- [62] 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), 172 Seiten, ISSN 1614-1008
- [63] MANCINI, M.; MIRCOLI, A.; POTENA, D.; DIAMANTINI, C.; DUCA, D.; TOSCANO, G. (2020): Prediction of pellet quality through machine learning techniques and near-infrared spectroscopy. Preprint. *Computers & Industrial Engineering*, Bd. 147, Nr. 9 (September), S. 106566, 1–28
- [64] MANCINI, M.; TAAVITSAINEN, V.-M.; TOSCANO, G. (2019): Comparison of three different classification methods performance for the determination of biofuel quality by means of NIR spectroscopy. *Journal of Chemometrics*, Bd. 26, Nr. 4, S. 1–11
- [65] MANYÀ, J. J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. (2003): Kinetics of Biomass Pyrolysis. A Reformulated Three-Parallel-Reactions Model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bd. 42, Nr. 3, S. 434–441

- [66] MÜHLENBERG, J.; POLLEX, A.; ZENG, T. (2020): Development of a simple and rapid test method for Potassium to ensure fuel quality of woody biomass fuels. In: MAUGIN, P.; SCARLAT, N.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): Bioeconomy's role in the post-pandemic economic recovery. Papers of the 28th European Biomass Conference – extracted from the Proceedings of the International Conference held virtually, 6–9 July. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP Renewable Energies, S. 257–262
- [67] NUSSBAUMER, T. (2017): Aerosols from Biomass Combustion. Technical report on behalf of the IEA Bioenergy Task 32. 14 July 2017. Zürich. IEA Bioenergy Task 32, 32 Seiten, ISBN 3-908705-33-9
- [68] NUSSBAUMER, T. (2003): Combustion and Co-combustion of Biomass. Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy & Fuels, Bd. 17, Nr. 6, S. 1510–1521
- [69] NUSSBAUMER, T. (2021): Introduction to biomass combustion and pollutant reduction in wood stoves and boilers. In: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (Hrsg.): Residential Wood Combustion – Towards Low Emission Systems. IEA Bioenergy Webinar Task 32. Virtual Meeting, May 6. IEA Bioenergy Webinar Series. Copenhagen: International Energy Agency (IEA), S. 1–35
- [70] ÖKO-TEST VERLAG GMBH (2017): Auf dem Holzweg. Test Holzpellets. ÖKO-TEST Jahrbuch für 2018, Nr. J1710 Sonderheft, S. 90–93
- [71] ÖHMAN, M.; BOMAN, C.; HEDMAN, H.; NORDIN, A.; BOSTRÖM, D. (2004): Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. Biomass and Bioenergy, Bd. 27, Nr. 6, S. 585–596
- [72] ÖHMAN, M.; BOMAN, C.; HEDMAN, H.; EKLUND, R. (2006): Residential Combustion Performance of Pelletized Hydrolysis Residue from Lignocellulosic Ethanol Production. Energy & Fuels, Bd. 20, Nr. 3, S. 1298–1304
- [73] PANERU, M.; BABAT, S.; MAIER, J.; SCHEFFKNECHT, G. (2016): Role of potassium in deposit formation during wood pellets combustion. Fuel Processing Technology, Bd. 141, Nr. 2 (January), S. 266–275
- [74] PETROCELLI, D.; LEZZI, A. M. (2014): CO and NO emissions from pellet stoves. An experimental study. 31st UIT (Italian Union of Thermo-fluid-dynamics) Heat Transfer Conference 2013. Journal of Physics: Conference Series, Bd. 501, S. 012036, 1–11
- [75] PICHLER, W. (2009): Holzpellets – der Stärke auf der Spur. Neue Analyseverfahren zum Nachweis von Stärke in Holzpresslingen. Holzforschung Austria, Nr. 1, S. 10–11
- [76] POLLEX, A.; ZENG, T.; KHALSA, J.; ERLER, U.; SCHMERSAHL, R.; SCHÖN, C.; KUPTZ, D.; LENZ, V.; NELLES, M. (2018): Content of potassium and other aerosol forming elements in commercially available wood pellet batches. Fuel, Bd. 232, S. 384–394
- [77] POLONINI, L. F.; PETROCELLI, D.; PARMIGIANI, S. P.; LEZZI, A. M. (2018): Experimental study of PM emissions from wood pellet stoves with innovative burning pots. In: PERSSON, M.; SCARLAT, N.; GRASSI, A.; HELM, M. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy. Papers of the 26th European Biomass Conference – Extracted from the Proceedings of the International Conference. Copenhagen, Denmark, 14–17 May. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 1525–1531, ISBN 978-88-89407-18-9

- [78] REDAKTION „ÖKOTEST“ (2018): REAKTIONEN: Flammenco Qualitäts-Holzpellets. Öko-Test AG (Hrsg.). Frankfurt am Main. URL: https://www.oekotest.de/bauen-wohnen/Reaktionen-Flammenco-Qualitaets-Holzpellets_110824_1.html, 4 Seiten (Stand: 23.08.2021)
- [79] SCHMIDT, G.; TROUVÉ, G.; LEYSSENS, G.; SCHÖNNENBECK, C.; GENEVRAY, P.; CAZIER, F.; DEWAELE, D.; VANDENBILCKE, C.; FAIVRE, E.; DENANCE, Y.; LE DREFF-LORIMIER, C. (2018): Wood washing: Influence on gaseous and particulate emissions during wood combustion in a domestic pellet stove. *Fuel Processing Technology*, Bd. 174, S. 104–117
- [80] SCHÖN, C.; MACK, R.; HARTMANN, H. (2019): Quality Assessment of Wood Pellets for Residential Heating Systems and Combustion in Real and Laboratory Conditions. 2BV.4.3. 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. 667–672
- [81] 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
- [82] SIKANEN, L.; VILPPO, T. (2012): Small Scale Pilot Combustion Experiments with Wood Pellets – The Effect of Pellet Length. *The Open Renewable Energy Journal*, Bd. 5, Nr. 1, S. 1–6
- [83] SIPPULA, O.; HYTÖNEN, K.; TISSARI, J.; RAUNEMAA, T.; JOKINIEMI, J. (2007): Effect of Wood Fuel on the Emissions from a Top-Feed Pellet Stove. *Energy & Fuels*, Bd. 21, Nr. 2, S. 1151–1160
- [84] 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
- [85] 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
- [86] STÄHL, M.; BERGHEL, J.; FRODESON, S.; GRANSTRÖM, K.; RENSTRÖM, R. (2012): Effects on Pellet Properties and Energy Use when Starch is added in the Wood Fuel Pelletising Process. *Energy & Fuels*, Bd. 26, Nr. 3, S. 1937–1945
- [87] STÄHL, M.; FRODESON, S.; BERGHEL, J.; OLSSON, S. (2019): Using Secondary Pea Starch in Full-Scale Wood Fuel Pellet Production Decreases the Use of Steam Conditioning. In: OBERÖSTERREICHISCHER ENERGIESPARVERBAND (Hrsg.): World Sustainable Energy Days 2019. Europäische Energieeffizienz Konferenz, Europäische Pelletskonferenz, Young Energy Researchers Conference, Energiesparmesse; Fachexkursionen. Wels, Stadthalle, 27.02.–01.03. Wels: Oberösterreichischer Energiesparverband, S. 1–10

- [88] TOSCANO, G.; RINNAN, Å.; PIZZI, A.; MANCINI, M. (2017): The Use of Near-Infrared (NIR) Spectroscopy and Principal Component Analysis (PCA) To Discriminate Bark and Wood of the Most Common Species of the Pellet Sector. *Energy Fuels*, Bd. 31, Nr. 3, S. 2814–2821
- [89] TRUBETSKAYA, A.; JENSEN, P. A.; JENSEN, A. D.; GARCIA LLAMAS, A. D.; UMEKI, K.; GARDINI, D.; KLING, J.; BATES, R. B.; GLARBORG, P. (2016): Effects of several types of biomass fuels on the yield, nanostructure and reactivity of soot from fast pyrolysis at high temperatures. *Applied Energy*, Bd. 171, S. 468–482
- [90] 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
- [91] VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. (2013): An overview of the behaviour of biomass during combustion. Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. *Fuel*, Bd. 112, S. 391–449
- [92] VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. (2014): An overview of the behaviour of biomass during combustion. Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. *Fuel*, Bd. 117, S. 152–183
- [93] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2006): VDI 2066: Messen von Partikeln. Staubmessung in strömenden Gasen. Blatt 1: Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Ausgabedatum: 2006-11. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 111 Seiten
- [94] WARMING-JESPERSEN, M.; HVIDBERG, R. L. (2020): Eco+ Ready Boilers – Striving towards ultra low emissions. Nov. 2018–Dec. 2020. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBMV); LANDWIRTSCHAFTSKAMMER STEIERMARK; BIOENERGY AND SUSTAINABLE TECHNOLOGIES GMBH (BEST) (Hrsg.): CEBC 2020. Tagungsband – Proceedings. 6. Mitteleuropäische Biomassekonferenz. Graz, 22.–24. Jänner. Graz: Messe Congress Graz, S. 1–16, ISBN 978-3-9504380-4-8
- [95] 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, Nr. 5, S. 66–75
- [96] YANG, W.; ZHU, Y.; CHENG, W.; SANG, H.; XU, H.; YANG, H.; CHEN, H. (2018): Effect of minerals and binders on particulate matter emission from biomass pellets combustion. *Applied Energy*, Bd. 215, S. 106–115

Anhang 1: Analyseergebnisse Pelletscreening

Tabelle 71: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Wassergehalt, Schüttdichte, Partikeldichte und Pellethärte. SD – Standardabweichung, ar – as received, d – wasserfreie Bezugsbasis

Nr.	Wassergehalt m-%, ar	Schüttdichte gestaucht kg/m ³ , ar	SD –	Schüttdichte gestaucht kg/m ³ , d	SD –	Partikeldichte kg/m ³ , ar	SD –	Partikeldichte kg/m ³ , d	SD –	Pellet- härte kg	SD –
1	6,92	678	4,5	631	4,2	1.304	7,8	1.214	7,2	50	13,4
2	6,58	682	3,9	637	3,7	1.307	7,6	1.221	7,1	63	7,2
3	6,56	694	1,5	649	1,4	1.312	9,0	1.226	8,4	37	4,5
4	7,57	696	4,5	644	4,3	1.298	6,3	1.200	5,9	37	4,6
5	5,56	696	5,3	657	5,0	1.307	6,2	1.234	5,8	50	3,2
6	7,11	692	4,5	643	4,1	1.304	8,9	1.211	8,3	45	4,8
7	5,95	681	0,6	640	0,6	1.306	11,7	1.228	11,0	52	5,5
8	4,52	696	3,5	665	3,4	1.329	3,5	1.269	3,4	40	5,3
9	9,38	639	1,6	579	1,4	1.288	9,9	1.167	9,0	39	4,4
10	3,26	710	2,5	690	2,3	1.330	5,9	1.287	5,7	40	5,3
11	6,26	678	4,5	636	4,2	1.306	4,1	1.224	3,9	52	16,3
12	6,31	671	3,5	629	3,3	1.290	9,3	1.209	8,7	42	4,5
13	6,24	678	3,0	636	2,8	1.290	8,3	1.210	7,8	39	3,8
14	6,42	679	4,9	635	4,5	1.313	4,8	1.229	4,5	49	6,4
15	7,51	682	7,7	631	7,1	1.311	7,0	1.213	6,5	45	7,0
16	7,66	703	1,7	649	1,6	1.309	7,0	1.209	6,5	54	10,9
17	6,81	677	1,8	631	1,6	1.313	6,1	1.224	5,7	42	5,2
18	7,09	694	2,8	644	2,6	1.309	7,5	1.216	7,0	54	9,2
19	7,34	665	4,6	616	4,3	1.288	7,5	1.193	7,0	45	5,0
20	4,72	661	3,3	630	3,1	1.294	14,4	1.233	13,7	31	3,9
21	7,33	701	5,4	649	5,0	1.309	6,2	1.213	5,8	50	12,7
22	5,53	695	3,0	657	2,9	1.273	11,1	1.203	10,5	29	7,9
23	7,39	652	5,9	604	5,5	1.309	15,5	1.212	14,3	23	7,2
24	6,82	699	4,7	651	4,4	1.282	13,1	1.195	12,2	24	3,2
25	6,26	614	2,7	575	2,5	1.239	16,1	1.161	15,0	36	4,1
26	8,61	646	2,2	590	2,0	1.247	10,8	1.140	9,9	55	12,1
27	6,98	614	2,2	571	2,0	1.281	11,6	1.192	10,8	40	5,2
28	4,91	621	3,4	591	3,2	1.282	10,8	1.219	10,3	27	6,5

Tabelle 72: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Heizwert, Brennwert, Aschegehalt, Feinanteil mechanische Festigkeit, Energiedichte und Schüttungsporosität. *d* – wasserfreie Bezugsbasis, *ar* – as received

Nr.	Heizwert kJ/kg, d	Brennwert kJ/kg, d	Aschegehalt m-%, d	Feinanteil m-%, ar	Mechanische Festigkeit m-%, ar	Energie- dichte GJ/m ³ , ar	Schüttungs- porosität
1	18.618	19.946	0,280	0,0	99,4	11,6	0,48
2	18.814	20.163	0,307	0,0	99,3	11,9	0,48
3	19.167	20.474	0,309	0,0	99,3	12,3	0,47
4	18.843	20.171	0,315	0,0	99,5	12,0	0,46
5	19.309	20.637	0,321	0,2	98,4	12,6	0,47
6	18.918	20.246	0,321	0,0	99,3	12,0	0,47
7	18.761	20.110	0,323	0,0	99,3	11,9	0,48
8	18.892	20.241	0,331	0,1	98,7	12,5	0,48
9	18.989	20.318	0,335	0,1	98,2	10,9	0,50
10	19.240	20.588	0,335	0,3	98,9	13,2	0,47
11	18.717	20.045	0,338	0,0	99,3	11,8	0,48
12	18.505	19.854	0,350	0,0	99,3	11,5	0,48
13	18.917	20.266	0,350	0,0	99,0	11,9	0,47
14	18.690	20.039	0,363	0,0	99,4	11,8	0,48
15	18.800	20.107	0,370	0,2	99,2	11,7	0,48
16	18.989	20.317	0,372	0,1	99,0	12,2	0,46
17	18.567	19.916	0,376	0,3	99,1	11,6	0,48
18	18.715	20.064	0,380	0,0	99,3	11,9	0,47
19	18.732	20.081	0,403	0,1	99,2	11,4	0,48
20	19.088	20.436	0,417	0,5	98,6	12,0	0,49
21	18.866	20.173	0,461	0,0	99,4	12,1	0,46
22	18.852	20.200	0,493	0,0	99,4	12,3	0,45
23	19.077	20.425	0,504	0,2	97,2	11,4	0,50
24	19.021	20.370	0,567	0,1	99,1	12,3	0,46
25	19.046	20.395	0,628	0,1	98,7	10,9	0,50
26	19.040	20.325	0,695	0,2	98,3	11,1	0,48
27	19.044	20.392	0,701	0,1	98,6	10,8	0,52
28	18.665	20.014	0,809	1,1	96,9	11,0	0,52

Tabelle 73: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Pelletlänge, Durchmesser und Anteil an Pellets < 10 mm

Nr.	Mittlere Pellet- länge mm	Median Länge mm	Min mm	Max mm	SD	Mittlerer Durchmes- ser mm	Min mm	Max mm	SD	Anteil < 10 m m m-%
1	14,9	14,1	4,8	33,3	5,7	6,0	6,0	6,1	0,1	11,9
2	14,5	13,2	5,1	27,2	5,4	6,0	6,0	6,1	0,0	9,8
3	18,1	20,9	9,0	33,7	4,6	6,0	6,0	6,1	0,0	1,0
4	14,1	13,1	6,0	26,6	5,2	6,1	6,0	6,2	0,0	14,9
5	12,2	10,9	3,9	28,5	5,5	6,1	6,0	6,1	0,0	23,5
6	14,6	14,1	5,3	29,8	5,6	6,1	6,0	6,1	0,0	13,1

Nr.	Mittlere Pelletlänge mm	Median Länge mm	Min mm	Max mm	SD	Mittlerer Durchmesser mm	Min mm	Max mm	SD	Anteil < 10 m m m-%
7	12,3	12,0	3,8	30,3	5,3	6,1	6,0	6,2	0,1	23,2
8	11,6	11,3	4,3	28,0	4,2	6,0	6,0	6,1	0,0	26,7
9	13,0	12,1	3,1	34,0	5,4	6,2	6,1	6,3	0,1	17,6
10	10,5	10,0	3,2	25,9	4,6	6,1	n. b.	n. b.	n. b.	35,0
11	16,7	16,3	5,3	30,9	5,9	6,1	6,0	6,2	0,1	8,0
12	13,2	12,4	3,6	26,8	5,6	6,1	6,0	6,3	0,1	18,7
13	11,5	11,6	4,0	29,1	3,9	6,1	6,0	6,2	0,1	27,0
14	14,2	13,6	3,6	32,8	6,0	6,1	6,0	6,2	0,1	15,2
15	12,9	12,0	3,6	30,7	5,1	6,0	6,0	6,2	0,1	19,0
16	15,3	15,0	5,1	25,6	4,9	6,0	6,0	6,1	0,0	7,3
17	10,8	9,9	3,4	22,6	4,1	6,2	6,0	6,3	0,1	34,8
18	13,5	12,7	4,1	36,3	6,0	6,0	6,0	6,1	0,0	17,8
19	12,0	11,3	4,5	29,2	5,1	6,1	6,0	6,2	0,0	23,6
20	11,3	10,7	5,5	23,6	3,8	6,2	6,1	6,2	0,0	27,2
21	14,7	14,4	7,4	29,7	4,2	6,0	5,9	6,0	0,0	9,6
22	13,6	13,0	3,7	31,7	5,3	6,2	6,1	6,2	0,0	15,5
23	9,0	8,6	4,6	16,9	2,6	6,2	6,0	6,3	0,1	58,0
24	12,9	12,0	4,6	27,5	4,8	6,2	6,1	6,6	0,1	20,4
25	10,4	10,3	3,8	24,3	3,7	6,3	6,2	6,4	0,1	32,0
26	11,2	10,1	3,7	32,6	4,7	6,3	6,1	6,4	0,1	30,9
27	11,1	10,2	5,0	22,4	3,8	6,3	6,1	6,5	0,2	34,0
28	8,7	7,5	3,2	26,3	4,0	6,2	6,1	6,6	0,1	57,5

Tabelle 74: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangmaterials

Nr.	>3,15 mm m-%	2,8– 3,15 mm m-%	2,0– 2,8 mm m-%	1,4– 2,0 mm m-%	1,0– 1,4 mm m-%	0,5– 1,0 mm m-%	0,25– 0,5 mm m-%	<0,25 mm m-%
1	0,7	0,0	1,7	8,9	20,5	36,7	21,3	10,2
2	4,6	0,1	5,1	15,8	20,5	29,3	15,5	9,1
3	1,7	0,0	2,9	11,6	19,7	33,2	18,9	12,0
4	0,9	0,0	2,0	9,9	21,8	35,4	20,4	9,5
5	2,9	0,0	3,9	13,2	19,0	30,2	16,6	14,1
6	0,9	0,0	2,3	11,3	22,8	35,9	18,2	8,5
7	0,5	0,0	1,6	8,5	19,4	38,2	21,2	10,6
8	5,2	0,0	5,1	16,8	21,8	27,6	13,0	10,6
9	0,6	0,0	1,8	9,8	19,4	36,5	21,3	10,5
10	0,7	0,0	1,4	8,0	19,3	37,8	19,3	13,4
11	0,4	0,0	1,2	7,3	18,1	41,0	20,7	11,3
12	0,5	0,0	1,3	9,7	22,7	37,7	19,3	8,8
13	3,7	0,0	4,7	14,2	19,4	28,9	16,0	13,1
14	0,7	0,0	1,9	9,7	21,6	37,9	18,9	9,3
15	0,5	0,0	1,7	8,7	21,2	37,9	19,5	10,6
16	1,2	0,0	2,2	10,5	21,3	37,1	18,6	9,2

17	2,5	0,0	4,2	13,9	20,1	33,4	18,4	7,3
18	4,7	0,0	4,9	12,7	19,6	31,6	17,4	9,0
19	0,3	0,0	1,3	7,7	20,3	39,3	19,7	11,2
20	0,4	0,0	1,7	6,1	11,4	30,0	25,6	24,7
21	1,9	0,0	3,0	10,5	16,7	29,7	19,9	18,4
22	0,2	0,0	1,1	7,9	17,8	39,6	22,5	10,8
23	0,2	0,0	0,5	3,9	9,9	34,4	29,8	21,4
24	1,3	0,1	2,3	10,6	18,1	30,0	19,3	18,2
25	1,0	0,0	2,0	7,8	13,1	28,6	25,3	22,0
26	1,0	0,0	2,3	10,5	18,9	34,4	22,5	10,3
27	1,3	0,0	2,1	8,7	14,2	30,8	25,0	18,0
28	9,1	0,0	9,6	18,8	16,5	22,2	15,1	8,8

Tabelle 75: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Partikelgrößenverteilung des Pelletaushangsmaterials und Zuordnung nach I-Klassen für Industrieholzpellets DIN EN ISO 17225-2

Nr.	Summe < 3,15 mm	Summe < 2,0 mm	Summe < 1,0 mm	I Klasse nach ISO 17225-2
	m-%	m-%	m-%	
1	99	98	68	I1
2	95	90	54	keine
3	98	95	64	I2
4	99	97	65	I1
5	97	93	61	I3
6	99	97	63	I1
7	99	98	70	I1
8	95	90	51	keine
9	99	98	68	I1
10	99	98	71	I1
11	100	98	73	I1
12	100	98	66	I1
13	96	92	58	keine
14	99	97	66	I1
15	100	98	68	I1
16	99	97	65	I2
17	97	93	59	I3
18	95	90	58	keine
19	100	98	70	I1
20	100	98	80	I1
21	98	95	68	I2
22	100	99	73	I1
23	100	99	86	I1
24	99	96	68	I2
25	99	97	76	I2
26	99	97	67	I1
27	99	97	74	I2
28	91	81	46	keine

Tabelle 76: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Elementaranalyse Teil 1 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis), O-Gehalt berechnet

Nr.	C m-%	H m-%	O m-%	N m-%	S m-%	Cl m-%	Al mg/kg g	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	Si mg/kg
1	50,4	6,1	43,4	0,06	< 0,005	< 0,005	< 10	816	427	117	< 10	55	< 100
2	50,9	6,2	42,8	0,13	0,015	< 0,005	< 10	760	471	161	< 10	74	< 100
3	50,7	6,0	43,2	0,11	< 0,005	< 0,005	32	771	423	122	22	30	< 100
4	50,8	6,1	43,1	< 0,05	0,005	< 0,005	< 10	858	442	126	16	85	< 100
5	51,2	6,1	42,6	0,08	0,009	< 0,005	< 10	876	447	174	< 10	65	< 100
6	50,4	6,1	43,4	0,09	< 0,005	< 0,005	12	668	445	120	17	46	145
7	50,7	6,2	43,0	0,11	0,007	< 0,005	< 10	953	462	134	< 10	69	114
8	50,6	6,2	43,1	0,13	0,008	< 0,005	13	877	409	129	< 10	49	< 100
9	50,3	6,1	43,5	0,07	< 0,005	< 0,005	22	787	488	176	< 10	63	< 100
10	51,3	6,2	42,4	0,1	0,006	0,005	–	790	430	160	17	–	412
11	50,6	6,1	43,3	< 0,05	0,006	< 0,005	19	830	419	133	< 10	56	< 100
12	50,5	6,2	43,2	0,10	< 0,005	< 0,005	36	851	545	142	17	61	129
13	50,5	6,2	43,2	0,08	0,005	0,006	15	838	407	106	18	33	132
14	50,4	6,2	43,3	0,10	< 0,005	< 0,005	< 10	763	418	128	< 10	47	< 100
15	50,8	6,0	43,2	< 0,05	< 0,005	< 0,005	20	867	426	130	12	48	< 100
16	50,2	6,1	43,6	0,07	0,007	< 0,005	< 10	677	402	129	< 10	46	245
17	50,8	6,2	42,9	0,11	0,006	< 0,005	23	938	599	150	11	97	< 100
18	50,7	6,2	43,0	0,12	0,023	0,006	14	961	449	116	< 10	63	116
19	50,8	6,2	43,0	< 0,05	< 0,005	< 0,005	19	915	446	136	24	49	< 100
20	51,3	6,2	42,3	0,21	0,009	< 0,005	17	874	500	175	< 10	74	132
21	50,7	6,0	43,3	< 0,05	< 0,005	< 0,005	68	972	493	157	11	59	262
22	51,0	6,2	42,6	0,20	0,009	0,006	38	1.070	676	179	18	103	331
23	51,2	6,2	42,5	0,09	0,007	< 0,005	36	1.010	372	168	< 10	59	434
24	50,9	6,2	42,8	0,12	0,008	< 0,005	58	1.040	680	185	29	96	357
25	51,3	6,2	42,4	0,12	0,008	< 0,005	66	1.240	461	189	12	102	502
26	51,5	5,9	42,4	0,17	0,008	0,008	79	1.710	607	223	93	50	402
27	51,1	6,2	42,6	0,08	0,008	< 0,005	113	1.040	455	188	43	102	785
28	50,4	6,2	43,3	0,13	0,009	< 0,005	17	1.970	1.020	272	< 10	99	158

Tabelle 77: Analyseergebnisse zum Pelletscreening: Elementaranalyse Teil 2 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)

Nr.	As mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg-	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Hg mg/kg	Zn mg/kg
1	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	32	2	66	< 1	< 0,05	9
2	< 0,8	< 2	< 0,2	9	70	1	101	3	< 0,05	12
3	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	34	< 1	152	< 1	< 0,05	10
4	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	14	< 1	170	< 1	< 0,05	9
5	< 0,8	< 2	0,2	< 1	8	< 1	121	< 1	< 0,05	10
6	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	17	< 1	140	< 1	< 0,05	4
7	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	21	< 1	141	< 1	< 0,05	9
8	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	40	< 1	130	< 1	< 0,05	11
9	< 0,8	< 2	< 0,2	1	23	< 1	98	< 1	< 0,05	8
10	< 0,8	< 2	0,4	5	–	4	–	1	0,07	9
11	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	27	< 1	148	< 1	< 0,05	8
12	< 0,8	< 2	0,2	< 1	47	< 1	172	< 1	< 0,05	11
13	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	18	1	121	< 1	< 0,05	10
14	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	14	1	145	< 1	< 0,05	9
15	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	22	1	147	< 1	< 0,05	11
16	< 0,8	< 2	0,3	< 1	16	< 1	180	< 1	< 0,05	13
17	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	33	1	108	< 1	< 0,05	11
18	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	23	< 1	101	< 1	< 0,05	8
19	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	27	2	146	< 1	< 0,05	11
20	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	29	2	84	< 1	< 0,05	7
21	< 0,8	< 2	0,2	< 1	105	< 1	165	< 1	< 0,05	12
22	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	46	1	99	< 1	< 0,05	13
23	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	43	< 1	89	< 1	< 0,05	11
24	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	101	3	75	< 1	< 0,05	14
25	< 0,8	< 2	< 0,2	1	61	2	99	< 1	< 0,05	10
26	< 0,8	< 2	< 0,2	1	101	4	63	< 1	< 0,05	11
27	< 0,8	< 2	< 0,2	1	69	7	104	< 1	< 0,05	9
28	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	22	1	93	< 1	< 0,05	16

Anhang 2: Analysenergebnisse Versuchsbrennstoffe

In Tabelle 79 bis Tabelle 85 sind die vollständigen Analysenergebnisse der Versuchsbrennstoffe tabellarisch dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Brennstoffe nach Tabelle 78 durchnummeriert und dem verwendeten Rohmaterial, Additiv und den in den Kapiteln 5 bis 7 verwendeten Diagrammbeschriftungen gegenübergestellt.

Tabelle 78: Nummerierung der Versuchsbrennstoffe für die Übersichtstabellen zu den Analyseergebnissen im Anhang 2

Nr.	Diagrammbeschriftung	Rohmaterial	Additiv
1	Pellets lang	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Weizenstärkehaltiges Mehl
2	Pellets normal	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Weizenstärkehaltiges Mehl
3	Pellets mittel	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Weizenstärkehaltiges Mehl
4	Pellets kurz	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Weizenstärkehaltiges Mehl
5	Fichte Kollermühle/ Fichte NP Hack-schnitzel / Flach KM/HS	TMP-Hackgut für Papierindustrie	–
6	Fichte Nullprobe/Fichte 1/ Flach HM	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	–
7	Fichte < PD	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	–
8	Fichte 0,5 WS	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Weizenstärkehaltiges Mehl
9	Fichte 1,8 WS	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	1,8 m-% Weizenstärkehaltiges Mehl
10	Fichte 0,5 KSn	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Kartoffelstärke nativ
11	Fichte 1,8 KSn	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	1,8 m-% Kartoffelstärke nativ
12	Fichte 0,5 KSa	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,5 m-% Kartoffelstärke abfallende Qualität
13	Fichte 1,8 KSa	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	1,8 m-% Kartoffelstärke abfallende Qualität
14	Fichte 0,17 Kaolin	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,17 m-% Kaolin CSP
15	Fichte 0,34 Kaolin	Fichte: Sägespan trocken, zerkleinert mit Hammermüh	0,34 m-% Kaolin CSP
16	Fichte gelagert BB	Fichten Sägespan feucht, 7 Monate gelagert im Bigbag	–
17	Fichte gelagert Mieta	Fichten Sägespan feucht, 7 Monate gelagert als Mieta	–
18	Fiche 2	Fichtenhackgut mit Rinde	–
19	Kiefer	Kiefernbohlen, gehackt	–
20	Lärche	Lärchenbretter gehackt	–
21	Douglasie	Sägespan feucht	–
22	Tropenholzmischung	Als Pellets geliefert	–

Nr.	Diagrammbeschriftung	Rohmaterial	Additiv
23	Buche 1	Als Pellets geliefert	–
24	Buche 2	Buchenrundlinge gehackt	–
25	Eiche 1	Eichenkapfstücke ohne Rinde gehackt	–
26	Eiche 2	Sägespan feucht	–

Tabelle 79: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Wassergehalt, Schüttdichte, Partikeldichte und Pellethärte. SD = Standardabweichung

Nr.	Wassergehalt	Schüttdichte gestaucht	SD	Schüttdichte gestaucht	SD	Partikeldichte	SD	Partikeldichte	SD	Pellet-härte	SD
	m-%, ar	kg/m ³ , ar	–	kg/m ³ , d	–	kg/m ³ , ar	–	kg/m ³ , d	–	kg	–
1	7,7	670	3,6	619	3,3	1.311	7,1	1.210,0	6,5	51,0	6,0
2	7,7	703	1,7	649	1,6	1.309	7,0	1.208,7	6,5	53,8	10,9
3	7,6	707	0,7	653	0,6	1.319	5,4	1.218,8	5,0	40,6	7,0
4	7,7	714	1,9	659	1,8	1.316	3,7	1.214,7	3,4	46,6	4,8
5	5,9	721	5,2	678	4,9	1.342	4,2	1.262,5	4,0	41,0	4,5
6	6,6	692	3,4	646	3,2	1.312	4,0	1.224,8	3,7	35,8	5,6
7	7,0	660	1,8	614	1,7	1.301	5,9	1.210,3	5,5	21,4	4,2
8	7,8	680	4,4	628	4,0	1.310	5,5	1.208,2	5,1	40,0	4,4
9	7,2	709	3,0	657	2,8	1.319	6,0	1.223,7	5,6	40,2	5,9
10	7,5	670	3,2	619	2,9	1.292	4,8	1.194,5	4,5	42,8	4,1
11	8,5	646	4,7	591	4,3	1.283	6,2	1.173,8	5,7	44,4	9,8
12	7,9	651	4,0	599	3,7	1.291	7,4	1.188,6	6,8	37,6	3,0
13	8,6	643	4,4	588	4,0	1.268	7,0	1.158,9	6,4	39,6	8,6
14	8,1	678	4,4	623	4,0	1.296	5,5	1.192,0	5,1	37,2	6,3
15	7,9	671	3,9	618	3,5	1.294	5,2	1.191,7	4,8	36,6	9,2
16	7,0	688	2,4	640	2,2	1.299	12,9	1.208,3	12,0	43,6	4,3
17	7,7	684	4,9	631	4,6	1.299	7,1	1.198,8	6,6	34,6	2,3
18	7,7	720	5,9	670	5,4	n. b.		n. b.		45,6	5,5
19	8,7	671	1,3	612	1,2	1.287	11,2	1.174,8	10,2	37,6	6,7
20	9,7	701	1,5	632	1,3	1.319	3,9	1.190,8	3,5	66,4	1,1
21	8,9	690	2,8	635	2,5	1.341	6,7	1.221,0	6,1	23,4	5,2
22	8,6	650	2,2	590	2,0	1.247	10,8	1.139,6	9,9	24,0	3,2
23	6,2	691	0,7	647	0,7	1.310	4,8	1.228,4	4,5	40,0	3,4
24	7,8	680	3,4	630	3,2	n. b.		n. b.		45,8	3,8
25	7,4	666	5,4	617	5,0	1.275	6,1	1.180,6	5,6	50,8	5,0
26	8,0	675	5,1	615	4,7	1.268	7,7	1.166,7	7,1	43,6	7,3

Tabelle 80: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Heizwert, Brennwert, Aschegehalt, Feinanteil, mechanische Festigkeit, Energiedichte und Schüttungsporosität

Nr.	Heizwert kJ/kg, d	Brennwert kJ/kg, d	Aschegehalt m-%, d	Feinanteil m-%, ar	Mechanische Festigkeit m-%, ar	Energie- dichte GJ/m ³ , ar	Schüttungs- porosität –
1	18.899	20.227	0,38	0,2	98,7	11,6	0,49
2	18.989	20.317	0,37	0,1	99,0	12,2	0,46
3	18.873	20.202	0,46	0,1	99,1	12,2	0,46
4	19.005	20.333	0,46	0,2	98,9	12,4	0,46
5	18.792	20.121	0,33	0,0	98,8	12,6	0,46
6	18.854	20.182	0,41	0,1	98,6	12,1	0,47
7	19.045	20.373	0,44	0,5	94,1	11,6	0,49
8	19.058	20.386	0,44	0,1	98,8	11,8	0,48
9	18.861	20.189	0,44	0,1	98,4	12,3	0,46
10	18.790	20.160	0,39	0,1	97,0	11,5	0,48
11	18.755	20.104	0,39	0,1	98,0	11,0	0,50
12	18.683	20.032	0,33	0,1	97,2	11,1	0,50
13	18.959	20.266	0,39	0,1	98,6	11,0	0,49
14	18.799	20.148	0,48	0,1	97,3	11,6	0,48
15	18.779	20.128	0,63	0,1	97,0	11,5	0,48
16	18.740	20.089	0,32	0,1	93,9	11,9	0,47
17	19.133	20.461	0,29	0,1	97,3	11,9	0,47
18	18.875	n. b.	0,83	0,0	96,6	12,4	0,45
19	19.524	20.872	0,61	0,3	98,0	11,8	0,48
20	18.913	20.219	0,39	0,0	99,5	11,8	0,47
21	18.878	20.184	0,38	0,1	97,6	11,7	0,49
22	19.040	20.325	0,70	0,2	98,3	11,8	0,47
23	18.432	19.740	0,63	0,2	98,7	11,5	0,48
24	18.559	n. b.	0,56	0,1	98,2	11,1	0,48
25	18.264	19.571	0,27	0,1	98,5	11,4	0,47
26	18.582	19.825	0,36	0,0	99,3	11,2	0,48

Tabelle 81: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Pelletlänge und Durchmesser sowie Anteil an Pellets < 10 mm

Nr.	Mittlere Pellet- länge mm	Median Länge mm	Min mm	Max mm	SD	Mittlerer Durchmes- ser mm	Min mm	Max mm	SD	Anteil < 10 mm m-%
1	17,0	15,9	4,1	32,8	5,9	6,0	6,0	6,1	0,0	5,1
2	15,3	15,0	5,1	25,6	4,9	6,0	6,0	6,1	0,0	7,3
3	15,5	15,6	6,1	24,9	3,3	6,0	6,0	6,1	0,0	2,8
4	10,3	10,0	4,4	21,5	3,3	6,0	6,0	6,1	0,0	37,4
5	15,5	5,1	5,2	25,8	15,2	6,0	5,9	6,0	0,0	8,1
6	17,0	5,0	6,4	26,2	18,2	6,0	6,0	6,1	0,0	7,4
7	13,9	5,1	3,7	25,0	13,2	6,0	6,0	6,2	0,1	14,2
8	17,3	5,6	4,7	31,1	18,7	6,0	6,0	6,1	0,0	5,1

Nr.	Mittlere Pelletlänge mm	Median Länge mm	Min mm	Max mm	SD	Mittlerer Durchmesser mm	Min mm	Max mm	SD	Anteil < 10 mm m-%
9	18,3	5,2	5,2	28,3	18,6	6,0	6,0	6,1	0,0	4,1
10	21,9	22,7	10,2	30,5	5,0	6,0	5,9	6,3	0,1	4,1
11	23,0	23,2	14,3	30,7	3,8	6,1	5,9	6,3	0,1	5,5
12	21,7	22,0	8,0	30,4	5,2	6,1	5,9	6,2	0,1	3,5
13	21,4	22,5	8,0	30,7	5,1	6,2	6,0	6,4	0,1	3,3
14	21,1	21,6	7,2	31,0	4,9	6,0	6,0	6,1	0,1	1,9
15	21,8	22,5	10,4	31,7	5,0	6,0	5,9	6,1	0,0	7,6
16	19,3	26,8	5,1	29,3	6,3	5,9	5,8	6,0	0,1	3,6
17	21,7	21,6	7,6	30,1	5,5	6,0	5,9	6,1	0,0	2,0
18	15,0	14,7	3,9	25,9	5,4	5,7	5,7	5,8	0,0	9,7
19	11,3	4,4	4,3	22,9	11,1	6,0	5,9	6,1	0,0	26,6
20	18,8	4,9	5,8	26,1	20,7	6,0	5,9	6,0	0,0	3,0
21	18,7	22,3	9,8	29,1	4,2	6,0	5,9	6,2	0,1	0,5
22	11,2	10,1	3,7	32,6	4,7	6,3	6,1	6,4	0,1	30,9
23	16,5	5,9	4,5	27,7	16,1	6,1	6,0	6,2	0,1	8,0
24	16,9	17,0	8,1	35,1	5,3	6,0	6,0	6,1	0,1	3,2
25	21,0	21,3	9,8	31,5	4,4	5,9	5,8	6,1	0,1	0,5
26	21,8	22,5	11,9	28,5	2,8	5,9	5,9	6,1	0,1	0,0

Tabelle 82: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Partikelgrößenverteilung Pelletaustauschmaterial

Nr.	> 3,15 mm m-%	2,8– 3,15 mm m-%	2,0– 2,8 mm m-%	1,4– 2,0 mm m-%	1,0– 1,4 mm m-%	0,5– 1,0 mm m-%	0,25– 0,5 mm m-%	< 0,25 mm m-%
1	1,5	0,0	3,1	13,3	25,5	34,3	15,3	7,0
2	1,2	0,0	2,2	10,5	21,3	37,1	18,6	9,2
3	1,5	0,0	2,9	11,9	19,0	38,8	18,5	7,4
4	1,5	0,0	2,8	11,5	21,3	37,2	17,5	8,2
5	9,6	0,1	7,6	15,8	15,8	23,3	15,3	12,5
6	0,9	0,0	2,0	8,5	17,0	34,8	20,8	16,0
7	0,9	0,0	1,9	8,4	16,0	33,8	22,9	16,2
8	1,2	0,0	2,3	9,7	18,4	36,2	21,1	11,0
9	0,9	0,0	1,9	9,4	17,9	36,0	22,2	11,7
10	1,0	0,1	2,0	8,9	15,8	37,4	20,4	14,5
11	1,7	0,0	2,6	10,6	18,4	37,0	20,8	8,7
12	1,3	0,0	2,2	9,1	18,4	37,3	19,3	12,0
13	1,5	0,0	2,4	10,6	21,0	38,2	17,0	8,8
14	1,2	0,1	2,0	8,3	15,5	35,6	23,1	14,1
15	1,0	0,1	1,9	8,6	16,8	33,5	21,7	16,0
16	5,4	0,1	4,4	9,2	12,9	28,8	21,0	18,2
17	2,5	0,1	3,3	8,8	13,4	33,3	22,3	16,3
18	10,4	0,1	8,6	16,5	16,1	22,0	12,8	13,4
19	8,4	0,1	8,2	17,8	16,1	21,1	13,3	15,1
20	7,4	0,2	11,3	16,1	13,4	19,6	14,5	17,5

Nr.	> 3,15 mm m-%	2,8– 3,15 mm m-%	2,0– 2,8 mm m-%	1,4– 2,0 mm m-%	1,0– 1,4 mm m-%	0,5– 1,0 mm m-%	0,25– 0,5 mm m-%	< 0,25 mm m-%
21	8,8	0,1	4,3	8,7	13,1	28,7	21,0	15,4
22	1,3	0,1	2,3	10,6	18,1	30,0	19,3	18,2
23	0,1	0,0	0,5	2,7	4,2	15,7	36,1	40,6
24	1,8	0,1	2,1	5,6	8,0	21,6	27,5	33,4
25	7,7	0,2	6,8	13,5	13,6	22,9	16,4	18,9
26	3,9	0,1	2,6	5,0	5,9	24,6	29,7	28,3

Tabelle 83: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Partikelgrößenverteilung Pelleta Ausgangsmaterial Auswertung nach I-Klassen für Industrieholzpellets DIN EN ISO 17225-2

Nr.	Summe < 3,15 mm m-%	Summe < 2,0 mm m-%	Summe < 1,0 mm m-%	I Klasse nach ISO 17225-2
1	99	95	57	I2
2	99	97	65	I2
3	98	96	65	I2
4	98	96	63	I2
5	90	83	51	keine
6	99	97	72	I1
7	99	97	73	I1
8	99	97	68	I2
9	99	97	70	I1
10	99	97	72	I2
11	98	95	66	I2
12	98	96	69	I2
13	98	96	64	I2
14	99	97	73	I2
15	99	97	71	I2
16	95	90	68	keine
17	98	94	72	I3
18	90	81	48	keine
19	92	83	49	keine
20	93	81	52	keine
21	91	87	65	keine
22	99	96	68	I2
23	100	99	92	I1
24	98	96	82	I2
25	92	85	58	keine
26	96	93	83	keine

Tabelle 84: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Elementaranalyse
Teil 1 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)

Nr.	C m-%	H m-%	O m-%	N m-%	S m-%	Cl m-%	Al mg/kg	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	Si mg/kg
1	49,9	6,1	43,9	0,09	< 0,005	< 0,005	11	908	466	148	< 10	65	< 100
2	50,2	6,1	43,6	0,07	0,007	< 0,005	< 10	677	402	129	< 10	46	245
3	50,2	6,1	43,6	0,08	0,006	< 0,005	15	872	583	166	< 10	81	< 100
4	50,2	6,1	43,6	0,09	0,009	0,006	13	928	512	163	< 10	74	< 100
5	50,3	6,1	43,5	0,06	< 0,005	< 0,005	< 10	499	494	103	< 10	42	< 100
6	50,7	6,1	43,1	0,10	< 0,005	< 0,005	14	859	562	163	< 10	76	117
7	50,9	6,1	42,9	0,09	< 0,005	< 0,005	14	821	578	165	< 10	70	< 100
8	50,6	6,1	43,2	0,10	< 0,005	< 0,005	18	818	549	159	< 10	79	< 100
9	50,8	6,1	43,0	0,12	0,007	< 0,005	16	929	593	172	< 10	102	111
10	51,0	6,3	42,5	0,16	< 0,005	< 0,005	35	865	489	160	< 10	74	< 100
11	51,0	6,2	42,6	0,15	0,006	< 0,005	23	854	526	162	< 10	89	< 100
12	50,9	6,2	42,8	0,14	< 0,005	< 0,005	36	894	506	165	< 10	76	< 100
13	50,9	6,3	42,6	0,15	< 0,005	0,007	25	918	542	171	22	103	< 100
14	50,9	6,2	42,8	0,14	< 0,005	< 0,005	318	855	477	156	< 10	60	150
15	50,5	6,2	43,2	0,14	< 0,005	< 0,005	632	845	487	156	< 10	56	404
16	51,0	6,2	42,7	0,10	< 0,005	< 0,005	27	747	416	140	< 10	43	< 100
17	50,0	6,1	43,8	0,10	0,005	< 0,005	52	739	337	141	< 10	40	< 100
18*	50,2	6,0	42,8	0,11	0,009	0,009	99	2.429	698	221	13	100	529
19	51,8	6,2	41,9	0,08	0,007	< 0,005	182	732	443	164	39	37	832
20	50,8	6,0	43,2	< 0,05	< 0,005	< 0,005	14	840	447	303	< 10	< 10	165
21	50,7	6,0	43,2	0,09	0,005	< 0,005	87	536	411	84	22	71	604
22	51,5	5,9	42,4	0,17	0,008	0,008	79	1.710	607	223	93	50	402
23	49,4	6,0	44,5	0,10	0,010	< 0,005	18	1.260	1.130	358	< 10	70	155
24*	49,6	6,1	43,6	0,14	0,007	0,010	162	909	1.449	269	33	96	519
25	50,2	6,0	43,7	0,14	0,009	< 0,005	41	513	612	46	16	19	< 100
26	50,1	5,7	44,0	0,15	0,022	< 0,005	23	672	833	78	12	92	279

* Diese Analysen wurden bei einem externen Labor mit teilweise abweichenden Analysemethoden realisiert.

Tabelle 85: Analyseergebnisse zu den Versuchsbrennstoffen: Elementaranalyse
Teil 2 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)

Nr.	As mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Hg mg/kg	Zn mg/kg
1	< 0,8	< 2	0,3	< 1	10	< 1	183	< 1	< 0,05	15
2	< 0,8	< 2	0,3	< 1	16	< 1	180	< 1	< 0,05	13
3	< 0,8	< 2	0,3	< 1	12	1	221	< 1	< 0,05	16
4	< 0,8	< 2	0,2	< 1	10	< 1	213	< 1	< 0,05	17
5	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	10	< 1	313	< 1	< 0,05	5
6	< 0,8	< 2	0,2	< 1	16	1	217	< 1	< 0,05	16
7	< 0,8	< 2	0,3	1	23	2	213	< 1	< 0,05	16
8	< 0,8	< 2	0,2	1	24	1	203	< 1	< 0,05	19
9	< 0,8	< 2	0,3	2	17	1	211	< 1	< 0,05	17
10	< 0,8	< 2	0,2	< 1	8	1	201	< 1	< 0,05	15
11	< 0,8	< 2	0,2	< 1	< 5	2	197	< 1	< 0,05	14
12	< 0,8	< 2	0,2	< 1	8	1	208	< 1	< 0,05	16
13	< 0,8	< 2	0,3	< 1	16	2	209	< 1	< 0,05	14
14	< 0,8	< 2	0,3	1	35	1	194	< 1	< 0,05	14
15	< 0,8	< 2	0,3	2	86	2	188	< 1	< 0,05	16
16	< 0,8	< 2	0,2	< 1	19	< 1	143	< 1	< 0,05	15
17	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	60	< 1	120	< 1	< 0,05	14
18*	0,04	0,2	0,2	0,6	53	1	151	0,4	0,007	33
19	< 0,8	< 2	0,2	3	133	1	169	< 1	< 0,05	10
20	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	23	< 1	112	< 1	< 0,05	4
21	< 0,8	< 2	< 0,2	4	100	2	71	1,0	< 0,05	5
22	< 0,8	< 2	< 0,2	1	101	4	63	< 1	< 0,05	11
23	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	9	< 1	155	1,0	< 0,05	7
24*	0,05	0,2	0,05	0,5	100	2	440	0,4	0,001	11
25	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	63	2	43	< 1	< 0,05	2
26	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	76	2	38	< 1	< 0,05	2

* Diese Analysen wurden bei einem externen Labor mit teilweise abweichender Analysemethoden realisiert.

Tabelle 86: Analyseergebnisse zu den für die Versuchsbrennstoffe verwendeten Additiven: Elementaranalyse Teil 1 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis, O berechnet)

Nr. *	C m-%	H m-%	O m-%	N m-%	S m-%	Cl m-%	Al mg/kg	Ca mg/kg	Fe mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	Si mg/kg
1	45,7	6,3	46	1,85	0,076	0,071	< 10	200	14	329	< 10	1.380	692
2	44,5	6	49,5	< 0,05	< 0,005	< 0,005	18	97	< 5	46	< 10	651	302
3	44,4	6,4	48,7	0,2	0,009	0,292	88	942	35	78	1.050	716	782
4	n. b.	167.000	1.000	15.000	2.100	1.000	< 100	201.000					

* 1: Weizenstärkehaltiges Mehl; 2: Kartoffelstärke nativ; 3: Kartoffelstärke abfallende Qualität; 4: Kaolin-CSP; n. b.: nicht bestimmt

Tabelle 87: Analyseergebnisse zu den für die Versuchsbrennstoffe verwendeten Additiven: Elementaranalyse Teil 2 (alle Werte auf wasserfreier Bezugsbasis)

Nr.	As mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	K mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Hg mg/kg	Zn mg/kg
1	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	1.900	1	9	< 1	< 0,05	3
2	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	646	< 1	< 1	< 1	< 0,05	< 1
3	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	59	< 1	< 1	< 1	< 0,05	< 1
4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	12.000	n. b.				

* 1: Weizenstärkehaltiges Mehl; 2: Kartoffelstärke nativ; 3: Kartoffelstärke abfallende Qualität; 4: Kaolin-CSP; n. b.: nicht bestimmt

Tabelle 88: Ergebnisse der granulometrischen Untersuchung für Partikel > 1 mm und > 2 mm der Verbrennungsrückstände von den Messungen zum Einfluss der Holzart für Pelletofen 2, Pelletkessel 1 und PASSA-Methode

Brennstoff	Pelletofen 2 > 2 mm m-%	Pelletofen 2 > 1 mm m-%	Pelletkessel 1 > 2 mm m-%	Pelletkessel 1 > 1 mm m-%	PASSA > 2 mm m-%	PASSA > 1 mm m-%
–						
Fichte 1	16	28	12	22	22	35
Fichte 2 mit Rinde	3	5	0	0	13	20
Kiefer	32	47	33	49	2	8
Lärche	5	9	9	30	17	41
Douglasie	57	65	57	66	10	40
Eiche 1	15	27	29	39	28	37
Eiche 2	40	48	43	51	27	50
Buche 1	43	51	14	25	40	46
Buche 2	35	43	0	0	31	45
Tropenholz	3	13	2	8	15	39
Apfel	18	49	33	52	39	57

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 Wassergehalts 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 Anbauszenarien
- 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 – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- 33 Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
- 34 Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
- 35 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
- 36 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
- 37 Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
- 38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
- 39 Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
- 40 Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 41 Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605

- 42 Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
- 43 Brennstoffqualität von Holzpellets
- 44 Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
- 45 ExpResBio – Methoden
- 46 Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
- 47 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
- 48 Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für 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 Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V
- 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

