

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

**Neuartige und erweiterte Holzpellet-Charakterisierung und Abbrandmodellierung-
Teil 2: Anwendung in der Praxis**

Akronym:

FuturePelletSpec 2

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Technologie und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für
Nachwachsenden Rohstoffe**

Teilvorhaben 2: Olsberg GmbH

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2221NR016A

Teilvorhaben 2: 2221NR016B

Laufzeit:

01.12.2021 bis 31.07.2025

Monat der Erstellung:

10/2025

Datum der Veröffentlichung:

12/01/2026

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	3
	a) Arbeitspakete und Meilensteine	3
	b) Zusammenfassung	11
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	12
1.	Erzielte Ergebnisse	12
	Arbeitspaket 1: Projektmanagement	12
	Arbeitspaket 2: Pellet-Brennstoffcharakterisierung	12
	a) Rohstoffbeschaffung und Pelletproduktion	12
	b) Charakterisierung der Versuchsbrennstoffe mittels Laboranalytik	1
	c) Screening geeigneter Schnellbestimmungsmethoden	5
	d) Förderversuche an einem neu entwickelten Förderprüfstand zur Bestimmung des feuerungsrelevanten Feinanteils	28
	Arbeitspaket 3: Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbettabbrandmodells	39
	a) Praxisüberführung des Abbrandmodells aus FuturePelletSpec 1 samt Gasphasenverbrennungsmodell	39
	b) Konzeption des ersten Prototypen der LEFLEX-PKo-Technologie VA1	44
	c) Konzeption des verbesserten Prototyps (VA2) der LEFLEX-PKo-Technologie	49
	d) CFD Nachsimulationen von Testläufen mit VA2	49
	ee) Inbetriebnahme und Verifizierungsmessungen der VA2 am TFZ:	51
	ff) Regelungsoptimierung an der Versuchsanlage 2 (VA2) am TFZ und weitere Optimierungsmaßnahmen:	51
	Arbeitspaket 4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen	53
	a) Vortests am TFZ	53
	b) Testläufe bei BIOS	54
	b) Messungen am TFZ	61
	Arbeitspaket 5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung	101
2.	Verwertung	101
	a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	101
	b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	101
	c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	102
	d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	102
3.	Erkenntnisse von Dritten	103
4.	Veröffentlichungen	103
ANHANG	104	
	Teilvorhaben 1: Brennstoffcharakteristik und Abbrandmodellierung	104
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	104
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	104
	Arbeitspaket AP1: Projektmanagement	104

Arbeitspaket AP2: Pellet Brennstoffcharakterisierung	104
Arbeitspaket AP4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen.....	104
Arbeitspaket AP5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung	104
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	104
Teilvorhaben 2: Realisierung der Ofenentwicklung	106
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	106
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	106
Arbeitspaket 3: Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbettabbrandmodells,	106
Arbeitspaket 4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen.....	106
Arbeitspaket 5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung	106
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	106
Literatur	107

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich Pelletkessel und Pelletkaminöfen als die dominierenden Technologien für die Biomassefeuerung im kleinen Leistungsbereich (bis 100 kW_{th}) etabliert. Besonders Pelletkaminöfen sind aufgrund ihrer geringeren Nennleistungen und Anschaffungskosten für zukünftige energieeffiziente Gebäude von großem Interesse. Diese Geräte bieten nicht nur eine funktionale Heizlösung, sondern fungieren auch als Designelemente in modernen Wohnbauten, was ihre Wettbewerbsfähigkeit insbesondere gegenüber Wärmepumpen erhöht.

Ein weiterer Vorteil von Pelletkaminöfen ist die Möglichkeit, sie in Hybridlösungen zu integrieren, die auch Wärmepumpen umfassen können. Solche Systeme können besonders in Zeiten hoher Strompreise oder bei extrem niedrigen Außentemperaturen effizient arbeiten, indem sie die Betriebszeiten der Biomassefeuerung optimieren. Da in diesen Hybridlösungen die Biomassefeuerung nur wenige Betriebsstunden pro Jahr benötigt, ist es entscheidend, dass die Investitionen in die Biomassefeuerung nicht zu hoch ausfallen.

Trotz dieser Vorteile stehen die Hersteller von Pelletkaminöfen vor der Herausforderung, die ständig sinkenden Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass selbst bei Verwendung von Pellets der höchsten Qualitätsklasse (ISO 17225-2, A1-Qualität) die Staubemissionen je nach Brennstoff stark variieren können. Eine Untersuchung des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) ergab, dass die Staubemissionen eines marktüblichen 8 kW Pelletkaminofens bei Verwendung unterschiedlicher A1-Pellets zwischen 30 und 135 mg/MJ schwankten. Diese Schwankungen konnten nicht allein durch die bekannten Brennstoffeigenschaften erklärt werden, was darauf hindeutet, dass bislang unbekannte oder nicht untersuchte Brennstoffparameter einen erheblichen Einfluss auf das Abbrandverhalten und die Emissionen von Pelletöfen haben.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, initiierte das TFZ das Projekt FuturePelletSpec. Die Hauptziele dieses Projekts umfassen:

- 1. Identifikation neuer Brennstoffparameter:** Es sollen bislang unbekannte Parameter identifiziert werden, die das Abbrandverhalten von Holzpellets und die Emissionen von Pelletfeuerungen beeinflussen. Zudem sollen Methoden zur Bestimmung dieser Parameter entwickelt werden.
- 2. Entwicklung eines Brennstoffbett-Abbrandmodells:** Ein neues Modell für Holzpellet-Festbettfeuerungen soll entwickelt werden, das eine transiente Simulation des Brennstoffbettabbrandes ermöglicht und kritische Brennstoffeigenschaften berücksichtigt. Dieses Modell soll eine bessere Grundlage für die CFD-gestützte Feuerungsentwicklung bieten als die gängigen empirischen Modelle.
- 3. Praxisanwendung des neu erlangten Wissens:** In Zusammenarbeit mit einem deutschen Hersteller soll ein neuartiger Low-Emission Pelletkaminofen entwickelt werden, und es sollen neue Normungsvorschläge für Holzpellets erarbeitet werden.

Das Projekt wurde in zwei Teile gegliedert. Teil 1 (FKZ: 22020917) konzentrierte sich auf die Grundlagenuntersuchungen und die Entwicklung des Abbrandmodells. Dieser Teil wurde von März 2019 bis Frühjahr 2021 durchgeführt und umfasste Testläufe mit insgesamt 28 handelsüblichen Pelletsortimenten an zwei marktüblichen Pelletkaminöfen. Die Ergebnisse bestätigten die zuvor beobachtete große Variationsbreite der Staubemissionen. Nur bei zwei der getesteten Pelletsortimente konnte der Emissionsgrenzwert für Staub eingehalten werden, während bei anderen teilweise erhebliche Grenzwertüberschreitungen festgestellt wurden. Zudem konnten neue Brennstoffparameter identifiziert werden, die die Ofenperformance negativ beeinflussen, wie beispielsweise die Pelletlänge und der Hartholzanteil (Details siehe [1–5]).

Teil 2 des Projekts, der von Dezember 2021 bis Juli 2025 lief und der in diesem Abschlussbericht vorgestellt wird, zielt darauf ab, dass in Teil 1 erlangte Wissen praktisch anzuwenden. Die übergeordneten Zielsetzungen umfassen:

- **Erweiterung des Grundlagenwissens:** Vertiefte Untersuchungen zu Aspekten der Holzpelletcharakterisierung, die in Teil 1 nicht ausreichend behandelt wurden.
- **Prüfung der Anwendbarkeit der Ergebnisse:** Bewertung des Optimierungspotenzials für Anlagen in der Praxis.
- **Entwicklung neuer Charakterisierungsmethoden:** Idealerweise sollen Schnellbestimmungsmethoden für Holzpellets entwickelt werden.
- **Erarbeitung neuer Richtlinien:** Diese sollen sich auf die Brennstoffcharakterisierung sowie das Feuerungsdesign beziehen.

- **Praxisanwendung des neuen Abbrandmodells:** Das neu entwickelte Brennstoffbett-Abbrandmodell soll in die Entwicklung einer emissionsarmen und flexiblen Pelletkaminofentechnologie (LEFLEX-PKo) integriert werden.

Die Ergebnisse des Projekts sollen nicht nur zur Verbesserung der Charakterisierung von Holzpellets beitragen, sondern auch in zukünftige Normungstätigkeiten einfließen. Darüber hinaus sollen neue Richtlinien für die Brennstoffcharakterisierung und das Feuerungsdesign erarbeitet werden. Diese Ergebnisse werden auf der TFZ-Webseite und über Verbreitungsplattformen des Deutschen Pelletinstituts (DEPI) veröffentlicht, um der gesamten Branche zugutekommen.

Insgesamt wird erwartet, dass die gemeinsam mit der Olsberg GmbH und dem Unterauftragnehmer BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH entwickelte LEFLEX-PKo-Technologie neue Maßstäbe für umweltfreundliches und effizientes Heizen mit Holzpellets setzt und andere Hersteller zu entsprechenden Innovationen anregt. Die Methodik für die Umsetzung der Ziele in Teil 2 sieht eine enge Zusammenarbeit zwischen TFZ, DEPI, BIOS und Olsberg GmbH vor, um wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Anforderungen in die Technologieentwicklung zu integrieren. CFD-Simulationen mit dem neuen vom Unterauftragnehmer BIOS entwickelte Brennstoffbett-Abbrandmodell spielen dabei eine zentrale Rolle. Ein derartiges innovatives Modell, das auch neue kritische Brennstoffparameter entsprechend berücksichtigt, wurde in Teil 1 vom Unterauftragnehmer BIOS entwickelt und bereits erfolgreich validiert. Die Grundlagen zum neu entwickelten Abbrandmodell wurden von BIOS bereits publiziert und so der Öffentlichkeit bekannt gemacht [5].

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Um die genannten Zielsetzungen zu erreichen, wurde ein Arbeitsplan mit insgesamt fünf Arbeitspaketen (AP) erstellt:

- AP 1: Projektmanagement
- AP 2: Pellet-Brennstoffcharakterisierung
- AP 3: Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbett-Abbrandmodells
- AP 4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen
- AP 5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung

Das Projekt sollte insgesamt 30 Monate dauern. Der Zeit- und Arbeitsplan sowie die Meilensteine sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Meilensteinnummern beziehen sich auf die in Abschnitt 3 genannten Meilensteine.

AP 1 diente der Projektkoordination durch das TFZ.

In AP 2 wurden Arbeiten zur Erweiterung des in Teil 1 erlangten Grundlagenwissens und zur Entwicklung sowie Testung neuer Charakterisierungsmethoden durchgeführt. Hierzu gehörten die Herstellung gezielt abgestufter Versuchspellets, die Prüfung der Brennstoffqualität in Ofenscreenings, die Charakterisierung der Aschen sowie der Aufbau eines Schneckenprüfstands. Außerdem wurden in Zusammenarbeit mit dem DEPI Vorschläge für Normen und Standards erarbeitet.

AP 3 umfasste die Praxisüberführung des von BIOS in Teil 1 entwickelten Abbrandmodells, die Entwicklung eines neuen Ofens mit extremer Luftstufung (LEFLEX-PKo) zusammen mit der Fa. Olsberg, sowie die Integration des Modells in die Ofenentwicklung. Hierzu wurden CFD-Simulationen durchgeführt, Prototypen gebaut und getestet, Regelungskonzepte entwickelt sowie abschließend eine technische und wirtschaftliche Bewertung vorgenommen. Aus diesen Aktivitäten sollten dann auch die Richtlinien für ein optimiertes Ofendesign abgeleitet werden.

AP 4 beinhaltete die Testläufe an den Versuchsanlagen und Prototypen am TFZ und bei BIOS. Dabei wurden die entwickelten Modelle und Konzepte validiert, Emissionen gemessen und Optimierungen vorgenommen. Dabei sollte neben den standardisierten Nennlastmessungen vor allem die speziell für Pelletöfen am TFZ im Rahmen des beReal-Projekts entwickelte Lastverlaufsprüfung verwendet werden, die die übliche Einsatzpraxis solcher Öfen besonders realitätsnah abbildet. Gleichzeitig konnte damit auch die entwickelte Regelungsstrategie im realen Betrieb wirkungsvoll auf ihre Alltagstauglichkeit hin erprobt werden. BIOS begleitete ausgewählte Testläufe mit speziellen Heißgasmessungen, um Betriebsdaten zur Nachsimulation und Daten zur Bewertung des Brennstoffbett-Abbrandmodells zu erlangen.

Im abschließenden AP 5 erfolgte dann die Erarbeitung der Richtlinien zur Brennstoffcharakterisierung und für ein optimiertes Feuerungsdesign. Darüber hinaus war AP 5 der Öffentlichkeitsarbeit, Ergebnisverbreitung sowie den ersten Schritten zur Implementierung der Projektergebnisse in die Brennstoff-Normung gewidmet.

Es waren somit relevante Schnittstellen zwischen den einzelnen APs gegeben, die einen effizienten Informationsfluss und Datenaustausch erfordern.

	Jahr 1												Jahr 2												Jahr 3												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6							
1 Projektmanagement																																					M1
2 Pellet-Brennstoffcharakterisierung																																					
Weitere Vertiefung des im Projektteil 1 erarbeiteten Grundlagenwissens																																					M2
Erarbeitung von neuen Charakterisierungsmethoden zur Bestimmung kritischer Brennstoff-Parameter																																					M3
Erarbeitung von Vorschlägen für zukünftige Prüfbrennstoffe und von Vorschlägen bzgl. der Aufnahme der neuen als kritisch erachteten Parameter in die Brennstoff-Normung																																					M4
3 Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbettaabbrandmodells																																					
Vorbereitung des neuen Modells für den Praxiseinsatz																																					
Definition eines Basiskonzeptes für einen LEFLEX-PKo																																					
CFD-gestützte Evaluierung des Basiskonzeptes und Durchführung von CFD-gestützten Sensitivitätsanalysen																																					
Entwicklung eines auf die neue Ofentechnologie abgestimmten Regelungskonzeptes																																					
Entwicklung und Bau eines ersten Prototypen																																					M5
Nachsimulation ausgewählter Testläufe zur Prüfung und Validierung des Bettaabbrandmodells																																					
CFD-gestützte Optimierung der neuen LEFLEX-PKo -Technologie																																					
Entwicklung und Bau eines optimierten LEFLEX-PKo-Prototyp																																					M6
Finale Designfindung																																					M7
Technische, ökonomische und ökologische Bewertung der Technologie im Vergleich zum Stand der Technik																																					M8
4 Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen																																					
Durchführung von Testläufen beim TFZ zur Evaluierung der Pelletflexibilität des neuen Kaminofens sowie der Performance der neuen Ofenregelung																																					
Aus- und Bewertung der Testläufe																																					M9
Testläufe am optimierten Prototyp am TFZ																																					
Aus- und Bewertung der Testläufe sowie Zusammenführung der Testlaufergebnisse																																					M10
5 Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung																																					
Erarbeitung von Richtlinien bzgl. erweiterter Brennstoffcharakterisierung sowie bzgl. eines optimierten Pelletkaminofendesigns																																					M11
Veröffentlichungen																																					
Vorträge bei Seminaren und Workshops																																					
Gespräche mit Normungsstellen und Vertretern der Ofen- und Kesselbranche																																					M12

Abbildung 1: Zeit- und Arbeitsplan (M = Meilenstein) gemäß Projektantrag

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (It. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (It. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 (TFZ) Projektmanagement	01/2022 bis 06/2024	Projekttreffen und -koordination Während der Projektlaufzeit erfolgte ein kontinuierlicher Austausch zwischen den Projektpartnern. Insgesamt wurden 5 Projekttreffen und 17 Online-Meetings durchgeführt. Diese umfassten: <ul style="list-style-type: none"> • 20. – 21.07.2022 Kick-off Meeting (online) • 25. – 29.07.2022 Messserie am TFZ (TFZ + BIOS) • 25.08.2022 Onlinemeeting (TFZ + BIOS) • 12. – 13.10.2022 2. Projekttreffen in Graz • 24.01.2023 Onlinemeeting(alle) • 03.02.2023 Onlinemeeting (alle) • 24.02.2023 Onlinemeeting (BIOS + Olsberg)

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<ul style="list-style-type: none"> • 28.02.2023: Onlinemeeting (TFZ + DEPI + BIOS + Olsberg) • 04. – 05.05.2023 3. Projekttreffen in Straubing • 13.05.2023: Onlinemeeting (TFZ + DEPI + BIOS + Olsberg) • 02.06.2023: Onlinemeeting (TFZ + Olsberg + BIOS) • 19.06.2023: Onlinemeeting (TFZ + Olsberg + BIOS) • 02.08.2023 Onlinemeeting (alle) • 07.09.2023: Onlinemeeting (BIOS + Olsberg + externer Regelungsprogrammierer) • 16.11.2023: Onlinemeeting (TFZ + BIOS + Olsberg) • 31.01. – 01.02.2024: Projekttreffen in Olsberg • 22.03.2024: Onlinemeeting (TFZ + Olsberg + BIOS) • 22.04.2024 Onlinemeeting (TFZ + Olsberg + BIOS) • 05.06.2024: Onlinemeeting (Olsberg + BIOS) • 03.07.2024: Onlinemeeting (TFZ + Olsberg + BIOS) • 12.11.2024 – 13.11.2024: Projekttreffen in Berlin • 18.12.2024: Onlinemeeting (TFZ + Olsberg + BIOS+DEPI) • 24.06.2025 – 25.06.2025: Abschlussprojekttreffen in Straubing <p>Erste Projektverlängerung Aufgrund von Verzögerungen im Vergabeverfahren für den Unterauftrag an den Partner BIOS wurde eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate beantragt. Die Verlängerung wurde am 12.09.2022 bewilligt.</p> <p>Zweite Projektverlängerung Aufgrund von Materialengpässen, Fachkräftemangel, Ausfall von Messtechnik, erhöhtem Mehraufwand (z.B. mehr Öfen im Ofenscreening, Bau mehrerer Prototypen, zusätzliche Testläufe bei BIOS) beantragten alle Partner im April 2024 eine weitere kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 8 Monate bis zum 31.07.2025. Diese Verlängerung wurde am 30.04.2024 bewilligt.</p>
AP 2 (TFZ / DEPI / BIOS) Pellet- Brennstoffcharakterisierung	01/2022 bis 06/2024	<p>Rohstoffbeschaffung und Pelletierung</p> <p>Zwei Tonnen vorgetrocknete Fichtenspäne und Holzhackschnitzel (Erle, Kiefer, Birke, Fichte) wurden beschafft und an das TZF geliefert. Die Corona-Pandemie und der Ukraine-Konflikt führten dabei zu Verzögerungen. Alle Rohmaterialien waren ab Oktober 2022 verfügbar.</p> <p>Das Rohmaterial wurde jeweils vor und nach der Zerkleinerung homogenisiert. Die Pelletierung erfolgte ab November 2022, wobei niedrige Temperaturen bis April 2023 die Pelletherstellung behinderten. Der Abschluss der Pelletherstellung war im August 2023. Insgesamt wurden 14 Pelletbrennstoffe produziert. Daraus ergab sich eine Verzögerung von ca. 8 Monaten im Vergleich zur Planung.</p> <p>Ausführliche Brennstoffanalysen wurden für alle Pelletbrennstoffe und Rohmaterialien durchgeführt. Dabei wurde ein hoher Aschegehalt bei den Erlenhackschnitzeln festgestellt, weshalb eine zusätzliche Charge beschafft und pelletiert wurde.</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Pelletofenbeschaffung</p> <p>Vier Pelletöfen wurden beschafft, darunter Modelle mit Unterschubtechnik, automatischer Rostreinigung und extremer Luftstufung, sowie ein günstiges Baumarktgerät. Schwierigkeiten bei der Beschaffung des vierten Ofens ergaben sich wegen hoher Nachfrage durch den Ukrainekrieg. Die Lieferung des letzten Ofens erfolgte Ende August 2023.</p> <p>Feuerungsversuche</p> <p>Die vier Pelletöfen wurden am TFZ für Emissionsmessungen vorbereitet. Danach erfolgten Messungen bei Nennlast, Teillast und beReal-Lastzyklus mit ENplus-Pellets und die umfassende Bewertung der Ergebnisse. Danach erfolgten Nennlastversuche mit den 14 Versuchsbrennstoffen an allen vier Pelletöfen, sowie die umfassende Bewertung der Ergebnisse.</p> <p>Entwicklung neuer Charakterisierungsmethoden</p> <p><u>NIR-Spektrometer:</u> Ein tragbares NIR-Messgerät wurde zunächst ausgewählt, Lieferschwierigkeiten seitens der Hersteller führten jedoch zur Nutzung eines alternativen Leihgeräts (PerkinElmer DA 7250). Die Modellentwicklung erfolgte mittels chemometrischer Methoden zur Vorhersage kritischer Brennstoffparameter (Kalium Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert) und dem Vergleich der NIR-Messwerte mit Laboranalysen.</p> <p><u>Bewertung der Versinterungen:</u> Eine Einzelpelletpresse wurde zur Herstellung von Laborpellets verwendet. An diesen erfolgte die Analyse des Karbonatgehalts mit einem LECO-Kohlenstoffanalysator. Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten wurden durchgeführt (PASSA, Rapid-Slag-Test) und im Vergleich zu den realen Rostaschen aus den Pelletöfen bewertet.</p> <p><u>Pelletlängenmessung:</u> Aufgrund unklarer Vorgaben zur Pelletlängenmessung in der ISO 17829 wurden drei Ansätze zur manuellen Messung mittels Messschieber (inkl. Neuentwicklung von Messblöcken für die Innen-Innen- und Außen-Außen-Messung) verglichen. Die Durchführung erfolgte an 12 selbstproduzierten Pellets und 10 Marktpellets. Die Ergebnisse der manuellen Messungen wurden dem Normungsausschuss ISO TC 238 (WG 4) präsentiert und befinden sich dort aktuell in der Diskussion um die Anpassung der ISO 17829:2016-03. Aktuell liegt eine Entwurfsfassung vom Februar 2025 vor. Zusätzlich wurden Messungen mit zwei fotooptischen Schnellbestimmungsmethoden durchgeführt und im Vergleich zur Referenzmethode bewertet.</p> <p>Schneckenprüfstand</p> <p>Am TFZ erfolgte die Planung und der Bau eines Schneckenprüfstands mit dem Ziel der Optimierung der Brennstoffzufuhr. Der Fokus lag zudem auf der Bestimmung von zusätzlich entstehendem Feinanteil bei der Schneckenförderung.</p> <p>Tests mit verschiedenen Schneckendurchmessern und Geometrien wurden durchgeführt. Akzeptable Werte ergaben sich nur mit dem größten Durchmesser (56 mm).</p> <p>Literaturrecherche</p> <p>Parallel zu den Versuchen erfolgte die laufende</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		Erfassung relevanter Informationen und neuer Veröffentlichungen zur Rohstoffbeschaffung, Pelletherstellung und Brennstoffanalyse.
<p>AP 3 (BIOS, Olsberg, TFZ) Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbettabbrandmodells</p>	01/2022 bis 06/2024	<p>Kopplung von Abbrandmodell und Gasphasenverbrennungsmodell Die Kopplung des Abbrandmodells mit dem Gasphasenverbrennungsmodell wurde durch BIOS final angepasst, um die Praxistauglichkeit sicherzustellen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden im Oktober 2022 beim Projektmeeting in Graz vorgestellt.</p> <p>Entwicklung der Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofentechnologie (LEFLEX-PKo) Es fand eine kontinuierliche Abstimmung und enge Zusammenarbeit zwischen BIOS und Olsberg bei der Entwicklung des Kaminofens statt. Die Basis für die Neuentwicklung bildete der Pelletofen Levana, insbesondere hinsichtlich des prinzipiellen Aufbaus und der Abmessungen. Olsberg stellte hierfür 3D-Zeichnungen zur Verfügung, BIOS führte darauf aufbauend CFD-Simulationen zur Evaluierung des Iststandes des Systems durch. Dabei wurden die Daten aus den Testläufen in Kalenderwoche 32/2022 am TFZ genutzt, um die Betriebsfälle präzise zu definieren.</p> <p>Konzeptverbesserung Die Ergebnisse der Iststand-Erhebung wurden mit Olsberg eingehend diskutiert, was im Februar 2023 zur Festlegung eines verbesserten Konzepts für die LEFLEX-PKo führte. Dieses Konzept basiert auf einem Pelletbrenner, der durch eine ausgeprägte Luftstufung gekennzeichnet ist. Die Luftstufung wird durch die separate Zufuhr von Primär- und Sekundärverbrennungsluft realisiert. Zudem wurde der Abstand zwischen dem Brennstoffbett und der Sekundärlufteindüsung vergrößert, um eine ausgeprägte Reduktionszone zu schaffen. Zur weiteren Optimierung des Gasphasenausbrandes wurde ein spezieller Sekundärluftring entwickelt.</p> <p>Sensitivitätsanalyse Es wurden drei Varianten des neuen Konzepts, bezeichnet als V02 bis V04, anhand detaillierter Bettsimulationen untersucht. Ziel war es, die Luftverteilung im Brennstoffbett zu optimieren, um eine gleichmäßige Durchströmung und einen möglichst gleichmäßigen Abbrand zu gewährleisten. Hierfür wurden die Öffnungsquerschnitte in der Luftzufuhr entsprechend angepasst, um die gewünschte Luftverteilung im Brennstoffbett zu erreichen und somit die Verbrennungsprozesse zu verbessern.</p> <p>CFD-Simulationen (Gasphasensimulationen) Für eine ausgewählte Variante wurde eine CFD-Simulation über den gesamten Ofen durchgeführt. Dabei wurde eine ungleichmäßige Primärluftverteilung mit hohen Geschwindigkeiten am Brennerschalen-Austritt festgestellt. Dies wirkt sich negativ auf den Abbrand des Bettes und auf die Emissionen aus.</p> <p>Maßnahmen zur Optimierung Zur Behebung der identifizierten Schwachstellen wurden erste Maßnahmen diskutiert, wobei eine neue Geometrie</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>mit der Bezeichnung V05 definiert wurde. Dabei wurde auf Primärluftdüsen verzichtet und die Rostgeometrie wurde neugestaltet, um eine gleichmäßige Zufuhr der Primärluft, eine bessere Luftverteilung und eine stabilere Verbrennung zu erzielen.</p> <p>Weitere Simulationen</p> <p>Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Zumischung von rezirkuliertem Rauchgas zur Primärluft analysiert, um das Brennstoffbett zu kühlen und die Partikelemissionen zu reduzieren. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden im August 2023 präsentiert.</p> <p>Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurde die Konzeption des ersten Versuchsofens abgeleitet, um die Auswirkungen der Rauchgasrezirkulation praktisch zu testen und weiter zu optimieren.</p> <p>Flexibler Versuchsofen</p> <p>Der geplante Versuchsofen sollte sowohl mit als auch ohne Rauchgasrezirkulation betrieben werden, um deren Einfluss auf den Verbrennungsprozess und die Emissionen zu bewerten. Im Januar 2024 wurden die Simulationsergebnisse sowie die Auslegungen der Klappen und Blenden detailliert präsentiert, um eine fundierte Grundlage für die praktische Umsetzung und weitere Optimierung des Versuchsofens zu schaffen.</p> <p>Anpassungen im Designprozess</p> <p>Während der Ergebnisdiskussionen zwischen Olsberg und BIOS wurden umfangreiche Änderungen am geometrischen Konzept des Ofens vorgenommen. Dabei wurde beschlossen, den Pelleteinwurf auf eine neue Position oberhalb des Sekundärluftdüsenrings zu verlegen.</p> <p>Nachsimulation von Testläufen und Evaluierung des Bettmodells</p> <p>Auf Basis von Testlaufdaten mit Fichtenpellets wurde eine Simulation des Prototyp 2 durchgeführt. Dabei konnte das Bettmodell erfolgreich validiert werden, was die Zuverlässigkeit der Simulation bestätigt. Die Bewertung des Bettbereichs und der Luftzufuhr unterstützte die Testlaufbewertung und die Regelung der Luftstufung. Aus den Nachsimulationen ausgewählter Testläufe wurden weitere Optimierungsmaßnahmen abgeleitet. Diese führten zu Anpassungen bei den Massenströmen für Primärluft, Zündluft und Scheibenluft, die in weiteren Testläufen umgesetzt wurden (siehe AP4) und die gewünschten Effekte erzielten.</p> <p>Abschluss und Empfehlungen</p> <p>Beim letzten Projektmeeting in Straubing wurden alle offenen Punkte diskutiert und abschließend Empfehlungen für das endgültige Anlagendesign daraus abgeleitet.</p> <p>Darüber hinaus wurden Beiträge zur Erstellung der Empfehlungen für die Entwicklung emissionsarmer und brennstoffflexibler Pelletöfen (AP5) aus den Ergebnissen der CFD-Simulationen abgeleitet.</p>

<p>AP 4 (TFZ, BIOS, Olsberg)</p> <p>Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen</p>	<p>12/2022 bis 03/2024</p>	<p>Messung an Marktgeräten und Bestandsgerät der Fa. Olberg – Testläufe bei TFZ unterstützt durch BIOS</p> <p>Es wurden Testläufe mit Buchen- und Fichtenpellets bei Nennlast, Teillast und im beReal-Zyklus durchgeführt. Ziel dieser Tests war es, den Pelletkaminofen zu bewerten und relevante Parameter zu untersuchen, um die CFD-Simulationen zu unterstützen. BIOS leistete dabei Unterstützung durch Pyrometermessungen, die Entnahme von Brennstoff- und Ascheproben sowie durch visuelle Bewertungen der Entwicklung des Brennstoffbetts. Eine umfassende Auswertung der Testläufe wurde vorgenommen, wobei der Fokus auf den Parametern lag, die für die CFD-Simulationen entscheidend sind.</p> <p>Versuchsanlage 1 – Konzeption und Bau</p> <p>Auf Grundlage der ersten Versuchsreihen und der CFD-Simulationen wurden die Anforderungen für den Versuchsofen festgelegt. Dabei wurde deutlich, dass zahlreiche Einstell- und Messmöglichkeiten erforderlich sind, beispielsweise ein Kipprost, sowie die Steuerung der Luft- und Pelletzufuhr. Aufgrund dieser Anforderungen war eine umfassende Neukonstruktion des Geräts notwendig, wobei viele Teile handwerklich hergestellt wurden. Die Anpassungen des Designs erfolgten auf Basis der Ergebnisse der CFD-Simulationen. Der Prototyp des neuen Pelletofens wurde Mitte Dezember 2023 von Olsberg an BIOS geliefert.</p> <p>Versuchsanlage 1 – Testläufe bei BIOS</p> <p>Die Überprüfung der realisierten Geometrien sowie die Anpassungen an den Zuluftklappen und Zündelementen wurden erfolgreich durchgeführt. Falschluffprüfungen zeigten Leckagen auf, die behoben wurden. Dabei wurden hohe Sauerstoffgehalte im Rauchgas sowie ein langsamer Abbrand des Brennstoffbetts festgestellt; interne Leckströme wurden untersucht und abgedichtet, um die Verbrennungsqualität zu verbessern. Zudem traten Probleme bei der Pelletszufuhr auf, weshalb kurze Pellets verwendet wurden, um Verstopfungen zu vermeiden. Zur Behebung des Problems entwickelte Olsberg einen neuen Pelletabwurfkanal, der in den Ofen integriert wurde. Es wurden Testläufe durchgeführt, um die Regelungsparameter zu justieren und den Ofenbetrieb zu bewerten. Zudem erfolgte eine Umstellung und der Umbau des Luftführungskonzepts, um die Luftverhältnisse in den einzelnen Zonen besser steuern zu können. Weitere Testläufe mit dem modifizierten Luftführungskonzept wurden durchgeführt, um die Regelung weiter zu optimieren.</p> <p>Versuchsanlage 1 – Testläufe am TFZ</p> <p>Im April 2024 wurde die VA1 an das TFZ übergeben und in Betrieb genommen. Dabei wurden eine erweiterte Roststeuerung, eine neue Rostwelle sowie der Aufbau der Luftleitungen umgesetzt. Zudem wurden Nenn- und Teillastmessungen vorgenommen, deren Ergebnisse in einem Online-Meeting diskutiert wurden. Die Funktion der Roststeuerung konnte erfolgreich geprüft werden.</p> <p>Versuchsanlage 2 (VA2) – Konzeption und Bau</p> <p>Parallel zu den Testläufen mit VA1 wurde die Entwicklung und der Bau der VA2 vorangetrieben. Dabei wurden Modifikationen basierend auf den</p>
---	----------------------------	--

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Ergebnissen der VA1 sowie den CFD-Simulationen diskutiert. Die Konstruktionszeichnung für VA2 wurde am 05.06.2024 erörtert, wobei alle relevanten Modifikationen umgesetzt wurden. Anfang August 2024 wurde die VA2 schließlich an BIOS geliefert.</p> <p>Versuchsanlage 2 – Testläufe bei BIOS Es wurden Geometrieprüfungen und Falschlufftests am Ofen durchgeführt, wobei Nachbesserungen erforderlich waren. Dabei wurden Falschluffeinträge festgestellt; entsprechende Abdichtungsmaßnahmen wurden ergriffen. Zudem wurden Testläufe mit Standard-Fichten- und Buchenpellets durchgeführt, um die Regelungseinstellungen zu optimieren. Dabei konnte ein stabiler Betrieb bei Nenn- und Teillast sowie niedrige Emissionen erzielt werden.</p> <p>Versuchsanlage 2 – Testläufe am TFZ Im Oktober 2024 wurde VA2 an das TFZ geliefert, wobei Dichtigkeitstests durchgeführt und die Inbetriebnahme erfolgreich abgeschlossen wurden. Gemeinsam mit BIOS wurden die Inbetriebnahme sowie die Einstellung der Luft- und Rezi-Volumenströme vorgenommen. Es folgte eine umfangreiche Testreihe mit Fichten- und Buchenpellets, bei der insgesamt 30 Versuche durchgeführt wurden. Dabei wurde die Regelungssoftware optimiert, was zu niedrigen Emissionen und verbesserten Betriebszeiten zwischen den Abreinigungszyklen führte. Alle Feuerungsversuche wurden abgeschlossen und bewertet; die Ergebnisse wurden mit den Projektpartnern ausführlich besprochen.</p>
<p>AP 5 (TFZ, DEPI, BIOS, Olsberg) Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung</p>	<p>07/2023 bis 06/2024</p>	<p>Einbringung in die Brennstoffnormung Die Ergebnisse zur Pelletlängenbestimmung wurden in die Brennstoffnormung ISO TC 238 WG4 eingebracht.</p> <p>Vorschlag für Ergänzung des Sackdesigns ENplus In Zusammenarbeit mit dem DEPI wurde ein Entwurf für eine zukünftige Ergänzung des Zertifizierungssystems ENplus erstellt. Geplant ist ein Zeichen oder Schriftzug im Sacklayout, das darauf hinweist, dass Pellets mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aschegehalt < 0,5 m-% • Längenklasse M oder L • Minimaler Wassergehalt von 5 m-% <p>besonders für Pelletkaminöfen geeignet sind. Der Entwurf wird vom DEPI in die entsprechenden Gremien eingebracht.</p> <p>Einfluss einer automatischen Brennstoffregelung im deutschen Spiegelausschuss eingebracht Die Ergebnisse zum Einfluss der Pelletlänge wurden in den deutschen Spiegelausschuss CEN TC 295 eingebracht. Das TFZ schlug zudem eine normative Prüfung für das Vorhandensein einer automatischen Brennstoffregelung bei Pelletöfen vor. Dieser Vorschlag wurde in der Spiegelausschusssitzung am 27.03.2024 angenommen und an die entsprechende Fachgruppe zur weiteren Bearbeitung übergeben, an der das TFZ beteiligt ist.</p> <p>Erarbeitung von Richtlinien / Empfehlungen</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Das TFZ und BIOS haben die Empfehlungen zur Entwicklung emissionsarmer und brennstoffflexibler Pelletöfen ausgearbeitet.</p> <p>Zudem wurden gemeinsam Empfehlungen für die erweiterte Pelletcharakterisierung durch das TFZ und das DEPI erarbeitet, um die Qualität und Umweltverträglichkeit von Pellets weiter zu verbessern.</p>

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Endbericht	06/2024	Meilenstein M1 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 2 Ergebnisse des Ofenscreenings verfügbar und neue kritische Brennstoffparameter identifiziert	01/2024	Meilenstein M2 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 3 Neue Pelletcharakterisierungsmethoden entwickelt	01/2024	Meilenstein M3 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 4 Vorschläge bzgl. Prüfbrennstoffen und Adaptierungen von Brennstoffnormen ausgearbeitet	06/2024	Meilenstein M4 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 5 Erster Prototyp der LEFLEX-Pko-Technologie betriebsbereit	11/2022	Meilenstein M5 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 6 Optimierter Prototyp der LEFLEX-Pko-Technologie betriebsbereit	10/2023	Meilenstein M6 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 7 Finale Designfindung der LEFLEX-Pko-Technologie abgeschlossen	06/2024	Meilenstein M7 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 8 Technische, ökonomische und umweltbezogene Bewertung der LEFLEX-Pko-Technologie im Vergleich zum Stand der Technik abgeschlossen	06/2024	Meilenstein M8 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 9 Testläufe mit dem ersten Prototyp der LEFLEX-Pko-Technologie abgeschlossen, ausgewertet und bewertet	05/2023	Meilenstein M9 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 10 Testläufe mit dem optimierten Prototyp der LEFLEX-Pko-Technologie abgeschlossen, ausgewertet und bewertet	03/2024	Meilenstein M10 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 11 Richtlinien bzgl. Erweiterter Brennstoffcharakterisierung sowie bzgl. Eines optimierten Pelletfeuerungsdesigns verfügbar	06/2024	Meilenstein M14 wurde mit Verzögerung erreicht.
M 12	06/2024	Meilenstein M15 wird mit Verzögerung nach Projektende vermutlich in 2026 erreicht.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
Projektergebnisse an Normungsstellen und Vertreter der Ofen- und Kesselbranche kommuniziert		

b) Zusammenfassung

Die im Projekt FuturePelletSpec 2 geplanten Arbeiten konnten trotz Verzögerungen im Projektablauf durchgeführt und die Ziele des Projektantrags größtenteils erreicht werden. Schwierigkeiten in der Projektdurchführung ergaben sich vor allem aufgrund von Verzögerungen durch Klärung des Vergabeverfahrens für den Unterauftrag an den Partner BIOS, sowie durch Verzögerungen die durch Materialengpässe (Corona-Pandemie, Krieg in der Ukraine), Fachkräftemangel, Ausfall von Messtechnik aber auch durch erhöhten Mehraufwand (mehr Öfen im Ofenscreening, Bau mehrerer Prototypen, zusätzliche Testläufe bei BIOS) bedingt waren. Dies wurde der FNR frühzeitig mitgeteilt und das Projekt einmal um 6 Monate und ein weiteres mal um 8 Monate kostenneutral bis zum 31.07.2025 verlängert. In dieser Zeit konnten die noch ausstehenden Arbeiten durchgeführt und das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden. Die meisten im Projekt vorgesehenen Versuche konnten, wie im Antrag beschrieben, durchgeführt werden und führten i. d. R. zu erfolgreichen Ergebnissen. Hierdurch ergaben sich zahlreiche Daten zu unterschiedlichen Messprinzipien und -geräten sowie weitere Datengrundlagen zum Einfluss der untersuchten Brennstoffparameter auf die Emissionen mehrerer Pelletöfen. Zudem konnte das Abbrandmodell aus Teil 1 des Projekts erfolgreich optimiert und für die Entwicklung eines Prototypen eingesetzt werden. Die Vorhersagen aus den Simulationen konnten in der Praxis an den Versuchsanlagen größtenteils bestätigt werden. Somit sind sowohl das erweiterte Abbrandmodell als auch der neu konzeptionierte Pelletofen mit extrem niedrigen Emissionen bei gleichzeitig hoher Brennstoffflexibilität ein großer Erfolg des Projekts.

Die zahlreichen Ergebnisse des Projekts konnten teilweise bereits während der Projektlaufzeit in Fachzeitschriften und auf Kongressen präsentiert werden. Weitere Veröffentlichungen sind eingereicht bzw. in Vorbereitung (siehe „Abschnitt II: Veröffentlichungen“).

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Das in Teil 1 des Projekts entwickelte Brennstoffbett-Abbrandmodell wurde erfolgreich mit dem Gasphasenmodell gekoppelt und für die Entwicklung des neuen LELFEX-Pko eingesetzt. Somit wurde die Praxistauglichkeit des Modells sichergestellt. Der neuartige Pelletkaminofen wurde in Zusammenarbeit zwischen den Firmen Olsberg GmbH und BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH entwickelt. Zudem wurde in Zusammenarbeit von Olsberg, BIOS und dem TFZ ein neues optimiertes Regelungskonzept erstellt. Der Pelletkaminofen weist sowohl hinsichtlich des Nenn-, Teillastbetriebs und im realitätsnahen beReal Lastzyklus mit standard ENplus-Fichtenpellern als auch im Screening mit variierenden kritischen Brennstoffparametern durchgehend extrem niedrige Emissionen auf. Zudem konnten in den letzten Messungen noch weitere Optimierungspotentiale für ein finales marktfähiges Ofendesign identifiziert werden. Es konnten mehrere Schnellbestimmungsverfahren zur Pelletlänge, drei Verfahren zur manuellen Bestimmung der Pelletlänge sowie zwei NIR-Messgeräte, ein Schneckenprüfstand und zwei Methoden zur Untersuchung des Einflusses von Karbonatschmelzen auf die Versinterung der Rostasche erfolgreich getestet und verifiziert werden. Zudem konnten die in Teil 1 des Projekts gefundenen Erkenntnisse des Einflusses bestimmter Pellet-Brennstoffparameter auf die Emissionen von Pelletöfen vertieft und durch die Messungen an insgesamt vier marktverfügbaren und technisch unterschiedlichen Pelletöfen mit einer breiteren Datenbasis teilweise neu bewertet werden. Es wurden Empfehlungen für ein optimiertes Pelletfeuerungsdesign unter Berücksichtigung der neuen kritischen Brennstoffparameter sowie für eine erweiterte Brennstoffcharakterisierung erstellt und auf der Projektseite des TFZ veröffentlicht.

Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Die Projektkoordination durch das TFZ in Arbeitspaket 1 umfasste die Planung und Durchführung von 6 Projekttreffen (5 vor Ort, 1 digital), die Koordination bilateralen Besprechungen und Arbeitskreistreffen (16 digital) sowie die Abstimmung mit den Praxispartnern und der FNR. Außerdem umfasst AP 1 die Erstellung der Zwischenberichte und des Abschlussbericht sowie die Abrechnungen der Kosten der Unterauftragnehmer. Hierdurch wurden die unterschiedlichen Kompetenzen der einzelnen Projektpartner optimal miteinander verzahnt und eine effiziente und lösungsorientierte Arbeitsweise garantiert. AP 1 ist dabei als unterstützendes Arbeitspaket zu sehen, in dem keine konkreten Versuchsergebnisse anfielen.

Arbeitspaket 2: Pellet-Brennstoffcharakterisierung

Das Arbeitspaket 2 umfasst alle Arbeiten rund um die Herstellung und Charakterisierung der verwendeten Versuchspellets, sowie die Beschreibung der eingesetzten Charakterisierungsmethoden und dem Förderverhalten der Pellets mittels eines eigens entwickelten Förderprüfstands. Die Emissionsmessungen mit den marktverfügbaren Pelletöfen gehören ebenfalls in dieses Arbeitspaket, werden aber wegen der besseren Lesbarkeit und der gleichzeitigen Messungen des in diesem Projekt entwickelten Prototypen (LEFLEX-Pko) zusammen mit dessen Messergebnissen in Arbeitspaket 4 dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die umfangreichen Ergebnisse aus AP 1 in die Abschnitte a) bis d) untergliedert.

a) Rohstoffbeschaffung und Pelletproduktion

Die Organisation und Beschaffung der Rohmaterialien für die Pelletierung der Versuchspellets erfolgte über das DEPI. Die Anlieferung der Rohmaterialien an das TFZ erfolgte für das Sortiment Fichte in Form von Spänen und für die Sortimente Kiefer, Buche, Birke und Erle in Form getrockneter rindenfreier Hackschnitzel. Am TFZ wurden die Rohmaterialien zunächst ein weiteres mal mit einem Trommelhacker (Vecoplan VTH 45/12/2) und einem Rundlochsiebkorb mit einem Lochdurchmesser von 1,0 cm gehackt. Daraufhin erfolgte die Zerkleinerung zum pelletierfähigen Ausgangsmaterial in der Hammermühle des TFZ (Rematec Agro 110/160). Nach jedem dieser Schritte erfolgte jeweils eine umfangreiche Homogenisierung des Materials, um eine möglichst homogene Zusammensetzung der Versuchsbrennstoffe zu gewährleisten. Dazu wurde das Material auf sauberem Untergrund mehrmals umgeschaufelt und gemischt und anschließend in Bigbags abgefüllt. Das zerkleinerte Material wurde je nach Anwendungsfall gemischt, additiviert, mit Wasser konditioniert ($M = 12 - 15 \text{ m-\%}$) und anschließend mit der Flachmatritzenpresse des TFZ (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390) unter Verwendung der passenden Matrize pelletiert. Die Pelletierung gestaltete sich bei einigen der gewählten Baumarten (z.B. Fichte, Kiefer und Birke) herausfordernd, da das Material teilweise länger abgelagert war bzw. für die Birke nicht die exakt passende Matrize vorhanden war. Dies resultiert bei den betroffenen Sortimenten (v.a. Birke und Kiefer) in einer ungewollt kurzen Pelletlänge. Dem hätte man durch Verwendung von Bindemitteln entgegensteuern können, was aber zu Beginn des Projekts ausgeschlossen wurde, um Quereinflüsse des Bindemittels auf Emissionen und Versinterungsverhalten der Rostaschen auszuschließen.

Insgesamt wurden 14 Pelletsortimente hergestellt. Eine Übersicht der Versuchspellets, sowie der während der Pelletierung verwendeten Matrizen, der Einstellung der Abbruchvorrichtung (Abstand, bei dem Pellets gezielt abgeschert werden) und der pelletierten Menge findet sich in Tabelle 1. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Pelletiertechnik und des Ablaufs der Pelletierung findet sich im bereits veröffentlichten TFZ-

Bericht zu FuturePelletSpec1 [4], der kostenfrei auf der [Homepage des TFZ](#) heruntergeladen werden kann.

Tabelle 1: Übersicht der hergestellten Versuchspelletsortimente, der verwendeten Matrizen, Einstellung der Abbruchvorrichtung und der pelletierten Menge.

Nr.	Sortiment	Matrize	Abbruchvorrichtung	Masse pelletiert
-	-	-	mm	kg, ar
1	Fichte sehr kurz	24 oben	12	180
2	Fichte kurz	24 oben	16	180
3	Fichte mittel	18 oben	24	310
4	Fichte lang	24 oben	34	180
5	Buche kurz	18 oben	16	170
6	Buche mittel	18 oben	24	310
7	Buche lang	18 oben	34	185
8	Fichte 65% Buche 35%	18 oben	24	135
9	Kiefer	36 unten	24	245
10	Birke	30 oben	24	245
11	Erle	24 oben	24	245
12	Fichte additiviert (Ca/K1)	24 oben	24	235
13	Fichte additiviert (Ca/K2)	24 oben	24	230
14	Fichte additiviert (Si/K1)	24 oben	24	230

Wie in Tabelle 1 bereits dargestellt, wurden drei Fichtensortimente hergestellt, bei denen die inhaltstofflichen Parameter gezieht durch Zugabe von Additiven angepasst wurde. Ziel war es das Si/K-Verhältnis und das Ca/K-Verhältnis so anzupassen, dass es den in FuturePelletSpec 1 in Feuerungsversuchen kritisch aufgefallenen Brennstoffen möglichst nahekommt. Hierzu wurden zunächst Vorversuche an den zurückgestellten Rostaschen der Feuerungsversuche aus FuturePelletSpec 1 mit dem Kohlenstoffanalysator des TFZ (LECO RC 612) durchgeführt. Dabei wurde (wenn vorhanden) der versinterte „Grobanteil“ der Rostaschen getrennt von dem „Feinanteil“ der Rostaschen untersucht. Für die Darstellung der Ergebnisse wurden die Elementgehalte der Brennstoffanalysen unter Berücksichtigung des karbonatfreien Aschegehalts auf die erwarteten Elementgehalte in der Rostasche umgerechnet. Abbildung 2 zeigt den TIC (Total Inorganic Carbon in Form von CO₂ in mol/kg Brennstoffasche) der untersuchten Rostaschen über den berechneten Si-Gehalt der Rostaschen. Es ist eindeutig der Zusammenhang erkennbar, dass je mehr Si in der Asche ist, desto weniger TIC (Karbonate) sind in den Rostaschen noch nachweisbar ($R^2 = 0,60$ bis $0,82$). Dies deckt sich mit den Literaturdaten [6–8] wonach die für die Karbonatbildung verantwortlichen Elemente wie Kalium bei gleichzeitigem Angebot von Silizium bevorzugt als Siliziumverbindungen in die Asche eingelagert werden und dann nicht mehr für die Karbonatbildung zur Verfügung stehen. Im Vergleich zwischen der groben Fraktion und der feinen Rostasche zeigten sich keine eindeutigen Tendenzen. Bei den meisten Brennstoffen mit niedrigem Siliziumgehalt lag der TIC der groben Rostasche höher als der der feinen, was für mehr Karbonatschmelzen in den versinterten Ascheanteilen spricht. Bei den Brennstoffen mit hohem Siliziumanteil (Kiefer, Douglasie) liegt der TIC in der groben Asche dagegen bei 0. Dies deckt sich im Wesentlichen mit der Theorie.

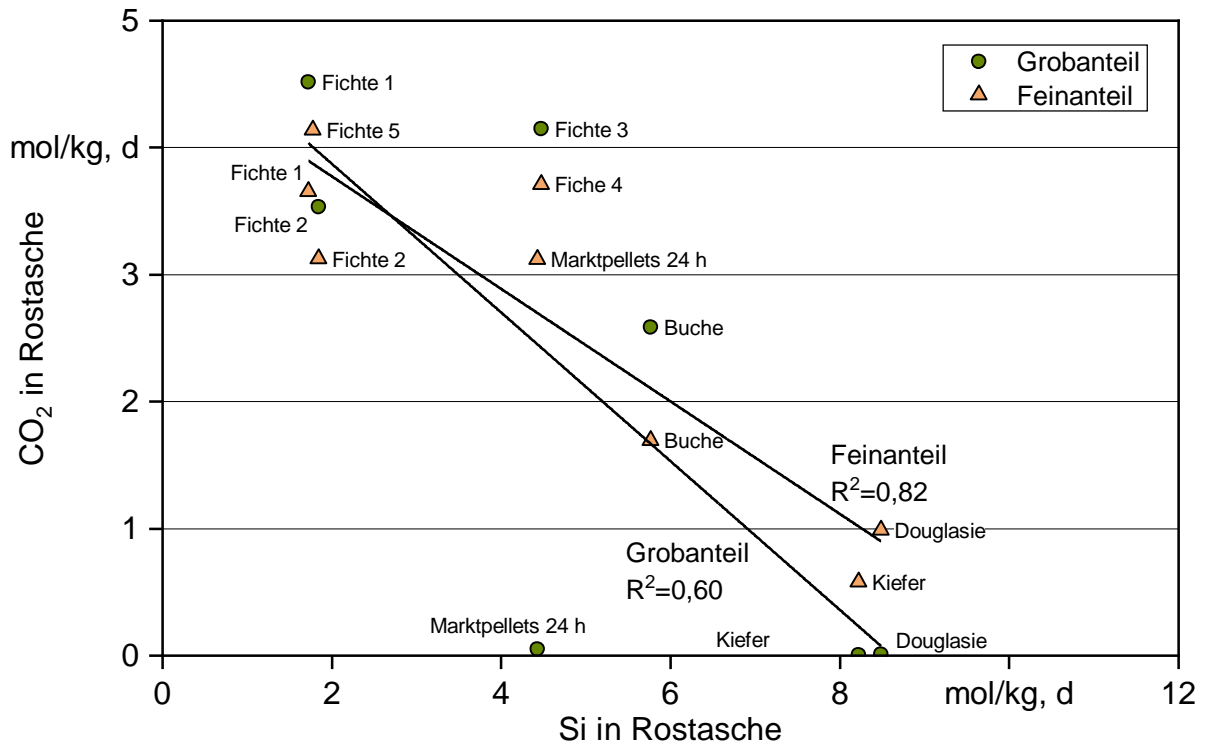


Abbildung 2: Lineare Regressionen zwischen Karbonatanteil (als CO₂) und Si der untersuchten Rostaschen aus den Feuerungsversuchen aus FuturePelletSpec 1, getrennt nach Grobanteil und Feinanteil (d = dry basis)

Abbildung 3 zeigt den Karbonatanteil (TIC) berechnet als CO₂ der untersuchten Rostaschen über den aus den Elementaranalysen berechneten Anteil an Ca+K/2-Oxiden. Auch hier korrelieren die TIC der Rostaschen sowohl der „Grobanteil“ (R² = 0,62) als auch der „Feinanteil“ (R² = 0,78) relativ gut ausgeprägt mit den Ca+K/2-Oxiden. Die Ergebnisse stärken die These der vermehrten Bildung von Karbonaten und den damit erhöhten Vorkommen von Versinterungen im Brennertopf durch Karbonatschmelzen. Dies wird auch durch die Beobachtung, dass der TIC im „Grobanteil“ der Asche für die meisten Brennstoffe höher ist als im „Feinanteil“. Vor allem bei den Brennstoffen mit hohem Si-Anteil (Kiefer, Douglasie) aber auch bei dem Langzeittest über 24 h (Marktpellets 24 h) kehrt sich dies um. Im Fall der siliziumreichen Brennstoffe dürfte dies wieder durch die vermehrte Bildung von Kalium-Silizium- und Calcium-Silizium-Verbindungen begründet sein. Bei den 24 h Versuchen könnte die lange Verweildauer der Rostaschen bei hohen Temperaturen zur Zersetzung der Karbonate geführt haben. Zudem könnte es durch die insgesamt höhere Aschemenge auch zu einer Aufkonzentration von Silizium in der Rostasche gekommen sein, die dann denselben Effekt begünstigt wie bei den siliziumreichen Brennstoffen.

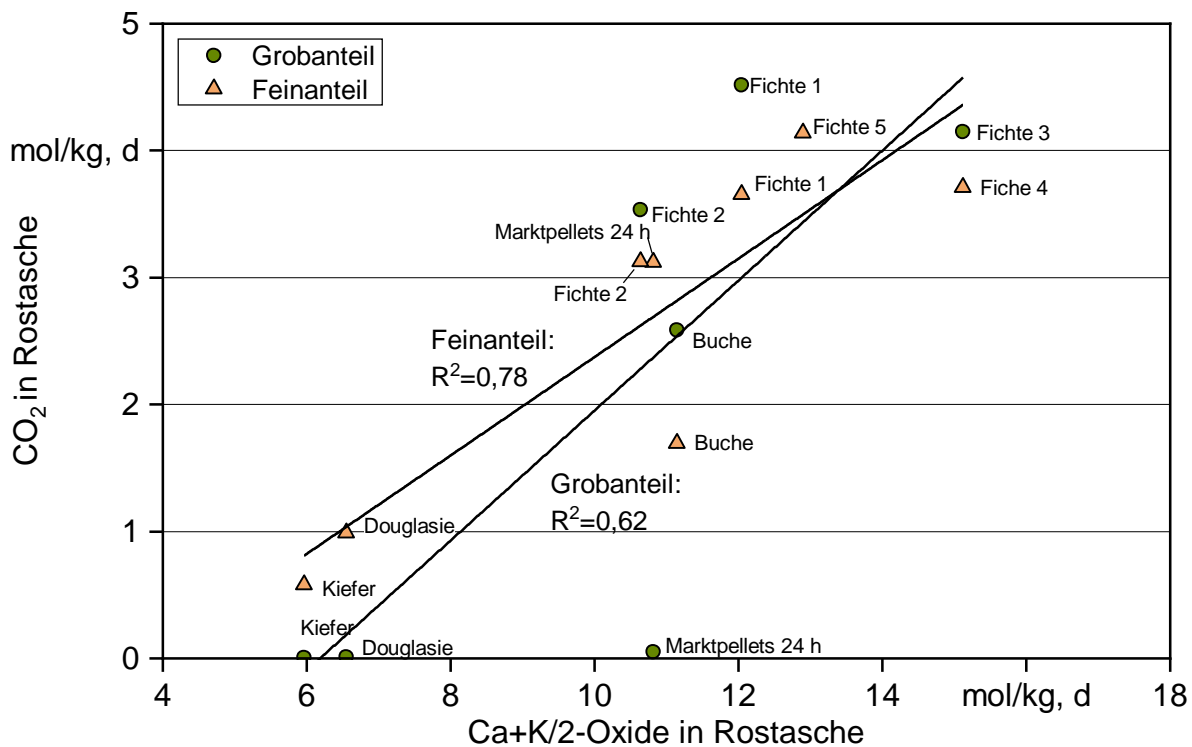


Abbildung 3: Lineare Regression zwischen Karbonatanteil (als CO₂) und den Ca+K/2-Oxiden der untersuchten Rostaschen aus den Feuerungsversuchen aus FuturePelletSpec 1, getrennt nach Grobanteil und Feinanteil (d = dry basis)

Ausgehend von diesen Voruntersuchungen wurden die Eckpunkte der Additivierungsstufen festgelegt. Hierfür wurden alle Brennstoffe aus FuturePelletSpec 1 in ein Dreiecksdiagramm (Abbildung 4) für die Komponenten CaO, K₂O und SiO₂ eingezeichnet. Die gewählten Additivierungsstufen Ca/K 1 (hoher Ca- und niedriger K-Gehalt) Ca/K 2 (hoher K- und niedriger Ca-Gehalt) und Si/K 1 (hoher Si- und hoher K-Gehalt) bilden dabei die Extrempunkte ab. Zusätzlich wurde noch ein Punkt mit moderaterem Si und K Gehalt (Si/K 2) gewählt. Mit diesen Werten wurden Vorversuche zur Umsetzbarkeit durchgeführt. Hierzu wurden Mischungsverhältnisse aus dem Fichtenrohmaterial für die Pelletierung der Versuchsbrennstoffe (siehe oben) und den ausgewählten Additiven (Kaliumhydroxid, Quarz, Kieselsäure und CaO) berechnet und anschließend hergestellt. Die für die Vorversuche benötigten kleinen Mengen wurden dann mittels einer am TFZ extra konstruierten Einzelpelletpresse pelletiert. Verascht und erneut mit dem Kohlenstoffanalysator untersucht.

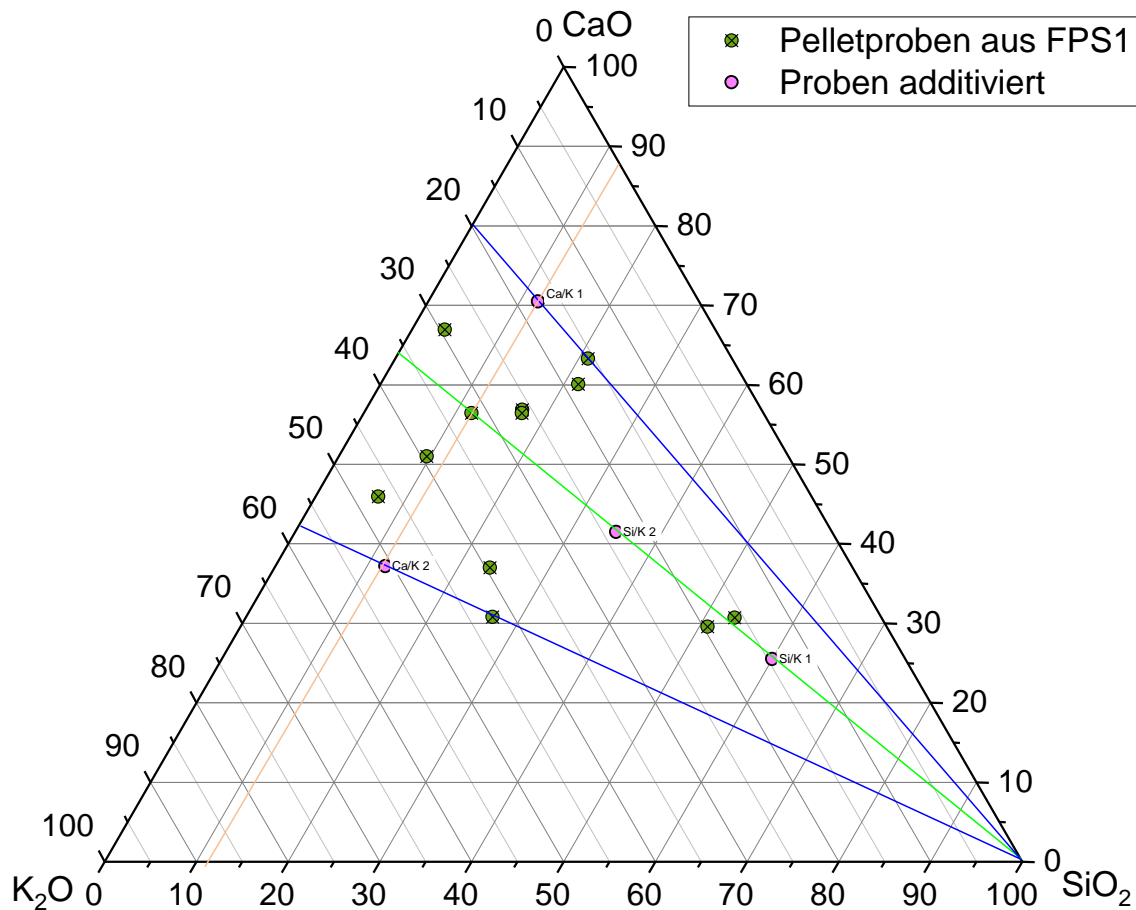


Abbildung 4: Dreiecksdiagramm der Brennstoffe aus FuturePelletSpec 1 (FPS1) und den gewählten Additivierungsstufen.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Vorversuche, das auf dieselbe Weise ausgewertet wurde wie die bereits dargestellten Rostaschen aus FuturePelletSpec 1. Wie zu sehen ist, folgen die im Labor hergestellten Mischungen und Aschen der Korrelation der Rostaschen (Abbildung 3) sehr gut ($R^2 = 0,91$). Auch der Bereich, in dem der Gehalt an $\text{Ca}+\text{K}/2$ -Oxiden in der Asche abgedeckt ist, deckt sich gut mit den untersuchten Rostaschen. Insgesamt zeigten die mit Quarz additivierten Proben einen höheren Gehalt an Karbonaten als die mit Kieselsäure additivierten Proben. Daher wurde für die Versuchsreihen im Feuerungsmaßstab auf das Additiv Quarz und nicht auf Kieselsäure zurückgegriffen. Es konnte in den Vorversuchen kein eindeutiger Einfluss des Siliziumgehalts auf die Karbonatbildung festgestellt werden. Deshalb wurde auf einen Punkt mit externem Silizium (Si/K 1) reduziert. Dieser liegt im Dreiecksdiagramm auch näher an den realen Brennstoffen (Douglasie und Kiefer) aus FuturePelletSpec 1 (Abbildung 4).

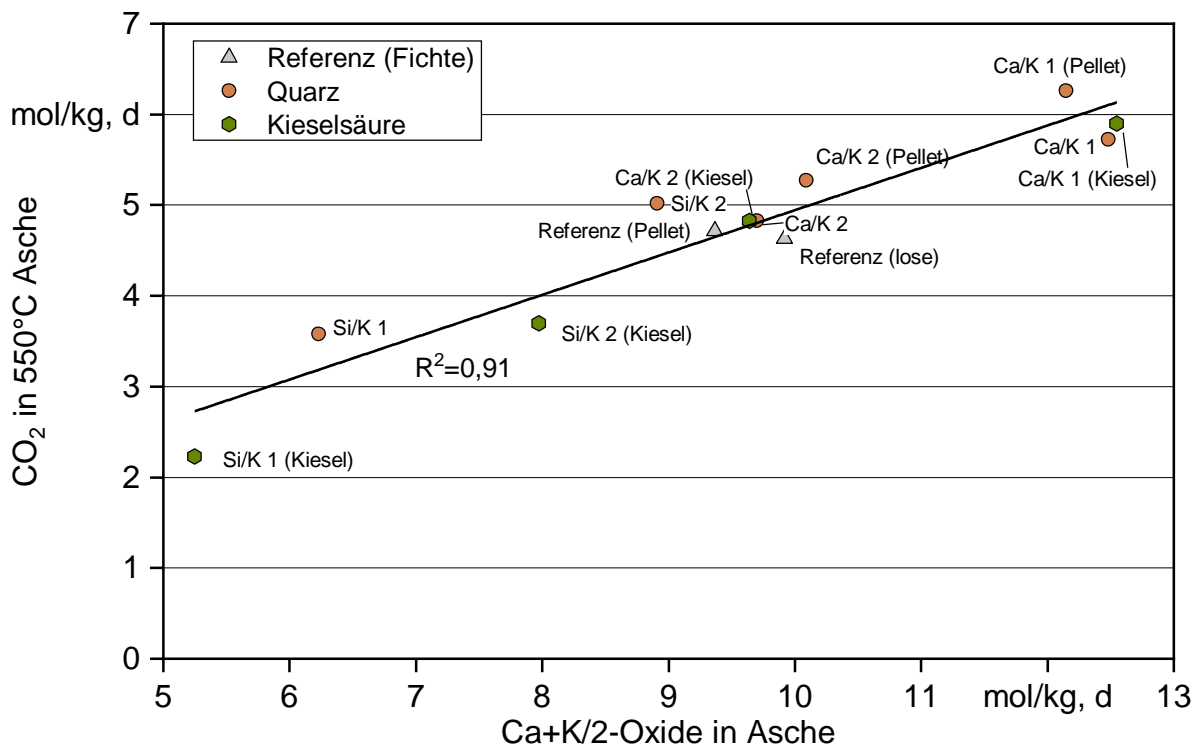


Abbildung 5: Lineare Regression zwischen Karbonatanteil (als CO₂) der Aschen aus den additvierten Pellets der Vorversuche zu dem aus den Mischungsverhältnissen und Brennstoffanalysen berechneten Anteil an Ca+K/2-Oxiden (d = dry basis).

Die Mischungen wurden dann Chargen von ca. 230 kg hergestellt, ausgiebig homogenisiert und anschließend pelletiert. Das Ergebnis hinsichtlich der Oxide ist in dem Dreiecksdiagramm in Abbildung 6 dargestellt. Die Punkte Ca/K 1 und Ca/K 2 wurden dabei relativ gut getroffen und liegen nahe an den definierten Sollwerten. Bei dem Versuchspunkt Si/K 1 liegt der Ist-Wert dagegen etwas weiter weg vom Sollwert und damit eher in der Nähe des Versuchspunkt Si/K 2. Entweder wurde das Additiv nicht ausreichend in das Rohmaterial gemischt oder hat sich beim langen Homogenisieren wieder entmischt. Dazu muss berücksichtigt werden, dass für die Analyse nur eine Probenmenge von einigen Milligramm analysiert wird, wodurch auch leicht eine gewisse Fehlinterpretation des tatsächlich in der Gesamtmenge vorliegenden Siliziumgehalts stattfinden kann. Im Dreiecksdiagramm sind zusätzlich die aus den Elementaranalysen (siehe nächster Abschnitt) berechneten Oxidgehalte für die Versuchsbrennstoffe aus FuturePelletSpec 2 eingezeichnet. Erfreulicherweise liegt der Ist-Wert des Versuchspunkts Si/K 2 sehr nah an den Kiefern pellets aus FuturePelletSpec 2. Der Versuchspunkt Ca/K 1 ist demnach am ehesten mit den reinen Fichten pellets und der Versuchspunkt Ca/K 2 mit den Buchen pellets vergleichbar. Insgesamt ist das Ergebnis der Additivierung hinsichtlich der im Pelletierprozess schwierig umsetzbaren Homogenität der Mischung zufriedenstellend.

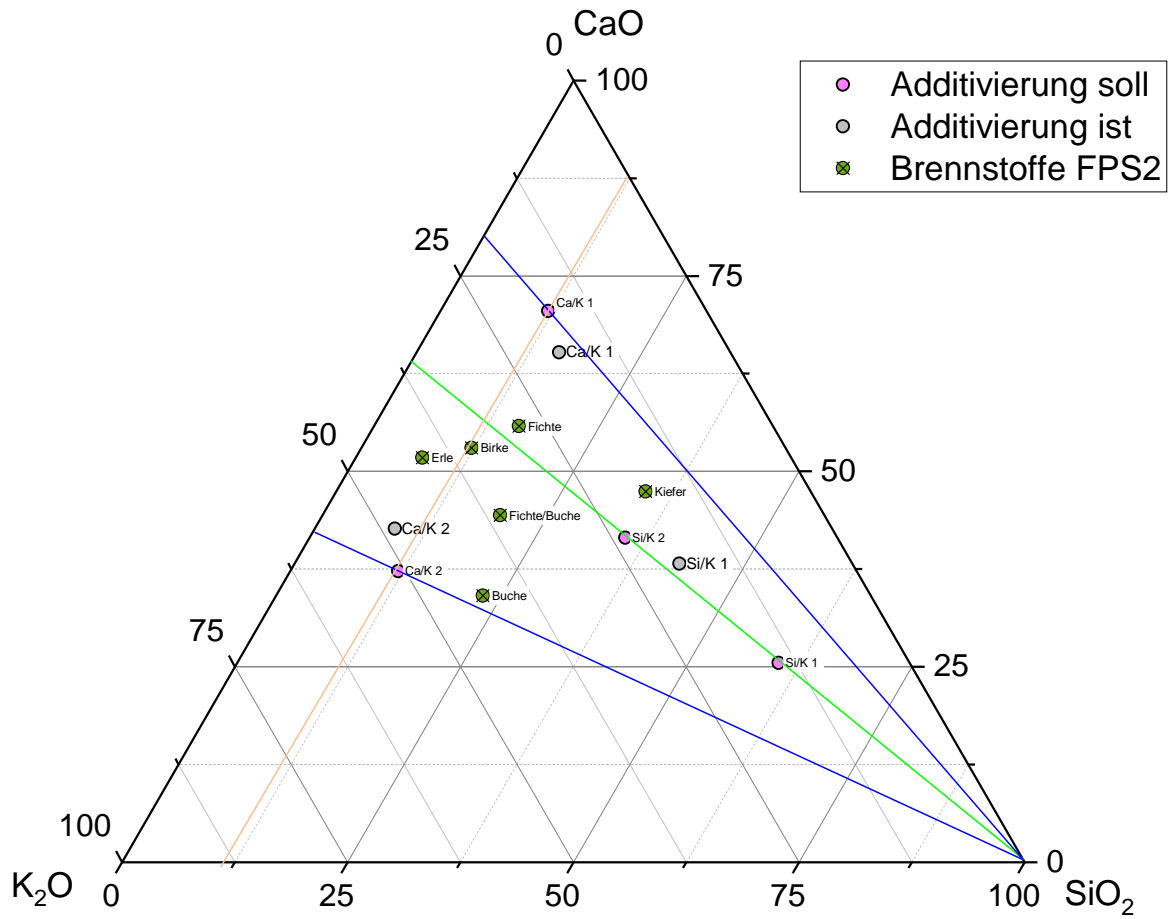


Abbildung 6: Dreiecksdiagramm der gewählten Additivierungsstufen (soll) und der tatsächlichen Zusammensetzung der hergestellten Pellets (ist) sowie der restlichen Versuchsbrennstoffe aus FuturePelletSpec 2 (FPS2).

b) Charakterisierung der Versuchsbrennstoffe mittels Laboranalytik

Alle Versuchsbrennstoffe wurden in pelletiertem Zustand hinsichtlich der physikalischen Parameter untersucht. Die inhaltsstofflichen Analysen erfolgten am Ausgangsmaterial, d.h. vor der Pelletierung. Die durchgeführten Analysen mittels Standardlaboranalytik wurden dabei nach den für die jeweilige Bestimmungsmethode gängigen Normen durchgeführt. Diese lassen sich dabei in Standardanalytik nach ISO 17225-2 bzw. ENplus (Tabelle 2) und erweiterte, nicht von der Norm geforderte inhaltsstoffliche Analytik (Tabelle 3) aufteilen.

Tabelle 2: Holzpelletcharakterisierung gemäß ISO 17225-2 (2021) und ENplus; ar = im Anlieferungszustand „as received“

Parameter (normativ)	Bestimmungsverfahren	Einheit	Anmerkungen
Herkunft und Quelle	ISO 17225-1		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	mm	relevant bzgl. Brennstofftransport in Förderaggregaten, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung
Wassergehalt M	ISO 18134-1 ISO 18134-2	m-%, ar	relevant bzgl. Heizwert, Lagerfähigkeit, Verbrennungstemperaturen
Aschegehalt A	ISO 18122	m-%, d	relevant bzgl. Entaschungssystem, Grobstaubemissionen
Mechanische Festigkeit DU	ISO 17831-1	m-%, ar	relevant bzgl. Fördertechnik, Grobstaubemissionen,
Feingutanteil F	ISO 18846	m-%, ar	Brennstoffaustrag aus dem Brennstoffbett, Abbrandverhalten
Additive		m-%	
Heizwert H _u	ISO 18125	MJ/kg oder kWh/kg, ar	relevant bzgl. des Energieinhalts des Brennstoffs und damit wichtig bzgl. Brennstoffförderung und Brennstoffeinschub
Schüttdichte BD	ISO 17828	kg/m ³ , ar	
Stickstoff (N)	ISO 16948	m-%, d	relevant bzgl. der NO _x -Emissionen
Schwefel (S), Chlor (Cl)	ISO 16994	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	mg/kg, d	feuerungstechnisch von untergeordneter Relevanz; erhöhte Gehalte dieser Elemente weisen auf den Einsatz nicht naturbelassener Fraktionen hin
Ascheschmelzverhalten (nur informativ)	ISO 21404	°C	relevant hinsichtlich Schlackebildung im Brennstoffbett

Tabelle 3: Zusätzliche inhaltstoffliche Parameter, die nicht in der ISO 17225-2 limitiert sind

Parameter	Bestimmung nach Norm	Möglicher Einfluss auf die Verbrennung
Aluminium (Al), Eisen (Fe)	ISO 16967	–
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)	ISO 16968	–

Alle Pelletsortimente wurden hinsichtlich der in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführten Parameter nach den entsprechenden Normen analysiert. Zusätzlich wurden aus den Analyseergebnissen Brennstoffindizes (z. B. Summe der Aerosolbildner, Si/K, Cl/Si, (Si+P+K)/(Ca+Mg+Al), Ca/K) sowie die Energiedichte berechnet. Die Brennstoffasche wurde zusätzlich in einem Kohlenstoffanalysator hinsichtlich ihres Karbonatanteils untersucht, um den karbonatfreien Aschegehalt angeben zu können, der bei den im Feuerraum vorherrschenden Temperaturen den realistischeren Wert darstellt als die bei 550°C veraschte Brennstoffprobe. Außerdem wurden die zusätzlichen Parameter grober Feinanteil (nach ISO 5370-2023 [9]), Anteil an Pellets < 10 mm, und die Partikeldichte (nach ISO 18847-2024 [10]) die nach dem 2022 veröffentlichten ENplus Handbuch noch ohne Grenzwert informativ angegeben werden müssen, bestimmt. Die aktuellen Grenzwerte für A1-Pellets nach ISO 17225-2 sowie für die ENplus Zertifizierung nach aktuellem Handbuch sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut ISO 17225-2 und ENplus (Stand 2025) [11, 12]. d = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand, m-% = Masseprozent, k. A. = keine Angaben

Parameter	ISO 17225-2 A1	ENplus A1
Herkunft und Quelle	Stammholz, chemisch unbehandelte Holzrückstände	Stammholz, chemisch unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie
Durchmesser D (mm)	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1
Länge L (mm)	3,15 ≤ L ≤ 40 ¹	3,15 ≤ L ≤ 40
Wassergehalt M (m-%)	≤ 10	≤ 10
Aschegehalt A (m-%, d)	≤ 0,7	≤ 0,7
Mech. Festigkeit DU (m-%, ar)	≥ 97,5	≥ 98
Feinanteil F (m-%, ar)	≤ 1,0	≤ 1,0 (Schüttgut) ≤ 0,5 (Sackware)
Additive (m-%, d)	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben ²
Heizwert H _u (MJ/kg, ar)	≥ 16,5	16,5 ≤ H _u ≤ 19 ²
Schüttdichte BD (kg/m ³ , ar)	≥ 600	≥ 600, ≤ 750
Stickstoff N (m-%, d)	≤ 0,3	≤ 0,3
Schwefel S (m-%, d)	≤ 0,04	≤ 0,04
Chlor Cl (m-%, d)	≤ 0,02	≤ 0,02
Arsen As (mg/kg, d)	≤ 1	≤ 1
Cadmium Cd (mg/kg, d)	≤ 0,5	≤ 0,5
Chrom Cr (mg/kg, d)	≤ 10	≤ 10

Parameter	ISO 17225-2 A1	ENplus A1
Kupfer Cu (mg/kg, d)	≤ 10	≤ 10
Blei Pb (mg/kg, d)	≤ 10	≤ 10
Quecksilber Hg (mg/kg, d)	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel Ni (mg/kg, d)	≤ 10	≤ 10
Zink Zn (mg/kg, d)	≤ 100	≤ 100
Ascheschmelzverhalten (°C)	Sollte angegeben werden	Erweichungstemperatur ≥ 1.200
Nicht normativ / informativ		
Anteil der Pellets mit Länge < 10 mm (m-%, ar)	Kategorie L: < 20% Kategorie M: 20% ≤ und ≤ 30% Kategorie S > 30%	Wert & Kategorie müssen angegeben werden
Partikeldichte PD (g/cm ³ , ar)	-	Wert muss angegeben werden
Grober Feinanteil FP (3,15 mm ≤ FP < 5,6 mm) (m-%, ar)	-	Wert muss angegeben werden

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.

Tabelle 5: Mittelwerte der physikalischen Brennstoffparameter für die untersuchten Pelletsortimente

Nr.	Sortiment	M	BD	PD	H _u	ED	A	A _{karbonatfrei}	F _{<3,15mm}	F _{<5,6mm}	DU	L _{Mittel}	L _{Median}	L _{Min}	L _{Max}	Anteil < 10 mm	Längensklasse
		m-%, ar	kg/m ³ , ar	kg/m ³ , d	MJ/kg, ar	MJ/L, ar	m-%, d	m-%, d	m-%, ar	m-%, ar	m-%, ar	mm	mm	mm	mm	m-%	-
1	Fichte sehr kurz	4,8 ± 0,0	770 ± 15	1343 ± 12	18,8	13,8	0,40 ± 0,00	0,33 ± 0,00	0,1	0,2	94,8	9,5	8,9	3,0	21,7	59,5	S
2	Fichte kurz	8,6 ± 0,1	680 ± 8	1299 ± 10	18,6	11,9	0,40 ± 0,00	0,32 ± 0,00	0,0	0,1	98,7	12,0	12,4	4,0	19,7	16,5	L
3	Fichte mittel	8,0 ± 0,0	680 ± 5	1294 ± 9	18,7	11,9	0,41 ± 0,00	0,33 ± 0,00	0,1	0,2	97,4	16,1	16,3	3,5	27,7	8,5	L
4	Fichte lang	5,2 ± 0,1	720 ± 9	1311 ± 16	18,7	12,7	0,38 ± 0,05	0,31 ± 0,05	0,0	0,1	97,2	21,4	21,3	3,0	38,8	3,9	L
5	Buche kurz	6,1 ± 0,0	690 ± 5	1323 ± 7	18,2	11,8	0,83 ± 0,03	0,71 ± 0,03	0,1	0,1	98,6	14,2	14,9	5,0	22,5	7,9	L
6	Buche mittel	6,0 ± 0,1	670 ± 2	1313 ± 14	18,1	11,4	1,10 ± 0,00	0,98 ± 0,00	0,1	0,1	98,5	17,4	18,3	3,2	27,4	4,1	L
7	Buche lang	6,3 ± 0,1	650 ± 3	1308 ± 9	18,2	11,1	1,05 ± 0,01	0,92 ± 0,01	0,0	0,4	99,0	23,5	24,6	2,3	37,2	1,2	L
8	Fi.65/Bu.35	7,3 ± 0,1	660 ± 3	1301 ± 20	18,6	11,5	0,67 ± 0,04	0,56 ± 0,04	0,1	0,2	96,5	13,8	13,2	3,6	26,8	12,5	L
9	Kiefer	6,2 ± 0,0	710 ± 1	1333 ± 7	19,3	11,5	0,44 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,0	0,1	99,7	11,7	10,6	4,4	26,2	28,0	M
10	Birke	7,2 ± 0,1	670 ± 3	1250 ± 16	18,3	13,1	0,44 ± 0,01	0,35 ± 0,01	0,2	0,5	97,8	7,5	6,6	2,6	23,5	77,1	S
11	Erle	5,3 ± 0,0	670 ± 5	1273 ± 14	18,6	11,9	0,46 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,0	0,0	98,2	16,9	17,2	2,6	28,0	7,2	L
12	Fichte Ca/K 1	5,6 ± 0,0	720 ± 12	1319 ± 34	18,8	12,7	0,59 ± 0,01	0,44 ± 0,01	0,0	0,0	98,3	15,7	14,7	3,2	36,2	12,3	L
13	Fichte Ca/K 2	4,9 ± 0,0	720 ± 6	1323 ± 16	18,7	12,7	0,68 ± 0,00	0,51 ± 0,00	0,0	0,0	98,8	17,4	17,3	4,6	30,4	7,2	L
14	Fichte Si/K 1	5,4 ± 0,0	660 ± 3	1310 ± 15	18,7	11,7	0,75 ± 0,01	0,65 ± 0,01	0,0	0,0	99,1	19,6	20,9	3,6	31,3	3,6	L
-	Referenz	7,7 ± 0,1	710 ± 6	1309 ± 7	17,8	12,2	0,35 ± 0,01	0,27 ± 0,01	0,1	0,1	99,0	15,3	15,0	5,1	25,6	7,3	L

M = Wassergehalt; BD = Schüttdichte; PD = Partikeldichte; Q = Heizwert; A = Aschegehalt; F = Feinanteil; DU = mechanische Festigkeit; L = Länge; ED = Energiedichte; ar = im Anlieferungszustand; d = trocken; bei Dreifachbestimmung ± Standardabweichung

Tabelle 6: Mittelwerte der chemischen Brennstoffparameter und der wichtigsten daraus berechneten Brennstoffindizes, alle Werte bezogen auf trockenen Brennstoff

Nr.	Sortiment	C	H	O	N	S	Cl	Cl	Al	Ca	Fe	K	Cu	Mg	Mn	Na	P	Si	Σ(K,Na,Pb,Zn)	Si/K	(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)	Ca/K
		m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	m-%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mol/mol	mol/mol
1-4	Fichte	48,7	6,4	44,5	0,07	0,007	0,004	44	44	795	33	465	1,0	153	167	8	52	150	489	0,45	0,68	1,67
5-7	Buche	48,6	6,0	44,6	0,10	0,011	0,006	55	180	997	138	1460	1,8	415	210	37	71	439	1503	0,42	1,14	0,67
8	Fi.65/Bu.35	48,7	6,3	44,5	0,08	0,008	0,005	48	92	866	70	813	1,3	245	182	18	59	251	844	0,43	0,90	1,04
9	Kiefer	48,9	6,1	44,5	0,06	0,007	0,003	32	106	686	82	307	0,9	216	88	20	29	325	336	1,47	0,68	2,18
10	Birke	50,1	6,2	43,3	0,09	0,008	0,004	40	38	781	62	595	1,2	220	34	14	88	118	636	0,28	0,74	1,28
11	Erle	50,0	6,2	43,6	0,21	0,024	< 0,005	< 50	8	790	22	725	1	230	24	< 10	177	74	740	0,14	0,91	1,06
12	Fichte Ca/K 1	-	-	-	-	-	-	-	-	1450	-	490	-	-	160	-	-	230	490	0,65	0,57	2,89
13	Fichte Ca/K 2	-	-	-	-	-	-	-	-	1100	-	1450	-	-	165	-	-	150	1450	0,14	1,55	0,74
14	Fichte Si/K 1	-	-	-	-	-	-	-	-	1150	-	670	-	-	180	-	-	840	670	1,75	1,64	1,67
-	Referenz	50,2	6,2	43,3	0,07	0,007	<0,005	< 50	< 10	677	16	402	< 1	129	180	< 10	46	245	415	0,85	0,91	1,64

Die Ergebnisse der Analysen der physikalischen Brennstoffparameter ist in Tabelle 5 und die der chemischen Brennstoffparameter sowie der berechneten Brennstoffindizes in Tabelle 6 aufgeführt. Der Wassergehalt der untersuchten Pelletsortimente lag zwischen 4,8 m-% (Fichte sehr kurz) und 8,6 m-% (Fichte kurz) und damit im Bereich der Vorgaben der Klasse A1. Im Teil 1 des Projekts haben sich sehr niedrige Wassergehalte (getestet wurden 3 m-%) als nachteilig hinsichtlich der Emissionen dargestellt. Die sehr kurzen Fichtenpellets lagen hier gerade an der Grenze.

Die Schüttdichten lagen mit 660 kg/m³ (Fichte Si/K 1) bis 770 kg/m³ (Fichte sehr kurz) durchweg oberhalb der für A1 geforderten 600 kg/m³. Sie zeigten jedoch eine erhebliche Schwankungsbreite von bis zu 110 kg/m³ bzw 16 %. Die Partikeldichte schwankte zwischen 1250 kg/m³ (Birke) und 1343 kg/m³ (Fichte sehr kurz) in einem schmalen Band um 93 kg/m³ bzw. 7,4 %, da diese nicht von der Pelletlänge abhängig ist.

Der Heizwert lag auf einem für Pellets typischen einheitlichen Niveau zwischen 18,1 MJ/kg (Buche) und 19,3 MJ/kg (Kiefer). Die aus Schüttdichte und Heizwert resultierende Energiedichte (ED) bewegt sich zwischen 11,1 MJ/L (Buche lang) und 13,8 MJ/L (Fichte sehr kurz). Dies könnte für Feuerungen ohne automatische Anpassung der Brennstoffzufuhr eine relevante Schwankungsbreite hinsichtlich des Energieeintrags in die Brennkammer ohne ausreichende Anpassung der benötigten Luftmengen darstellen.

Die Aschegehalte der untersuchten Holzarten (Fichte, Kiefer, Buche, Birke und Erle) lagen durchweg unter 0,7 m-%, bis auf die Buche. Hier lag der Aschegehalt trotz der sehr aufwendigen Homogenisierung zwischen 0,8 und 1,1 m (10 Einzelproben über die gesamte Charge). Da solche natürlichen Schwankungen auch in der Praxis vorkommen und die Werte nahe am Grenzwert lagen, wurde die Charge trotzdem für die Feuerungsversuche als „worst case“ hinsichtlich des Aschegehalts verwendet. Der Aschegehalt des ersten Erlensortiments lag mit über 2 m-% deutlich zu hoch und wurde verworfen. Die Elementaranalyse dieses Sortiments legte eine mineralische Kontamination mit Erdboden nahe. Das zweite Erlensortiment lag mit 0,46 m-% in einem eher niedrigen Bereich und wurde für die Pelletierung verwendet. Der Aschegehalt der additivierten Fichtepellets lag zwischen 0,59 m-% (Ca/K 1) und 0,75 m-% (Si/K 1). Damit lag das Sortiment Fichte Si/K1 wie die Buche knapp oberhalb des Grenzwerts für A1-Pellets. Der Karbonatanteil der Brennstoffaschen lag zwischen 11 und 21 % und der feuerungstechnisch relevantere karbonatfreie Aschegehalt damit zwischen 0,32 m-% (Fichte) und 98 m-% (Buche).

Sowohl der Feinanteil < 3,15 mm als auch der neu eingeführte grobe Feinanteil < 5,6 mm lagen durchweg bei sehr niedrigen Werten < 0,5 m-% und erfüllten daher leicht den Grenzwert für Sackware (ENplus). Die mechanische Festigkeit der Fichtenpellets lag trotz hohem Aufwand und vielen Vorversuchen mit unterschiedlichen Matrizenstärken teilweise knapp unter den ENplus-A1-Vorgaben von 98 %. Als Grund wird eine längere Ablagerung der Sägespäne (Winterlager) bei der Pelletieranlage, von der der Rohstoff zur Verfügung gestellt wurde, vermutet. Zudem wurde bei der Herstellung der Pellets bewusst auf die Zugabe von Bindemitteln verzichtet, um mögliche Einflüsse des Bindemittels auf Emissionen oder Ascheschmelzverhalten auszuschließen. Auch bei den Birkenpellets konnte aufgrund der Faserstruktur nur eine mechanische Festigkeit von 97,8 % erreicht werden.

Durch Einstellung der Abbruchvorrichtung an der Pelletieranlage konnte eine Abstufung der mittleren Pelletlänge erreicht werden. Dennoch fielen die meisten Pellets, die zur Untersuchung der Pelletlängenverteilung verwendet wurden, in die Kategorie L nach ENplus. Allerdings scheint dies auch stark von der Messmethode der Pelletlänge abhängig zu sein (siehe Abschnitt c, Pelletlängenmessung), und die derzeit gesetzten Längenabstufungen erschienen nicht effektiv gewählt.

Hinsichtlich der inhaltsstofflichen Analyse lagen die Summen der aerosolbildenden Elemente der Holzarten zwischen 336 mg/kg (Kiefer) und 1503 mg/kg (Buche) und zwischen 490 mg/kg und 1450 mg/kg für die additivierten Fichtensortimente. Dementsprechend ist nach inhaltsstofflicher Analyse für die Sortimente Buche, Fichte/Buche und Fichte Ca/K 2 mit erhöhten Staubemissionen zu rechnen. Bei Kiefer und dem additivierten Sortiment Fichte Si/K 1 lagen erhöhte Si/K Verhältnisse von 1,47 und 1,75 vor und es ist mit einer vermehrten Einlagerung von K in die Asche sowie mit einem erhöhten Risiko zur Verschlackung zu rechnen. Erle wies baumartentypisch mit 0,21 m-% den höchsten Stickstoffgehalt auf, während die restlichen Sortimente zwischen 0,06 m-% (Kiefer) und 0,10 m-% (Buche) lagen.

Insgesamt spiegelten die hergestellten Sortimente aus den reinen Holzarten die typischen Schwankungen am Markt verglichen mit dem Pelletscreening aus FuturePelletSpec1 gut wider. Die leichten Grenzwertüberschreitungen im Aschegehalt für Buche und der mechanischen Festigkeit für Fichte und Birke decken sich ebenfalls mit den Daten aus dem Pelletscreening aus FuturePelletSpec 1. Die additivierten Fichtensortimente trafen dabei die Eckpunkte der Brennstoffe hinsichtlich Si/K-Verhältnis, Ca/K-Verhältnis und Summe der aerosolbildenden Elemente ebenfalls sehr gut.

Als Referenzbrennstoff für den Vergleich der Feuerungen bei Nenn- und Teillast, sowie im beReal Zyklus wurden ENplus A1 Pellets der Marke Power Pellets aus dem Vorgängerprojekt FuturePelletSpec 1 verwendet. Die gewählten Pellets lagen damals unter 28 Sortimenten bei allen nach ENplus limitierten Brennstoffparametern im mittleren bis niedrigen Bereich und waren zu Projektbeginn noch in ausreichender Menge vorhanden. Auch bei den Pelletlängen lagen die Referenzpellets im Bereich der mittleren Fichte und Buche und passten damit gut in den Vergleich (siehe Tabelle 5).

c) Screening geeigneter Schnellbestimmungsmethoden

Nahinfrarot Spectroskopie – NIR

In Teil 1 des Projekts wurde bereits mittels NIR der Hartholzanteil der Pellets bestimmt [4]. Dieser wies eine signifikante Korrelation mit dem Kaliumgehalt der untersuchten Pelletsortimente und damit auch indirekt mit den Staubemissionen auf. Die Untersuchungen im Teil 1 erfolgten in Kooperation mit den Kollegen der Università Politecnica delle Marche in Italien, die in diesem Bereich bereits viele Veröffentlichungen und robuste Modelle rund um die Verwendung von NIR bei der Charakterisierung von Biomasse verwenden [13–20]. Während der Projektlaufzeit von Teil 1 wurden auch am DBFZ vielversprechende Untersuchungen zur Bestimmung des Kaliumgehalts in Biomasseproben durchgeführt und veröffentlicht [21, 22]. Da sich der Kaliumgehalt in den Pellets in Teil 1 des Projekts als der Brennstoffparameter mit dem größten Einfluss auf die Feinstaubemissionen herausstellte, wurde entschieden, den Ansatz des DBFZ zur Schnellbestimmung des Kaliumgehalts mittels NIR weiterzuverfolgen. Hierzu wurden ein hochpreisiges table top Gerät (Perkin Elmer DA 7250, > 60.000 €) aus dem Bereich der Lebensmittelindustrie und ein günstiges hand held Gerät (Texas Instruments DLP NIRscan Nano EVM, ca. 1.000 €) für Entwickler getestet (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Verwendete NIR-Geräte zur Schnellbestimmung des Kaliumgehalts. Perkin Elmer DA 7250 (links) und Texas Instruments DLP NIRscan Nano EVM (rechts)

Beide Geräte verfügen über eine Software zum Aufzeichnen der Spektren und zum Export der Daten. Beim Perkin Elmer Gerät besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Spektren direkt in der Software mittels der vom Hersteller bereits hinterlegten Modelle auszuwerten. Da das Gerät von Perkin Elmer bereits teilweise in der Pelletindustrie in Skandinavien eingesetzt wird, lagen zum Zeitpunkt der Tests auch schon voreingestellte Modelle für die Parameter Wassergehalt, Aschegehalt, Schüttdichte, Pelletlänge und Stärkegehalt in den Pellets vor. Beim Texas Instruments Gerät ist die Software dagegen sehr rudimentär und erlaubt lediglich einen Blick auf das Spektrum sowie die Exportfunktion. Die wichtigsten technischen Daten beider Geräte sind in Tabelle 7 aufgeführt. Beide Geräte arbeiten in einem ähnlichen, für NIR typischen Wellenlängenbereich, wobei der Wellenlängenbereich des Texas Instruments Geräts etwas größer ausfällt. Der Sensor des teureren Perkin Elmer Geräts weist eine sehr hohe optische Auflösung auf, während diese beim günstigeren Texas Instruments Gerät deutlich eingeschränkt ist. Das Perkin Elmer Gerät führt zur Erhöhung der Genauigkeit automatisch eine Netzmessung über die zu untersuchende Probe durch. Dazu wird der Probenteller, in dem sich die Probe befindet, automatisch einmal um 360° gedreht und dabei 10 Einzelmessungen durchgeführt. Das ausgegebene Ergebnis ist immer ein Mittelwert über 10 Einzelmessungen. Eine komplette Messung (10 Einzelmessungen) dauert 6 s. Beim Texas Instruments Gerät muss aufgrund der wesentlich schwächeren Strahlungsquelle der Sensor direkten Kontakt mit der Probe haben. Das Gerät führt bei Betätigung des Auslösers eine Einzelmessung durch und gibt das Spektrum der Einzelmessung aus.

Tabelle 7: Wichtigste technische Daten der verwendeten NIR-Messgeräte

Gerät	Unterstützte Wellenlängen	Optische Auflösung	Durchführung Messung
Perkin Elmer DA 7250	950 – 1650 nm	< 0,05 nm	10 Messungen bei rotierendem Probeteller
Texas Instruments DLP NIRscan Nano EVM	900 – 1700 nm	10 nm	Einzelmessung

Als Datenbasis für die spätere Modellentwicklung und Evaluierung wurden alle am TFZ verfügbaren Pelletrückstellproben gesammelt (Tabelle 8). Insgesamt wurden 77 markterhältliche Pelletsortimente und 47 Versuchspellets aus eigener Herstellung am TFZ untersucht. Für alle untersuchten Proben lagen dem TFZ vollständige inhaltsstoffliche Analysen von akreditierten Laboren vor sowie die Analyse aller physikalischen Parameter im TFZ-eigenen Labor. Bei Werten der Elementaranalyse, die unter der Nachweisgrenze des Labors lagen, wurde für die Berechnungen die halbe Nachweisgrenze als Wert angenommen. Dies ist in der Praxis eine übliche Vorgehensweise. Der Fokus lag hierbei auf typischen Holzpellets. Agrarbrennstoffe wurden zwar auch untersucht, aber in der Auswertung, wegen der im Vergleich zu genormten Holzpellets wesentlich höheren Aschegehalte und damit auch Gehalten an aerosolbildenden Elementen nicht berücksichtigt. Die Proben wurden jeweils in pelletierter und in gemahlener Form untersucht. Die Untersuchung der gemahlenden Proben erfolgte im Wesentlichen, weil auch die Elementaranalyse an gemahlenden Proben durchgeführt wird und hier durch den Mahlvorgang eine Homogenere Verteilung der Elementgehalte zu erwarten ist.

Tabelle 8: Übersicht der verwendeten Pelletproben und der zugehörigen Projekte

Pelletsortiment	Anzahl	Projekte
Marktpellets ENplus A1	77	beReal, FuturePelletSpec 1,
Versuchspellets (nur Holz)	47	FuturePelletSpec 1, FuturePelletSpec 2, QuasiHolz [23], Innofuels [24], BioFlex [25]

Die Messung erfolgte bei dem Perkin Elmer Messgerät in den vom Hersteller bereitgestellten größeren Polypropylen-Schalen für die Proben in pelletierter Form sowie in einer etwas kleineren PTFE-Schale für die gemahlenden Proben. Die Messungen mit dem Texas Instruments Gerät erfolgten in handelsüblichen Laborpetrischalen aus Borosilicatglas (Abbildung 7, rechts). Die Schalen wurden jeweils mit Pellets bzw. gemahlener Probe vollständig gefüllt und anschließend mit einem Lineal plan abgezogen um immer eine vergleichbare Oberfläche zu gewährleisten. Anschließend wurden mit dem Perkin Elmer Messgerät jeweils 3 Messungen pro Probe durchgeführt und mit dem Texas Instruments Gerät mit einer Schablone 10 Einzelmessungen gleichmäßig über die Petrischale verteilt durchgeführt. Die Spektren wurden anschließend bei beiden Geräten als csv Dateil exportiert.

Für die Auswertung der Spektren wurde eine Auswerterroutine in Python (v2025.8.0) programmiert. Als Quellcode-Editor wurde Microsoft Visual Studio Code verwendet. Bei den verwendeten statistischen bzw. mathematischen Modellen konnte auf für Python verfügbare, vorgefertigte Pakete zurückgegriffen werden. Die Vorgehensweise bei der Datenauswertung und Modellwahl orientierte sich im Wesentlichen an der vom DBFZ veröffentlichten Vorgehensweise [21, 22]. Während der Datenauswertung erfolgte zudem ein enger Austausch mit den zuständigen Wissenschaftlern des DBFZ. Im Folgenden wird der Ablauf der Datenauswertung vom Einlesen der Daten bis zur Ausgabe der Ergebnisse stichpunktartig erläutert. Eine genauere Beschreibung der Modelle findet sich in der Veröffentlichung des DBFZ [22].

1. Einlesen der Spektraldaten (csv Dateil) beider Messgeräte
 - a. Einlesen, Duplikate und leere Zeilen entfernen
 - b. Speichern der Daten als xlsx Datei
 - c. Filtern der Spektraldaten nach Pellets und gemahlenden Proben
 - d. Zuordnung der Laboranalysen (Referenz) anhand der jeweiligen Brennstoffnummern
 - e. Zufällige Durchmischung der Datensätze, um effekte durch feste Reihenfolge auszuschließen
 - f. Abspeichern der kombinierten Datensätze (Spektraldaten + Referenzanalysen) als xlsx separat für Pellets und gemahlene Proben.
 - g. Manuelle Überprüfung der Daten, evtl. manuelle Korrektur
2. Durchführen einer Principal Component Analyse (PCA): Methode zur Reduktion der Dimensionalität von Daten
 - a. Zentrierung: Subtraktion Mittelwert
 - b. Erstellung Kovarianzmatrix und Berechnung Eigenwerte und -vektoren
 - c. Sortierung (Identifizierung der Hauptkomponenten)

- d. Projektion der Daten auf die Hauptkomponenten
 - i. weniger Dimensionen, Darstellung mit weniger Variablen, Informationserhalt → bessere Vorhersagen
 - ii. Erkennung von Mustern/Zusammenhängen bei Laborproben
3. Reduktion der Dimensionalität von Daten (PLSR) und Kreuzvalidierung für jeden einzelnen Wert (LOOCV)
 - a. Zentrierung und Skalierung der Daten
 - b. Berechnung von latenten Variablen (Faktoren)
 - c. Konstruktion eines Regressionsmodells zwischen Latent- und Zielvariablen
 - d. Optimierung durch Minimierung der quadratischen Abweichung zwischen tatsächlichen und vorhergesagten Werten
 - e. Vorhersage durch Anwendung der Latent-Variablen-Koeffizienten auf Spektren neuer Proben
4. Vorhersage der jeweiligen Brennstoffparameter mittels PLSR und k-fold Cross-Validierung
 - a. Partial Least Square Regression (PLSR)
 - i. Bestimmung von Skewness und Kurtosis
 - ii. Ggf. Angleichung in Richtung Normalverteilung bei rechtsschiefen Verteilungen
 - iii. Ggf. Entfernen von statistischen Ausreißern
 - iv. Ausgabe von Histogrammen
 - v. Abruf der besten Vorbehandlungsmethode und der optimalen Anzahl an Komponenten
 - vi. Vorbehandlung der Spektren
 - vii. Ausgabe von Rohspektren
 - viii. Durchführung von 100 Wiederholungen
 - ix. Zufällige durchmischung der Probenreihenfolge pro Wiederholung
 - x. Training des PLSR-Modells mit allen Spektren und Laborwerten
 - xi. Vorhersage der Laborwerte
 - b. K-fold Cross-Validierung
 - i. Unterteilung der Labordaten in k Teile
 - ii. Training des Modells mit k-1 Teilen
 - iii. Vorhersage der Werte des verbleibenden Teils
 - iv. K Wiederholungen
 - c. Ausgaben für Kalibrierung und Validierung
 - i. Bestimmtheitsmaß R^2
 - ii. Standardschätzfehler RMSE
 - iii. Ratio of performance to deviation (RPD = Standardabweichung (Labordaten) / Standardabweichung (Residuen))
 - iv. Ratio of Performance to inter-quartile (RPIQ = (q3, Labordaten – q1, Labordaten) / Standardabweichung (Vorhersage))
 - d. Bildung von Mittelwert und Standardabweichung der Scoredaten
 - e. Ausgabe von Scatterplots

Verwendete Quellen: [22, 21, 20, 14, 17]

<https://nirpyresearch.com/principal-component-regression-python/>

<https://nirpyresearch.com/partial-least-squares-regression-python/>

<https://nirpyresearch.com/classification-nir-spectra-principal-component-analysis-python/>

Im Folgenden wird exemplarisch im Detail nur auf die Ergebnisse der NIR-Vorhersagen zum Kaliumgehalt in pelletierter Form eingegangen, da dies die Hauptzielgröße im Projekt war. Diese Untersuchung dürfte auch in der Praxis die größte Rolle spielen, wobei direkt im Pelletierprozess auch die Anwendung auf das gemahlene Ausgangsmaterial einen interessanten Anwendungsfall darstellen dürfte. Abbildung 8 zeigt den Scatterplot zur Vorhersage des Kaliumwerts für Pellets des Perkin Elmer Messgeräts. Unter Einbeziehung aller Proben in die Kalibrierung beträgt das R^2 (calib) 0,53. Berücksichtigt man die k-fold Cross-Validierung beträgt das R^2 (cross) nur noch 0,38. Dies stellt ein eher schwaches Bestimmtheitsmaß für die Vorhersage der Kaliumgehalte dar.

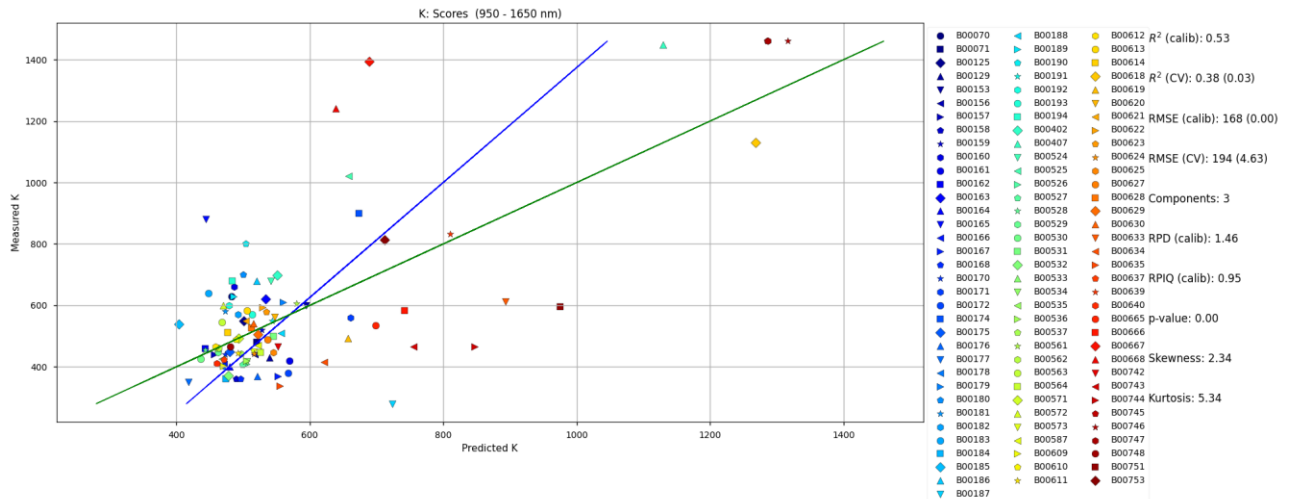


Abbildung 8: Scatterplot der vorhergesagten Kaliumgehalte in mg/kg (d) mittels NIR-Messung und PLSR gegenüber den Labordaten aus der Elementaranalyse für das Perkin Elmer DA 7250 (blau: Regressionsgerade, grün: 1:1-Linie)

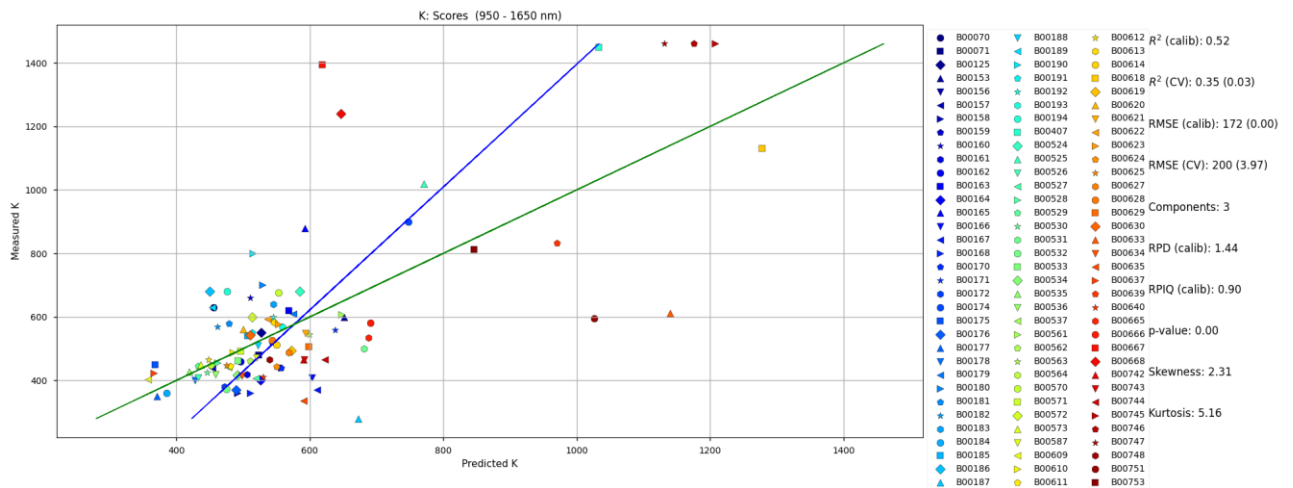


Abbildung 9: Scatterplot der vorhergesagten Kaliumgehalte in mg/kg (d) mittels NIR-Messung und PLSR gegenüber den Labordaten aus der Elementaranalyse für das Texas Instruments DLP NIRscan Nano EVM (blau: Regressionsgerade, grün: 1:1-Linie)

Für das wesentlich günstigere Texas Instruments Gerät (Abbildung 9) liegt R^2 (calib) bei 0,52 und R^2 (cross) bei 0,35. Die Ergebnisse hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit unterscheiden sich also zischen den beiden Geräten kaum. Dies deckt sich auch für die Bestimmtheitsmaße der anderen untersuchten Brennstoffparameter (Tabelle 9). Die Vorhersagegenauigkeit des Summenparameters der aerosolbildenden Elemente (K, Na, Pb, Zn) liegt vom Bestimmtheitsmaß her auf einem ähnlichen Niveau wie der für Kalium. Auch für den Aschegehalt wird ein ähnliches Bestimmtheitsmaß erreicht. Bessere Vorhersagegenauigkeiten ergaben sich dagegen für den Heizwert und den Wassergehalt. Hier unterschieden sich auch die beiden Messgeräte etwas deutlicher. Das Perkin Elmer Gerät kann hier für Pellets mit Bestimmtheitsmaßen in der Cross-Validierung von knapp 0,6 aufwarten, während diese für das Texas Instruments Gerät deutlich niedriger liegen. Bezüglich der Probenaufbereitung (Pellets vs. gemahlen) scheint es keine klaren Vorteile der gemahlene Probe gegenüber der direkten Messung der Pellets zu geben. Dies unterscheidet sich auch noch zwischen den einzelnen Brennstoffparametern. Bei Silizium ist die Vorhersagegenauigkeit mit R^2 (cross) unter 0,2 nicht erwähnenswert und deckt sich mit den Erkenntnissen aus dem Projekt EBA-Holz [26].

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße der Vorhersage der untersuchten Brennstoffparameter im Vergleich zu den Laboranalysen für die beiden NIR-Messgeräte für gemahlene und pelletierte Brennstoffproben.

Parameter	Perkin Elmer Pellets		Perkin Elmer gemahlen		Texas Instruments Pellets		Texas Instruments gemahlen	
	R ² (calib)	R ² (cross)	R ² (calib)	R ² (cross)	R ² (calib)	R ² (cross)	R ² (calib)	R ² (cross)
K	0,53	0,38	0,47	0,25	0,52	0,35	0,56	0,33
∑ (K, Na, Pb; Zn)	0,51	0,36	0,65	0,41	0,48	0,29	0,44	0,25
Aschegehalt	0,45	0,27	0,29	0,14	0,42	0,16	0,73	0,17
Wassergehalt	0,67	0,58	0,46	0,2	0,51	0,23	0,81	0,21
Heizwert	0,63	0,56	0,79	0,43	0,65	0,48	0,39	0,26
Si	0,36	0,16	0,41	0,2	0,27	0,08	0,34	0,05

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vorhersagegenauigkeit für K, die Summe der aerosolbildenden Element und den Aschegehalt bei den hier verwendeten Vorhersagemodellen und Datenaufbereitungen noch nicht zufriedenstellend war, um eine ausreichend genaue Vorhersage der Laborwerte zu gewährleisten. Allerdings muss dazu bedacht werden, dass auch die heutigen Analyseverfahren, die hier als Referenz verwendet wurden, durchaus Ungenauigkeiten im Bereich von $\pm 15\%$ vom Messwert und mehr aufweisen können. Dies wiederum beeinflusst auch die Vorhersagegenauigkeit der Modelle. Beim Wassergehalt und Heizwert sind die erzielten Ergebnisse dagegen heute schon vielversprechend. Ebenfalls lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die Qualität der Ergebnisse im Wesentlichen von den verwendeten Modellen sowie der Datenvorbehandlung abhängt. Es ist also auch möglich, gute Ergebnisse mit günstigen Sensoren zu erzielen. Aus den hier durchgeführten Arbeiten ließen sich in Absprache mit dem DBFZ zudem noch Optimierungsansätze ableiten, die im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr getestet werden konnten:

- Optimierung der Vorbehandlungsmethode (andere Kombination von Methoden, Änderung Parameter SavGol-Filter: Window length, derivative, Polyorder),
- Erweiterung Wertebereich Laborparameter (größere Spanne, nicht nur einzelne Extremwerte)
- Entfernung der Werte unterhalb der Nachweisgrenze bzw. bessere Labordaten (teuer)
- Bei allen Parametern:
 - Angleichung der Datenform an eine Normalverteilung
 - Entfernung unplausibler und bimodaler Daten (Häufigkeitsverteilung) (genauere Betrachtung der Verteilung und Identifizierung und Beseitigung von Auffälligkeiten. Eventuelle zweite Peaks (bimodal) sollten generell entfernt werden)
 - Untersuchung der Korrelationen bzw. auf Multikollinearität (Korrelationsmatrix) (Entweder direkte Betrachtung der Korrelationsmatrizen oder über Varianzinflationsfaktor) → Multikollinearität schwächt das Modell
 - Residualanalyse (bestimmte Muster)

Weitere Maßnahmen auf Prozessebene:

- Andere Cross-Validation Strategie (Verhältnis der Aufteilung in Test- und Validierungsdatensatz)
- Gleiche Cross-Validierung bei Pretest (LOOCV) und PLSR (PLSR) (→ evtl. erster Ansatz, mit wenig Aufwand zu machen. Beide LOOCV oder beide k-fold.)
- Alternative Modelle (Recursive Feature Elimination, Random Forest, Support Vector Machines, Neural Networks...)

Aus aktueller Sicht und in anbetracht der sich gerade enorm schnell entwickelnden Ansätze mit künstlicher Intelligenz sollte die NIR-Technologie im Bereich der Brennstoffcharakterisierung in jedem Fall weiterverfolgt werden. Für gröbere Abschätzungen wie z.B. einen Ausschluss zu hoher Kaliumgehalte oder Aschegehalte z.B. im Rahmen einer produktionsinternen Qualitätskontrolle, wäre ein Einsatz unter Einbeziehung der genannten Optimierungsmaßnahmen heute schon denkbar.

Methodenvergleich Pelletlängenmessung

Im Projekt wurde parallel an der Überarbeitung der Referenzmethode zur Bestimmung der Pelletlänge (ISO 17829:2024-10 [27]) und an der Evaluierung von zwei marktverfügbaren Schnellbestimmungsmethoden unter Berücksichtigung der neu überarbeiteten Referenzmethode gearbeitet. Der Entwurf der überarbeiteten ISO-Norm zur Messung der Pelletlänge wurde bereits im Oktober 2024 veröffentlicht. Die hier dargestellten Hintergrunddaten zur Überarbeitung der Referenzmethode wurden auf der EUBCE 2025 in Valencia präsentiert und werden mit den Proceedings in englischer Sprache veröffentlicht.

Referenzmethode (ISO 17829:2024-10)

Ziel der Untersuchungen im Projekt war es, nützliche experimentelle Daten für die Überarbeitung und Verbesserung der ISO 17829: „Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets“ [28] zu liefern. Dazu sollten, grundlegende messtechnische Daten für die Festlegung der erforderlichen Spezifikationen für die überarbeitete neue Referenzmethode bereitgestellt werden. Die Ziele waren:

- Quantifizierung der Unterschiede in der Pelletlänge, wenn die Länge entweder als Abstand von Mitte zu Mitte oder als Differenz zwischen den Außenkanten eines Pellets (Endpunkte) definiert wird,
- die Auswirkungen der beiden Definitionen der Pelletlänge auf die Anteile der Pellets in verschiedenen Längensklassen, z. B. Pellets über 40 mm oder kürzer als 10 mm, zu bewerten,
- die erforderliche Stichprobengröße für eine ausreichend hohe Messgenauigkeit zu bestimmen,
- die Eignung eines neuartigen Messgeräts zu bewerten, das das derzeit verwendete Handmessgerät zur Bestimmung der Pelletlänge ersetzen soll.

Verwendete Apparturen:

Die neuartige Messapparatur besteht aus einem Messschieber, der fest auf einer speziell entwickelten Grundplatte aus Aluminium oder Stahl montiert ist. In dieser Grundplatte ist eine Nut mit definierten Abmessungen eingearbeitet, in der das zu messende Pellet fest und horizontal positioniert ist. Die Messung erfolgt durch Abtasten der Endpunkte des Pellets mit den Messschenkeln des montierten Messschiebers. An diesen Messschenkeln sind Stifte angebracht, die als Anschlagpunkte dienen. Zur Messung werden sie mit den Messschenkeln gegen die Abbruchkante des Pellets geschoben. Abbildung 10 veranschaulicht das allgemeine Prinzip, hier unter Verwendung von Stiftelementen zur Messung der Pelletlänge von Endpunkt zu Endpunkt.

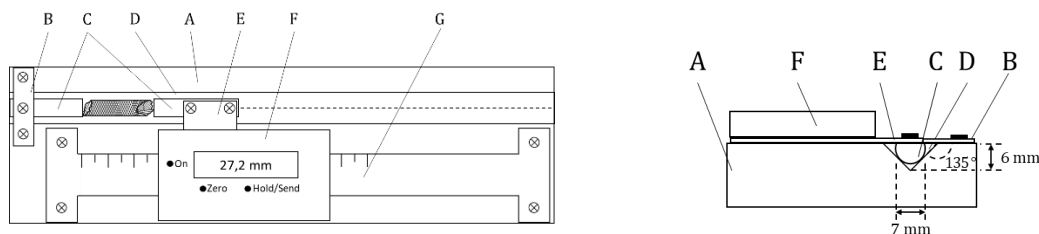


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Messblocks mit eingebautem, digitalem Messdisplay und großen Metallstiften. Legende: A: Metallblock; B: Befestigungsplatte zur Aufnahme des Metallstiftelements; C: Metallstiftelemente mit 7 mm Durchmesser; D: Nut im Metallblock; E: Verbindungsplatte zwischen Metallstiftelement und eingebautem Messschieber; F: digitale Messeinheit des Messschiebers, G: eingebauter Messschieber

Es wurden zwei verschiedene Geräte (Messblöcke, MB) gebaut, die beide dem in Abbildung 10 dargestellten Prinzip folgten und zur Messung beider möglicher Längendefinitionen verwendet wurden: Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt und Abstand zwischen den Außenkanten. Diese Unterscheidung wurde entweder durch die Verwendung von Stiften mit einem Durchmesser von 1 mm (MB1), die auf die Mitte des Pelletdurchmessers zeigen, oder durch die Verwendung von Stiften mit einem Durchmesser von 7 mm, die die Außenkanten des Pellets berühren (MB2), realisiert. Diese beiden Messblöcke wurden nach einem Entwurf der HAWK Göttingen am TFZ gebaut.

Parallel dazu wurde auch ein handelsüblicher Handmessschieber als derzeitige (alte) Referenzmethode eingesetzt. Dieses Instrument wurde so eingesetzt, dass die Länge des Pellets zwischen den Außenkanten bestimmt wurde, so wie es bei der Verwendung von MB2 durchgeführt wird. Abbildung 11 veranschaulicht das schematische Prinzip des Handmessschiebers. Im Folgenden wird diese Methode als MB3 bezeichnet.

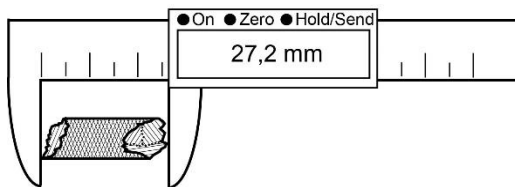


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Verwendung eines Handmessschiebers, Messung über die Außenkanten (MB3).



Abbildung 12: Die allgemeine Funktionsweise eines Messblocks (Foto oben) und die Anordnung der Stifte in den Messblöcken MB1 und MB2 (links und unten).

Die Messung des Durchmessers erfolgte mit einem digitalen Handmessschieber, wie in der ISO-Norm 17829 beschrieben. Im Gegensatz zur Pelletlänge wurde diese Methode bei der Überarbeitung der Norm nicht geändert.

Für die Messkampagne wurde eine breite Variation von 25 verschiedenen Pelletsorten verwendet, die entweder in der TFZ-eigenen Pelletieranlage hergestellt wurden oder direkt vom Markt bezogen wurden. Die meisten Pellets stammten dabei aus FuturePelletSpec 1 oder 2. Zwölf Pelletstypen wurden am TFZ intensiver untersucht und auch in den Verbrennungsversuchen eingesetzt. Die meisten davon wurden in der TFZ-eigenen Pelletanlage hergestellt; sie sind in Tabelle 10 als „Versuchsbrennstoff“ aufgeführt. Acht weitere Pelletstypen mit einem Durchmesser von jeweils 6 mm wurden nach dem Zufallsprinzip vom deutschen Pelletmarkt beschafft, sie stammen von acht verschiedenen Herstellern (FuturePelletSpec 1). Diese Pellets sind als „Marktauswahl“-Sortiment in Tabelle 10 aufgeführt. Zusätzlich wurde eine Auswahl von fünf typischen Pelletsorten von einem PelletsHersteller in Finnland zur Verfügung gestellt, da dort ein Durchmesser von 8 mm üblicher sind als auf dem deutschen Markt (Tabelle 10).

Insgesamt 23 der 25 Pelletstypen wurden aus Holzmaterial (Fichten-, Birken- und Buchenholz) hergestellt, zwei aus nicht-holzigen Material (Getreidestroh und Sonnenblumenspelzen). Sieben der Holzpelletproben der „Versuchsbrennstoffe“ konnten einer der drei verfügbaren Größenklassen nach ENplus-Spezifikation zugeordnet werden: S, M, L (für kleine, mittlere und große Pelletlängen). Diese Klassen sind durch den Anteil an kurzen Pellets unter 10 mm Länge definiert (siehe Abschnitt b). Die Proben stammten aus zwei verschiedenen Pelletierverfahren (11 x Flachmatrize, 14 x Ringmatrize), und es wurden zwei verschiedene Pelletdurchmesser verwendet (20 x 6 mm Durchmesser und 5 x 8 mm Durchmesser).

Von jedem Pelletsortiment wurde eine Laborprobe von 1600 g entnommen. Diese Probe wurde in Anlehnung an ISO 5370 [9] mit einem Rundlochsieb von 3,15 mm Durchmesser handgeseibt. Der Feinanteil wurde bestimmt und protokolliert. Anschließend wurde eine zweite Handsiebung mit einem Rundlochsieb mit 5,6 mm Lochgröße durchgeführt. Die verbleibenden Pellets mit einem Durchmesser über 5,6 mm wurden geteilt, um eine Unterprobe von 200 g Pellets zu erhalten. Diese Menge wurde weiter in vier gleiche Teilproben von je 50 g aufgeteilt.

Von der ersten der 50-g-Teilproben wurde jede einzelne Pelletlänge in drei aufeinanderfolgenden Messungen ermittelt. Dies geschah immer in der gleichen Reihenfolge: Jedes Pellet wurde zunächst im 1. Messblock (MB1) gemessen, in dem die Mittelpunkt-zu-Mittelpunkt-Messung durchgeführt wurde. Daran schloss sich direkt eine zweite Messung mit dem 2. Messblock (MB2) an, bei der die Länge über die Außenkanten bestimmt wurde. Schließlich wurde in einem dritten Schritt dasselbe Pellet mit dem Handmessschieber gemessen, der ebenfalls im Außenkantenmodus (d. h. ähnlich wie MB2) eingesetzt wurde. Diese dreistufige Messung wurde für jedes Pellet in der ersten 50-g-Teilprobe der Gesamtprobe (200 g) durchgeführt. Von den drei verbleibenden 50-g-Teilproben wurde die Länge der Außenkanten aller Pellets nur mit MB2 bestimmt.

Tabelle 10: Für die Tests verwendetes Pelletsortiment (DU: mechanische Festigkeit nach ISO 17831-1)

Untergruppe	Pelletiertes Material und Variante	Pelletierverfahren (Matrizentyp)	Mechanische Festigkeit DU (m-%)
Versuchspellets	Weizenstroh	Flachmatrize	99.1
	Sonnenblumenspelzen, DU niedrig	Flachmatrize	n.a.
	Fichte S, DU niedrig	Flachmatrize	94.8
	Birke M, DU niedrig	Flachmatrize	97.8
	Buche L	Flachmatrize	99.0
	Buche S	Flachmatrize	98.7
	Fichte L	Flachmatrize	n.a.
	Fichte M	Flachmatrize	n.a.
	Fichte S	Flachmatrize	n.a.
	Fichte L	Ringmatrize	98.7
	Fichte M	Ringmatrize	99.1
	Fichte S	Ringmatrize	98.9
Marktpellets	P1	unbekannt	98,6
	P2	unbekannt	98,7
	P3	Ringmatrize	99,4
	P4	Ringmatrize	99,3
	P5	Ringmatrize	98,3
	P6	Ringmatrize	99,3
	P7	Ringmatrize	98,4
	P8	Ringmatrize	99,3
8mm Pellets	Fichte 1	Flachmatrize	n.a.
	Fichte 2	Flachmatrize	n.a.
	Fichte 3 (gemischt mit Kiefer)	Ringmatrize	n.a.
	Fichte 4	Ringmatrize	n.a.
	Fichte 5	Ringmatrize	n.a.

Wenn die Länge von den Pellets mit 6 mm Durchmesser aus den „Versuchsbrennstoffen“ von Mitte zu Mitte gemessen wurde (MB1), war die durchschnittliche Länge 2,0 mm kürzer als bei der Messung der Außenkanten dieselben Pellets (MB2), wie in Abbildung 13, dargestellt. Maximal betrug der Unterschied 6,1 mm.

Keine signifikanten Unterschiede wurden festgestellt, als die ursprüngliche Methode mit dem Handmessschieber (MB3) mit der neuen MB2-Methode verglichen wurde; die mittlere Differenz über alle 12 Pellet-Typen der „Versuchsbrennstoffe“ betrug nur +0,1 mm (Abbildung 14). Dies deutet darauf hin, dass beide Methoden, MB3 und MB2, je nach Verfügbarkeit der Geräte alternativ verwendet werden können, vorausgesetzt, dass auch bei dem Handmessschieber die Messungen an den Außenkanten durchgeführt werden und das Pellet genau in Messrichtung des Messschiebers ausgerichtet wird.

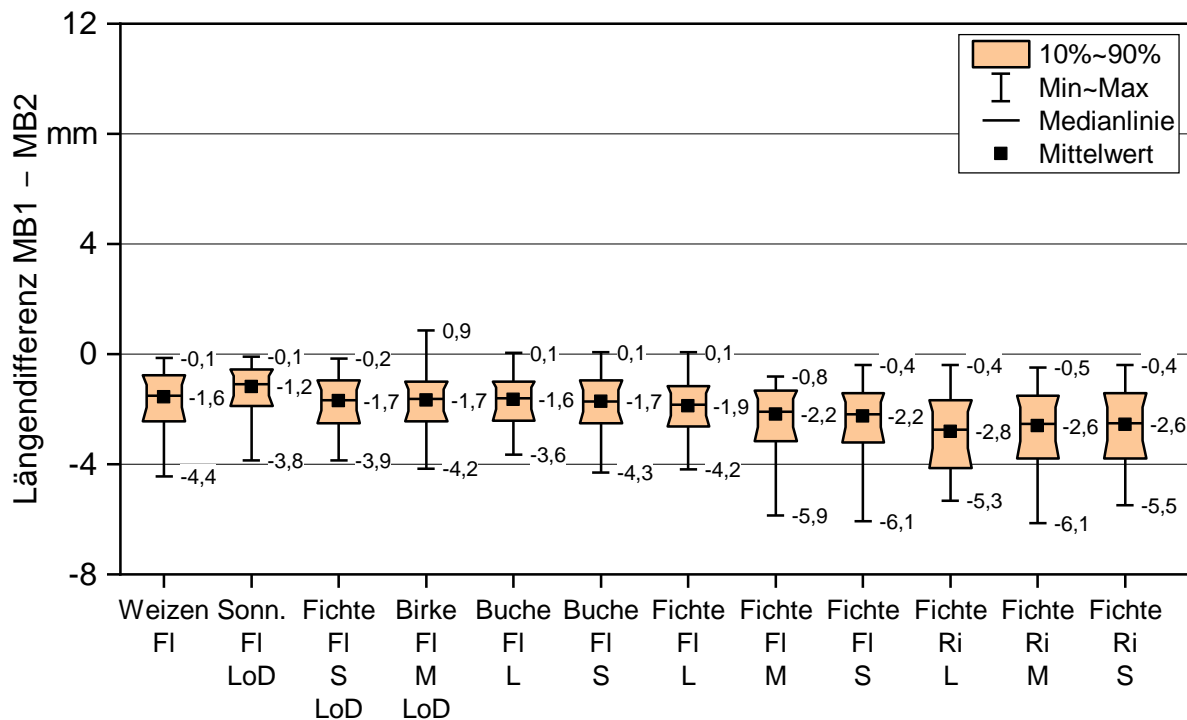


Abbildung 13: Gemessene Längenunterschiede aufgrund von Methodenvariationen, angewandt auf die 6-mm-„Versuchsbrennstoffe“. Differenz zwischen MB1 und MB2. Ri: Ringsmatrize, FI: Flachmatrize. S: kurz, M: mittel, L: lang, LoD: niedrige mechanische Festigkeit

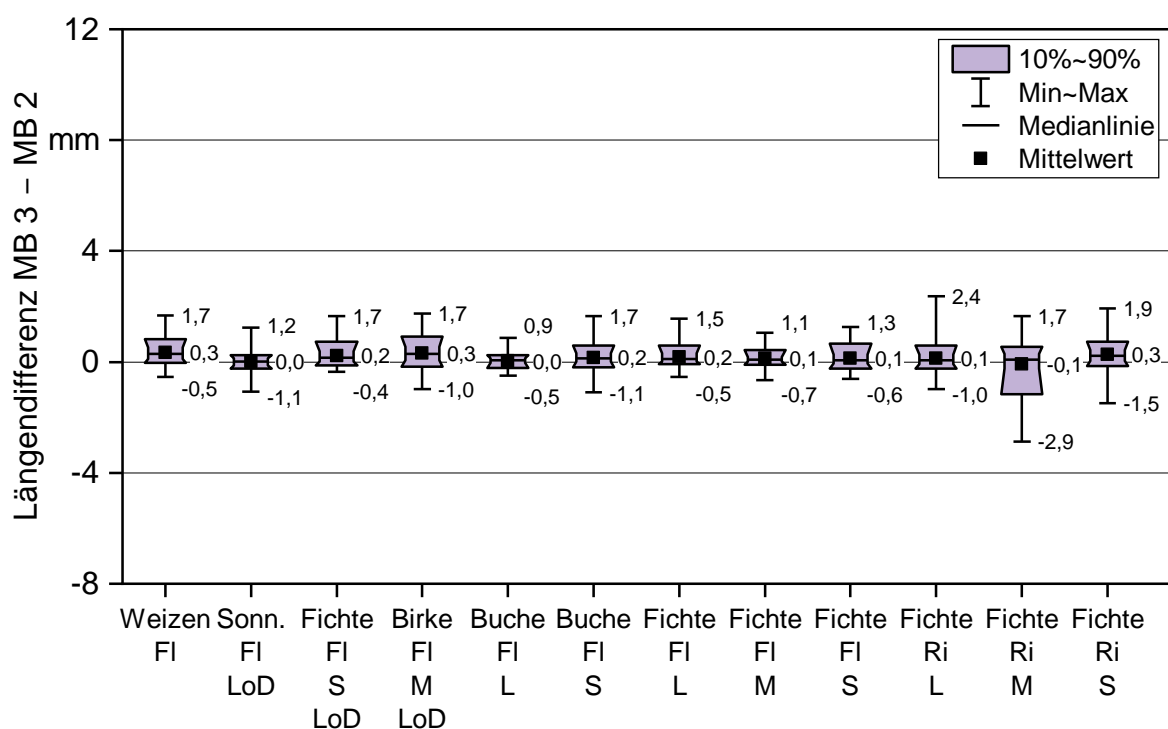


Abbildung 14: Gemessene Längenunterschiede aufgrund von Methodenvariationen, angewandt auf die 6-mm-„Versuchsbrennstoffe“. Differenzen zwischen Handmessschieber (MB3) und MB2. Ri: Ringsmatrize, FI: Flachmatrize. S: kurz, M: mittel, L: lang, LoD: niedrige mechanische Festigkeit

Bei der Bewertung der acht Pelletstypen aus der „Marktauswahl“ (Tabelle 10) nahmen die Längenunterschiede sogar noch zu. Im Durchschnitt war die Messung von Mitte zu Mitte (MB1) um 2,9 mm kürzer als die Außenkantenmessung von MB2. Dies ist in Abbildung 15 dargestellt. Die größte festgestellte Differenz betrug 11,4 mm.

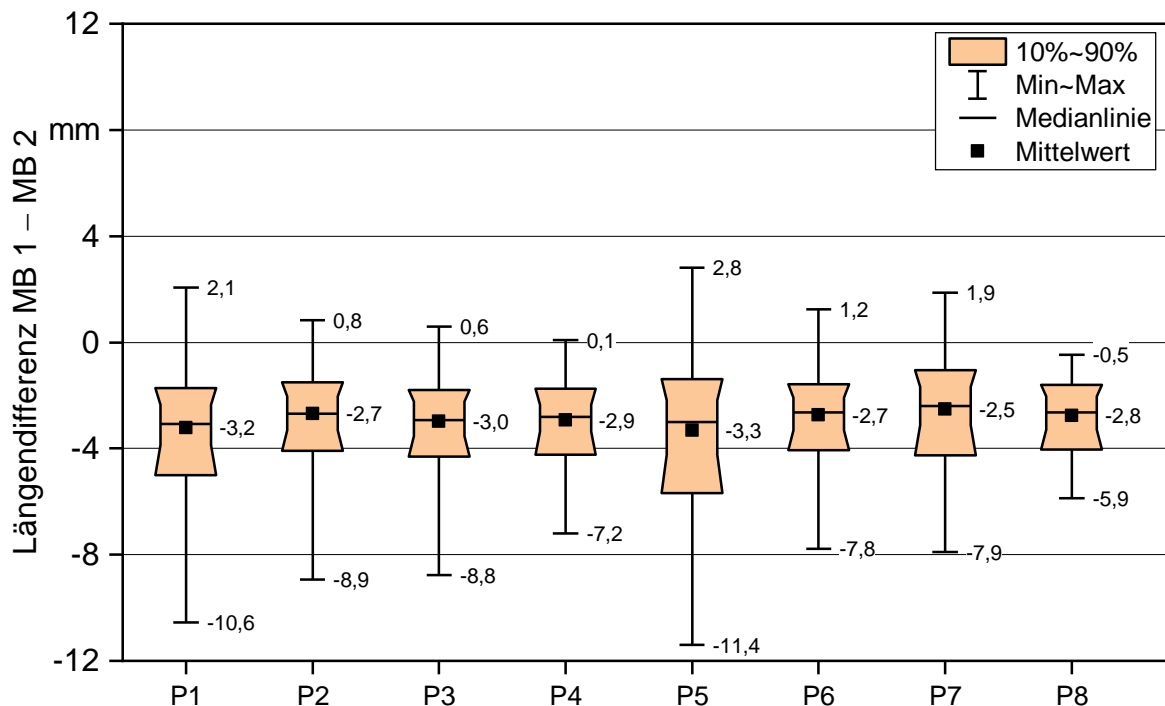


Abbildung 15: Gemessene Längenunterschiede aufgrund von Methodenvariationen, angewandt auf die 6-mm-Marktauswahlsortimente

Bei der Bewertung des Pellet-Sortiments mit 8 mm Durchmesser von Mitte zu Mitte (MB1) war die durchschnittliche Länge 2,9 mm kürzer als bei der Messung der Außenkanten desselben Pellets (MB2), und der größte festgestellte Unterschied betrug 9,4 mm (Abbildung 16).

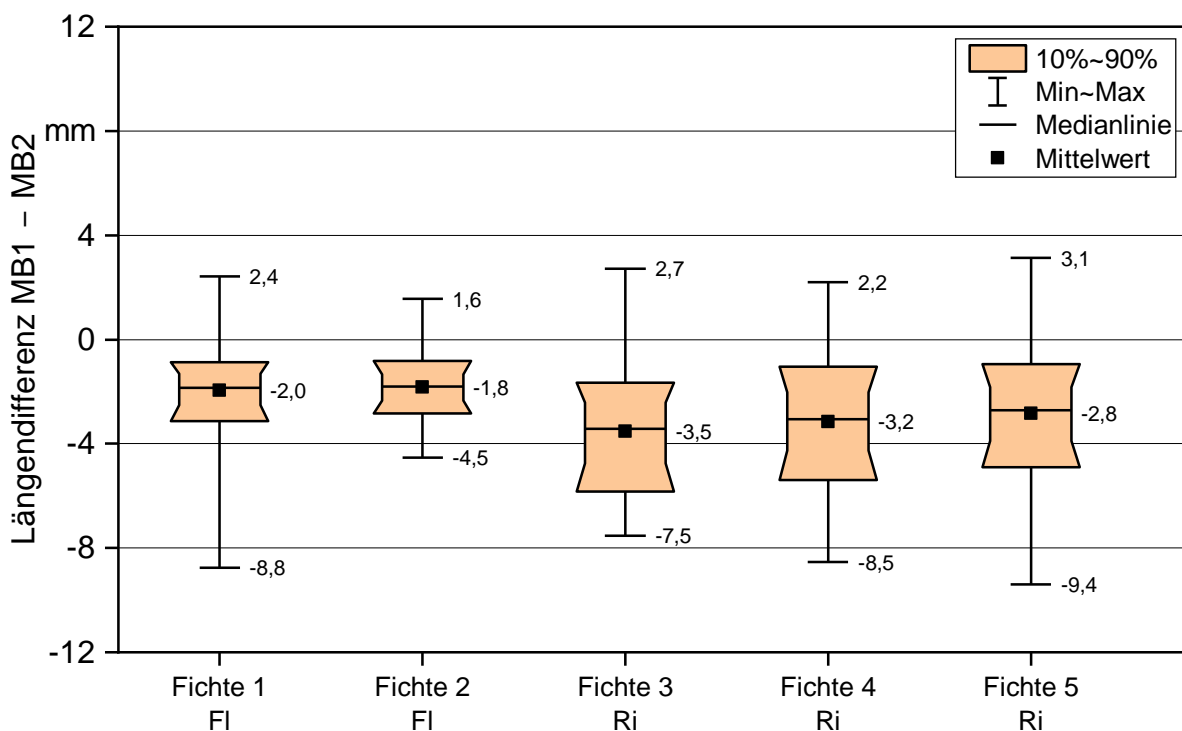


Abbildung 16: Gemessene Längenunterschiede aufgrund von Methodenvariationen, angewandt auf die 8-mm-Pelletsortimente

Beim Vergleich der verschiedenen Herstellungsprinzipien (d. h. Ringmatrizenpresse gegenüber Flachmatrizenpresse) wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Dies ist in Abbildung 17 dargestellt.

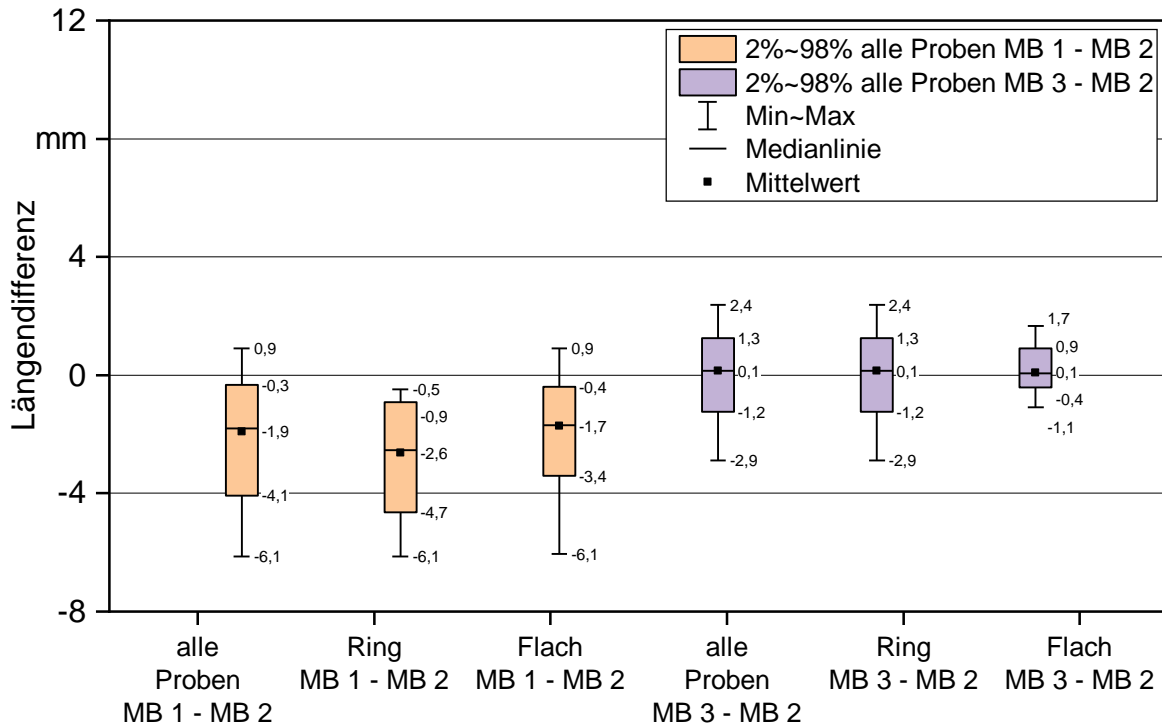
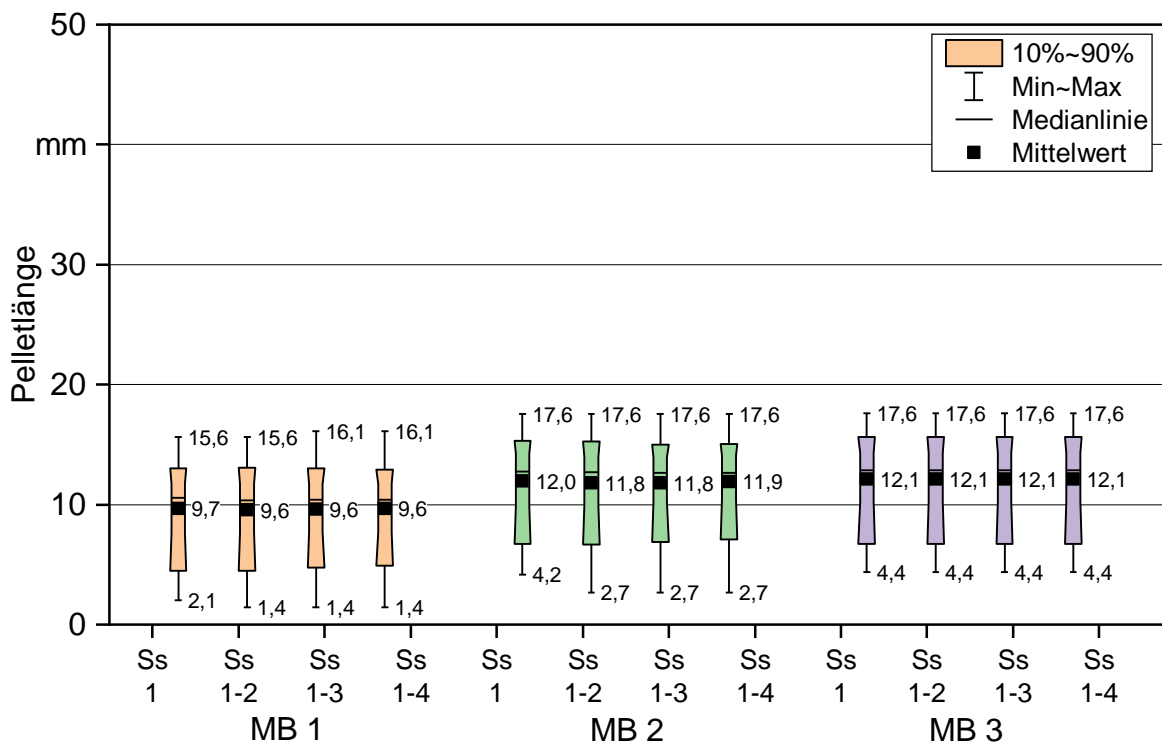


Abbildung 17: Gemessener Längenunterschied aufgrund von Methodenvariationen, differenziert nach dem Pelletierverfahren (Ringmatrize oder Flachmatrize der „Versuchsbrennstoffe“) beim Vergleich von MB2 zu MB1 (Mitte zu Mitte) und MB3 (Handmessschieber).

Die Verwendung eines größeren Stichprobenumfangs bei der Bestimmung verbessert immer die Repräsentativität und die Aussagekraft einer Pelletlängenbestimmung. Dies zeigt Abbildung 18, in der die Ergebnisse für die erste der vier 50 g-Teilproben mit einer Kombination aus zwei, drei bzw. vier Teilproben verglichen werden. Es werden also die mittleren Pelletlängen von 50 g mit denen von 100 g, 150 g und 200 g Probenmaterial verglichen. Im Ergebnis werden die Unterschiede mit zunehmender Probengröße kleiner und zwischen 150 und 200 g kaum noch sichtbar.

Die ausgewählten Ergebnisse in Abbildung 18 zeigen auch den Effekt für kurze, mittelgroße und längere Pelletsortimente (obere, mittlere und untere Grafik).



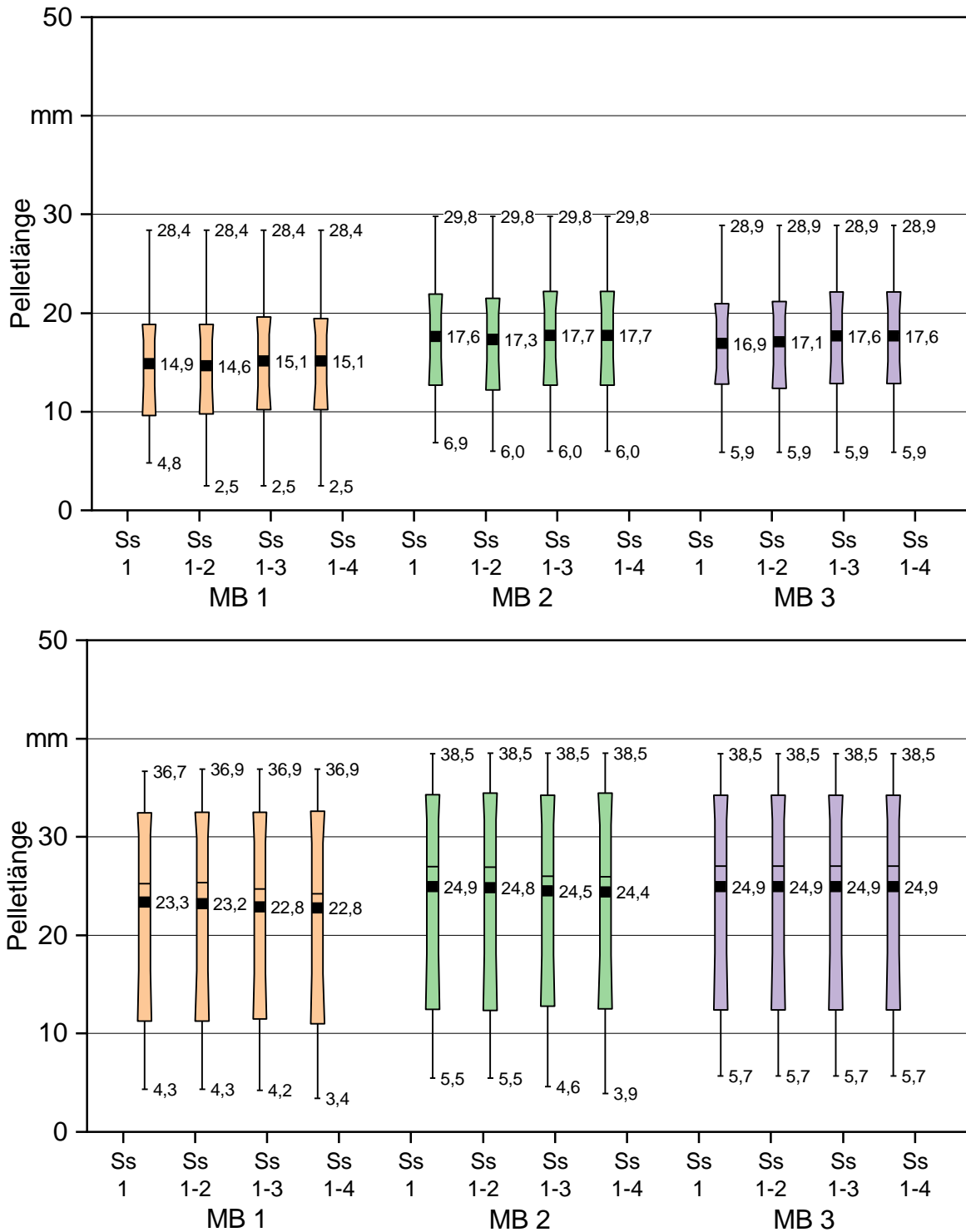


Abbildung 18: Mittlere Pelletlängen, ermittelt entweder mit einer 50-g-Teilprobe (Sub sample 1; Ss1) oder durch Kombination von zwei, drei oder vier der vier 50-g-Teilproben (Ss1-2, Ss1-3 oder Ss1-4), unter Verwendung der drei Messmethoden mit entweder kurzen (S), mittleren (M) oder langen (L) Pellets (obere, mittlere und untere Grafik).

Für die Bewertung von Laborversuchen kann die Abweichung zwischen mehreren wiederholten Messungen von Teilproben von Bedeutung sein. Daher sind in Abbildung 18 einige Einzelergebnisse bei viermaliger Wiederholung einer Messung von 50 g Teilproben aufgeführt. Für 6-mm-Pellets lagen die Variationskoeffizienten zwischen 1,5 und 3,6 %, und die meisten Werte für 8-mm-Pellets lagen zwischen 2,5 und 5,0 %. Höhere Werte von 15,6 bzw. 16,7 % wurden nur bei Pellets aus Sägemehl erzielt, die mit einer Flachmatrize pelletiert worden waren.

Tabelle 11: Variabilität der Wiederholungen, differenziert zwischen MB2 und MB3 und für 6 bzw. 8 mm Pelletdurchmesser, für ausgewählte Pelletsorten

Pelletsortiment	Matrizen Typ ¹	Mittlere Pelletlänge in Teilprobe (Ss) und in Gesamtprobe (Total), in mm					CV (%)
		Ss1	Ss2	Ss3	Ss4	Total	
<i>6 mm Pellets, mit MB2:</i>							
Sonnenblumenspelzen	Flach	14,9	13,8	14,0	14,1	14,2	3,4
Fichte, lang	Ring	18,2	18,3	18,9	19,2	18,7	2,6
Fichte, kurz	Ring	12,5	12,4	12,8	12,4	12,5	1,5
<i>6 mm Pellets, mit MB3 (Handmessschieber):</i>							
Sonnenblumenspelzen	Flach	15,0	13,8	14,4	14,1	14,2	3,6
Fichte, lang	Ring	18,3	18,5	19,1	19,4	18,8	2,7
Fichte, kurz	Ring	12,7	12,6	13,1	12,6	12,8	1,7
<i>8 mm Pellets, mit MB2:</i>							
Sägemehl	Flach	14,1	17,2	14,6	19,5	16,0	15,6
Sägemehl	Ring	18,3	18,1	17,2	18,0	18,0	2,7
Fichte & Kiefer	Ring	12,5	13,1	12,8	13,2	12,9	2,5
<i>8 mm Pellets, mit MB3 (Handmessschieber):</i>							
Sägemehl	Flach	13,6	17,0	14,2	19,2	15,6	16,7
Sägemehl	Ring	16,9	16,7	15,9	16,6	16,5	2,6
Fichte & Kiefer	Ring	11,1	11,6	11,7	12,5	11,7	5,0

¹ Ringmatrize oder Flachmatrize zur Herstellung von Pellets. CV ist der Variationskoeffizient der durchschnittlichen Pelletlänge der Teilportionen.

Die Definition der Pelletlänge (d. h. von Mitte zu Mitte – MB1, gegenüber der Länge über die Außenkanten – MB2) kann den Anteil der Überlängen (> 40 mm) erheblich beeinflussen. Daher wurden die verbleibenden 1400 g der ursprünglichen Laborprobe (nachdem sie für die Tests um 200 g reduziert worden waren) von Hand nach Überlängen sortiert, wobei eine Schablone mit Markierungen von 40 mm Länge verwendet wurde. Diejenigen Pellets, die eindeutig nahe an oder länger als 40 mm waren, wurden aussortiert und dann mit der MB1- und anschließend mit der MB2-Methode genau gemessen.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 für die „Versuchsbrennstoffe“ mit 6 mm Durchmesser dargestellt. Die Tatsache, dass eine MB2-Messung im Vergleich zu einer MB1-Bestimmung eine im Durchschnitt um 2 mm größere Pelletlänge misst, führt zu einer überproportionalen Ausweisung des Anteils überlanger Pellets (bis zum Vierfachen). Dies war bei allen drei Proben der Fall, bei denen im Versuchsprogramm Pellets von mehr als 40 mm Länge auftraten.

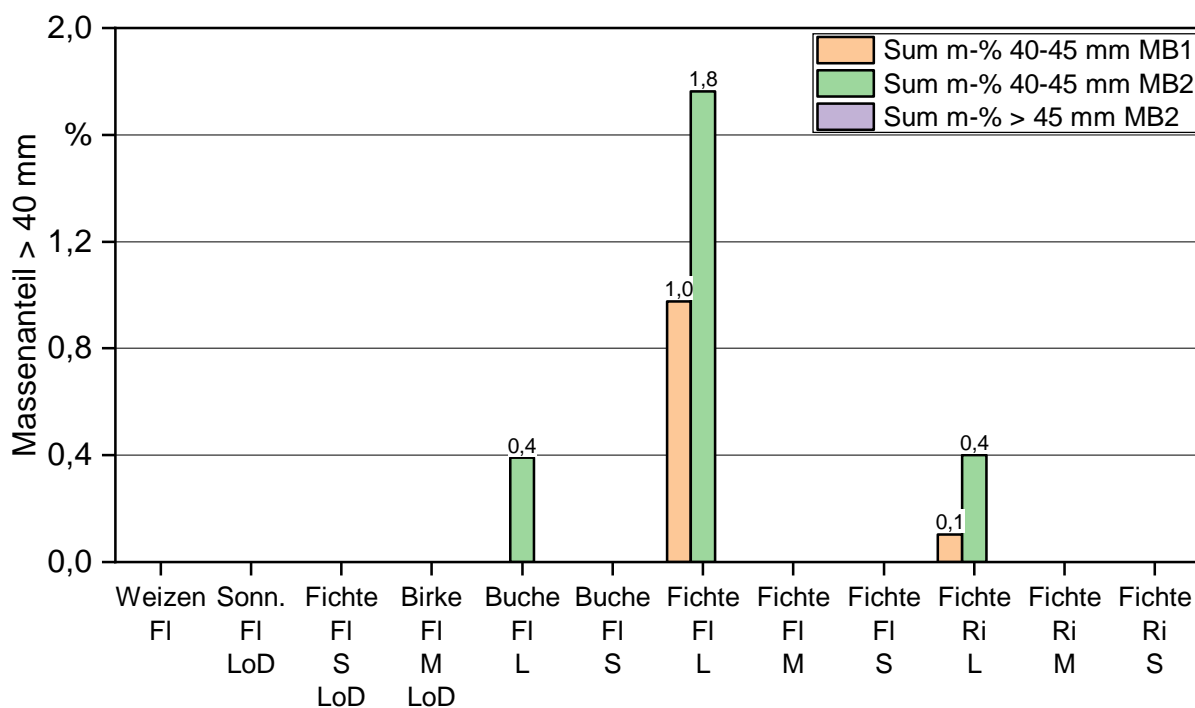


Abbildung 19: Massenanteil der Pellets mit einer Länge zwischen 40 und 45 mm bei Messung mit MB1 (Mitte zu Mitte) oder MB2 (über die Außenkanten). Die Messungen wurden an der reduzierten Laborprobe von 1400

g vorgenommen. Ri: Ringsmatrize, FI: Flachmatrize. S: kurz, M: mittel, L: lang, LoD: niedrige mechanische Festigkeit.

Die Definition der Pelletlänge (d.h. von Mitte zu Mitte – MB1, gegenüber der Länge über die Außenkanten – MB2) beeinflusst natürlich auch den Anteil der kurzen Pellets, die im Bereich unter 10 mm liegen. Dieser Parameter wird im Rahmen des ENplus-Zertifizierungssystems [12] berücksichtigt. In Abbildung 20 sind diese Unterschiede für das Sortiment „Versuchsbrennstoffe“ und für das Sortiment 8 mm Pellets dargestellt.

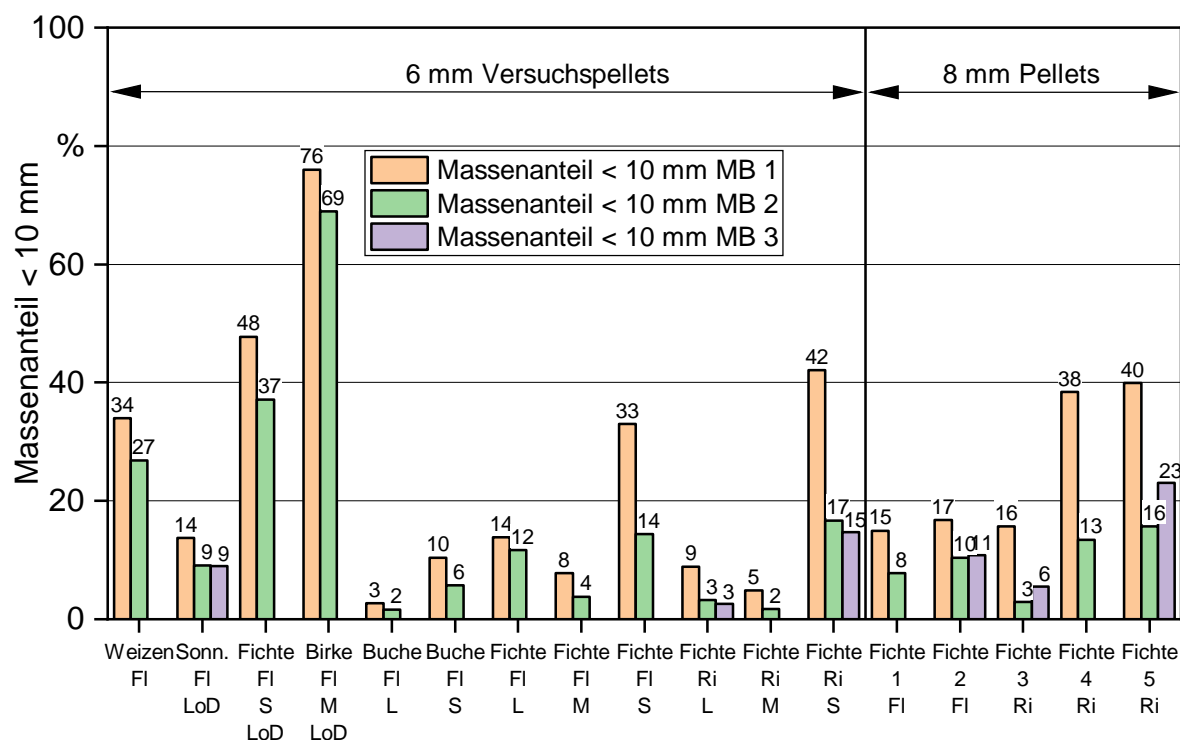


Abbildung 20: Massenanteil der Pellets mit einer Länge von weniger als 10 mm, wenn sie mit einer der drei bewerteten Methoden bestimmt werden. Die Probenmasse betrug bei allen Tests 200 g. Ri: Ringsmatrize, FI: Flachmatrize. S: kurz, M: mittel, L: lang, LoD: niedrige mechanische Festigkeit.

Tabelle 12 zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Messmethoden. Bei 6 mm Pellets ist die Zuordnung zu einer der drei Klassen bei Anwendung der MB2- oder MB3-Methode gleich; dies unterstreicht die Kompatibilität der beiden Methoden, die beide die Pelletlänge über die Außenkanten bestimmen. Mit der MB1-Methode ergeben sich jedoch stark abweichende Ergebnisse, d.h. die Anzahl der Proben, die der S-Klasse zugeordnet werden, etwa doppelt so hoch.

Tabelle 12: Anzahl der Pelletsorten, die je nach Messverfahren den Längenklassen S, M und L gemäß ENplus-Zertifizierung zugeordnet sind. Bestimmt für 6- und 8-mm-Pellets

Klasse	Fraktion <10 mm	MB1	MB2	MB3
6 mm Pellets (Anzahl der untersuchten Proben: 12):				
L	L < 20%	7	9	9
M	20% ≤ M ≤ 30%	0	1	1
S	S > 30%	5	2	2
8 mm Pellets (Anzahl der untersuchten Proben: 5):				
L	L < 20%	3	5	4
M	20% ≤ M ≤ 30%	2	0	1
S	S > 30%	0	0	0

Die Pelletdurchmesser der 12 Pelletsortimente mit einem Nenndurchmesser von 6 mm wurden mit dem digitalen Handmessschieber bestimmt. Die Ergebnisse zeigten größere Durchmesserschwankungen für die halmgutartigen Materialien (Weizenstroh und Sonnenblumenschalen) und auch für Birkenholzpellets mit geringer mechanischer Festigkeit (LoD). Pellets aus einer Ringmatrizenpresse (Ri) hatten etwas größere Durchmesser als solche aus einer Flachmatrizenproduktion (FI). Die größte Variabilität des Durchmessers wurde bei Pellets beobachtet, die zu 100 % aus Birkenholz in einer Flachmatrizenpresse hergestellt worden waren.

Die folgenden wesentlichen Schlussfolgerungen können aus den vorgestellten Ergebnissen abgeleitet werden:

- Das neue Messblockdesign (MB2) liefert kompatible Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Methode mit dem Handmessschieber, da in beiden Fällen die Länge über die Außenkanten des Pelletzylinders gemessen wird.
- Gleichzeitig verkürzt das neue Gerät die Zeit, die für jede Probenauswertung benötigt wird, erheblich, was die Verarbeitung größerer Probenmengen ermöglicht und somit zu einer höheren Genauigkeit führt.
- Labore, die bisher die Länge als von Mitte zu Mitte des Pellet-Zylinders gemessen interpretiert haben, haben die Pellet-Länge nach der nun überarbeiteten Längen-Definition (d.h. Messung der Außenkanten) weitgehend unterschätzt. Diese Unstimmigkeit bei der Messung konnte in der Vergangenheit zu irreführenden Beurteilungen führen, insbesondere wenn der Anteil der Pellets unter 10 mm Länge bewertet wird, wie es in der ENplus-Zertifizierung gefordert ist. In einigen Fällen konnte sich der ermittelte Anteil für die Massenfraktion < 10 mm im Vergleich zu einer Außenkantenmessung verdoppeln.
- Die Häufigkeit des Auftretens von überlangen Pellets (Massenanteil > 40 mm) kann sich in einigen Fällen vervierfachen, wenn über die Außenkanten gemessen wird, im Vergleich zu Messungen von Mitte zu Mitte. Mit der nun geklärten Pelletlängen-Definition und mit der verbesserten Messapparatur sollte die Aussagekraft solcher Ergebnisse in Zukunft steigen.

Schnellbestimmungsmethoden mittels fotooptischer Verfahren

Im direkten Vergleich zur überarbeiteten Referenzmethode nach ISO 17829 (siehe oben) wurden 2 bereits markterhältliche fotooptische Schnellbestimmungsmethoden (PelletVision und BEA LMD, Abbildung 21) getestet.

Beim PelletVision handelt es sich um ein fotooptisches Messverfahren, bestehend aus einer Lichtkabine mit integrierter Messkamera und Beleuchtung, sowie einer Schublade („Pelletschublade“). Das Gerät ist in drei unterschiedlichen Konfigurationen erhältlich. Bei der Konfiguration „Connect“ erfolgt die Datenübertragung zwischen Messgerät und PC per USB-Verbindung, bei der Konfiguration „Online“ per WLAN und bei der Konfiguration „Mobile“ ist zusätzlich noch ein GPS-Modul verbaut, um Standortdaten bei der mobilen Anwendung zu erfassen. Zur Messung wird eine Probe (max. ca. 100 Pellets) per Hand in die Pelletschublade sortiert, wobei sich die Pellets nicht berühren dürfen. Anschließend wird die Schublade in das Messgerät geschoben. Die eigentliche Messung sowie die Auswertung der Messdaten erfolgen dann binnen Sekunden. Ausgegeben werden die Längenverteilung, die Anzahl der Pellets in der Schublade, Min- / Maxwerte und die mittlere Pelletlänge, sowie der Anteil an Pellets < 10 mm. Eine Kalibrierung durch den Nutzer ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht möglich. Das Gerät entspricht laut Hersteller den Vorgaben der ISO 17829. Der Preis des PelletVision „Mobile“ lag zum Zeitpunkt der Untersuchungen bei ca. 5.500,0 €.

Das BEA LMD (Length Measurement Device) ist ein Gerät zur vollautomatischen Längenbestimmung von Holzpellets mit 6 mm Durchmesser. Jedes Pellet wird mittels 3-fach-Laser in der Länge vermessen und gezählt. Die statistische Auswertung (Mittelwert, Klassenverteilung, Standardabweichung) erfolgt gemäß allgemein gültiger mathematischer Rechenregeln. Die zu messende Probe muss vor der Messung mit einem 5,6 mm Rundlochsieb gemäß ISO 3310-2 abgesiebt werden. Erst dann darf die Probe zur Messung in das Gerät aufgegeben werden. Die Vereinzelnung der Pellets erfolgt mittels Vibrotopf und Förderband. Im Gegensatz zum PelletVision muss hier die Probe nicht von Hand vereinzelt werden. Zudem ist die maximale Probenmenge mit ca. 650 g deutlich größer als beim PelletVision. Das Messgerät kann mit geeigneten Prüfkörpern kalibriert werden. Es sind Kalibrierfaktoren für Hartholzpellets und Weichholzpellets hinterlegt. Diese wurden für die Bewertung des Messgeräts auf 0 gesetzt, da sich die Einstellung der Korrekturfaktoren ab Werk noch auf die ursprüngliche Referenzmethode mit Messschieber (MB3, siehe oben) bezogen. Der Preis des Messgeräts lag zum Zeitpunkt der Untersuchung mit ca. 10.000 € ungerfähr doppelt so hoch wie für das PelletVision. Das BEA LMD ist nicht für den mobilen Einsatz geeignet.

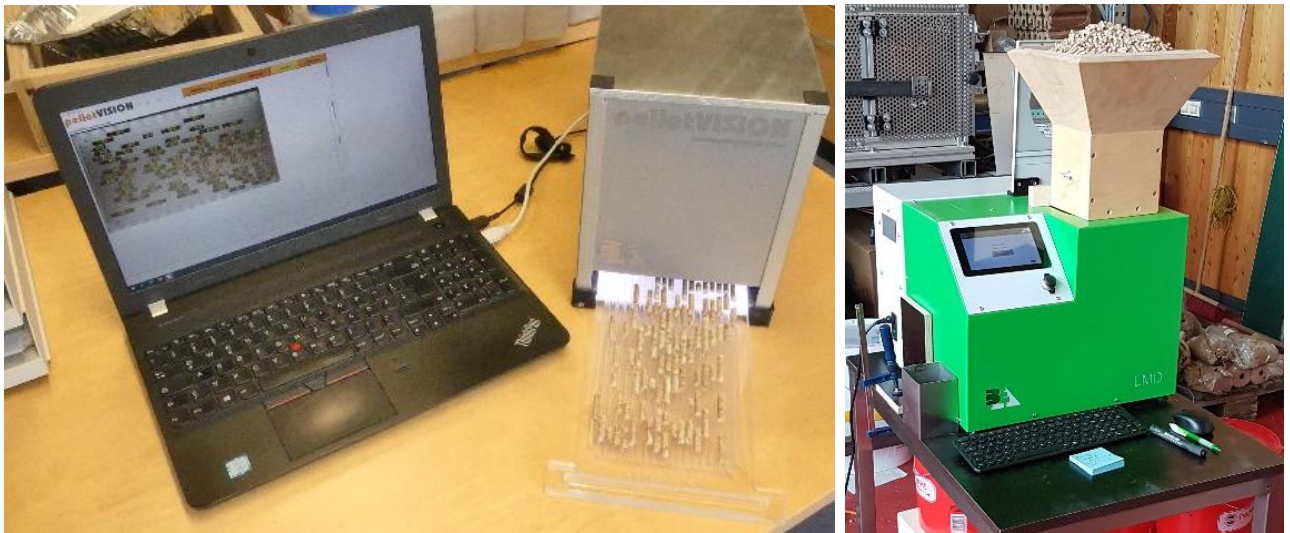


Abbildung 21: Untersuchte fotooptischen Pelletlängenmessgeräte PelletVISION (links) und BEA LMD mit nachgerüstetem Probenaufgabetrichter für Proben > 650 g (rechts).

Die Pelletlängenmessgeräte wurden im Rahmen der Untersuchungen mit der überarbeiteten Referenzmethode (Messblock MB2, Außen-Außen, ISO 17829-2024 [27]) verglichen und bewertet. Dabei wurde eine Probenmenge von je 200 g verwendet. Zusätzlich erfolgten noch Versuche mit dem BEA LMD bei denen größere Probenmengen (bis 1400 g) untersucht wurden. Da bei den verwendeten Messgeräten die Reihenfolge der gemessenen Pellets nicht wie bei der Referenzmethode (siehe oben) eingehalten werden konnte, erfolgt die Bewertung anhand der Mittelwerte über die Gesamtprobe (200 g). Die Aufteilung der untersuchten Pelletsortimente erfolgte wieder wie auch bei der Referenzmethode in 6 mm „Versuchsbrennstoffe“, 6 mm „Marktauswahl“ und 8 mm Pellets.

Abbildung 22 zeigt die mittlere Pelletlänge sowie die Min- und Maximalwerte der gemessenen 6 mm und 8 mm „Versuchsbrennstoffe“ gemessen mit der Referenzmethode im Vergleich zum PelletVISION und BEA LMD. Hinsichtlich der mittleren Pelletlänge weist das PelletVISION über die „Versuchsbrennstoffe“ eine durchschnittliche Abweichung (MB2 - PelletVISION) von 0,2 mm über alle Sortimente auf. Die minimale Abweichung der Einzelnen Sortimente liegt bei -1,1 mm und die maximale bei 0,9 mm. Auch bei den gemessenen Min- (durchschnittlich -1,25 mm) und Maximallängen (durchschnittlich -0,29 mm) sind die Abweichungen des PelletVISION von der Referenzmethode vergleichsweise gering.

Das BEA LMD wies im Vergleich zum PelletVISION mit durchschnittlich 2,0 mm eine deutlich höhere Abweichung der mittleren Pelletlänge von der Referenz auf (MB2 – BEA). Die minimale Abweichung der einzelnen Sortimente lag bei -1,0 mm und die maximale bei 4,6 mm. Bei den gemessenen Minimallängen lag die Abweichung des BEA LMD (durchschnittlich 3,0 mm) und Maximallängen (durchschnittlich -24,0 mm) von der Referenzmethode deutlich höher. Betrachtet man die Abweichungen der einzelnen Sortimente kann diese für die Minimallänge bis zu 5,5 mm und für die Maximallänge sogar bis zu 175,2 mm betragen. Hinsichtlich des Anteils an Pellets < 10 mm an der Gesamtprobe wichen die untersuchten Messgeräte teilweise deutlich von der Referenzmethode ab (Abbildung 23). Im Mittel wich das PelletVISION um -1,4 m-% und das BEA LMD um -2,1 m-% von der Referenz ab. Bei einzelnen Sortimenten lag die Abweichung jedoch deutlich höher. Dies ist z.B. beim PelletVISION für Fichte aus der Ringmatrize der Größenklasse S der Fall. Hier überschätzte das PelletVISION den Anteil an Pellets < 10 mm um 9,5 m-% gegenüber der Referenz. Beim BEA LMD lag die größte Abweichung dahingegen beim Sortiment Birke aus Flachmatrizenpresse der Größenklasse M vor. Hier lag die Abweichung gegenüber der Referenz bei -12,6 m-%, wobei der Anteil unterschätzt wird. Beim PelletVISION führte die Abweichung in einem Fall zu einer Falschkategorisierung der Längenklasse im Vergleich zur Referenz, während beim BEA LMD trotz Abweichungen alle Längenklassen richtig ausgegeben wurden.

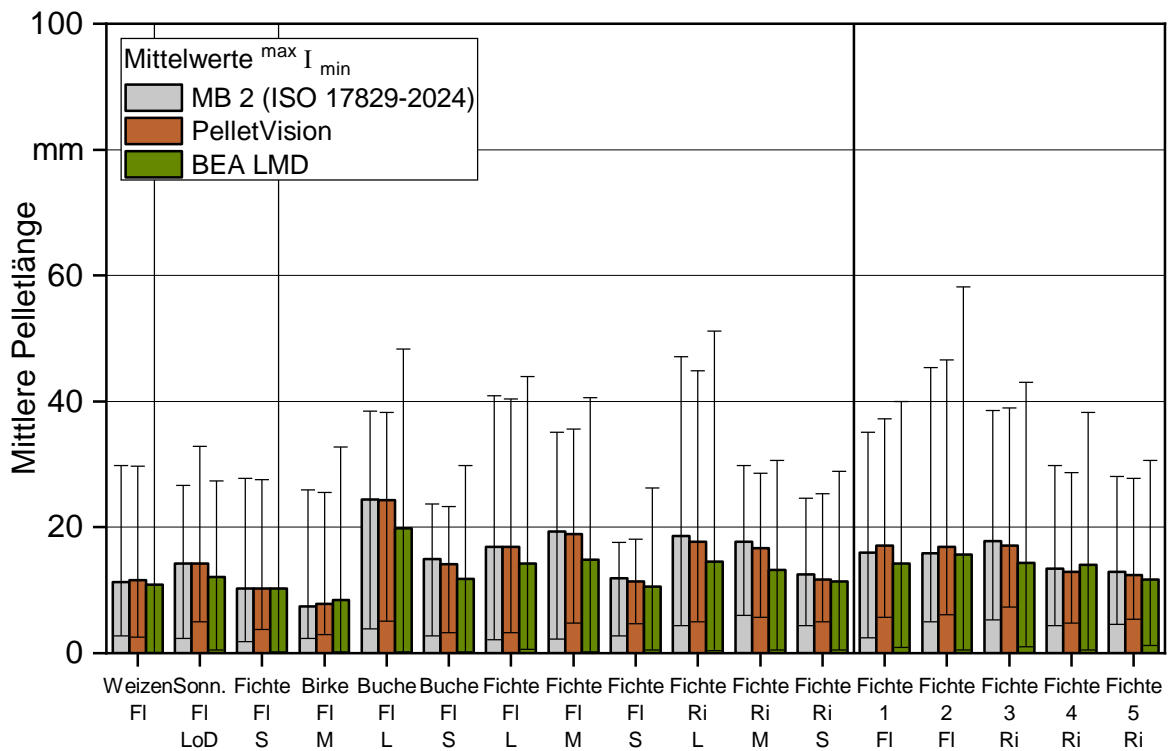


Abbildung 22: Vergleich der mittleren Pelletlänge der untersuchten Sortimente der 6 mm und 8 mm „Versuchsbrennstoffe“, gemessen mit MB2, PelletVision und BEA LMD.

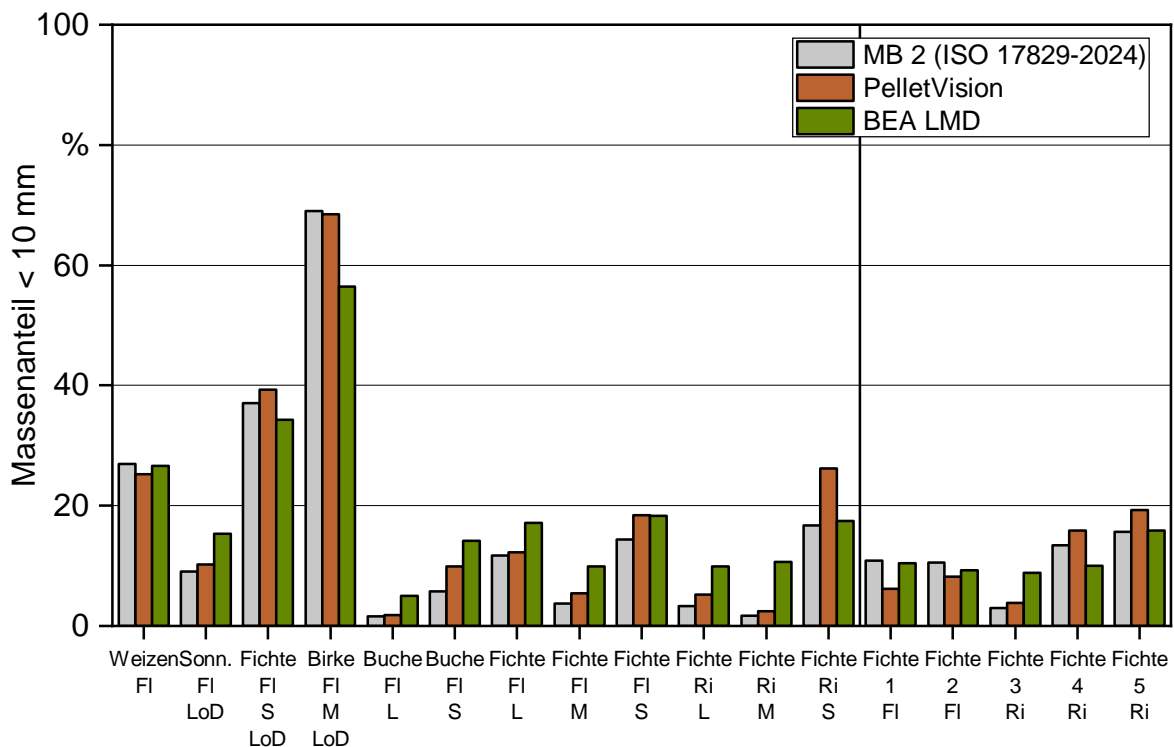


Abbildung 23: Vergleich des Anteils von Pellets < 10 mm der untersuchten Sortimente der 6 mm und 8 mm „Versuchsbrennstoffe“, gemessen mit MB2, PelletVision und BEA LMD.

Bei den Pelletsortimenten der „Marktauswahl“ zeigte sich ein ähnliches Bild. Hinsichtlich der mittleren Pelletlänge wies das PelletVision über die „Marktauswahl“ eine durchschnittliche Abweichung (MB2 - PelletVision) von 0,9 mm über alle Sortimente auf. Die minimale Abweichung der einzelnen Sortimente lag bei 0,7 mm und die maximale bei 1,1 mm. Auch bei den gemessenen Min- (durchschnittlich 0,27 mm) und Maximallängen (durchschnittlich 0,6 mm) waren die Abweichungen des PelletVision von der Referenzmethode vergleichsweise gering. Gegenüber den „Versuchsbrennstoffen“ fiel für die „Marktauswahl“ auf, dass beim PelletVision durchweg eine leichte Unterschätzung der Pelletlänge vorlag, während bei den „Versuchsbrennstoffen“ bei ca. einem Viertel der Sortimente eine Überschätzung vorlag. Dies fällt auch bei den minimalen und maximalen Pelletlängen auf.

Das BEA LMD wies mit durchschnittlich 0,96 mm bei der „Marktauswahl“ eine ähnliche Abweichung (MB2 - BEA) der mittleren Pelletlänge von der Referenz auf. Die minimale Abweichung der einzelnen Sortimente lag bei -0,4 mm und die maximale bei 4,3 mm. Damit liegt die Streuung der Einzelnen Abweichungen höher als beim PelletVision. Bei den gemessenen Minimallängen liegt die Abweichung des BEA LMD (durchschnittlich 4,3 mm) und Maximallängen (durchschnittlich -5,8 mm) von der Referenzmethode deutlich höher. Auch zeigte sich wieder deutlich, dass die minimalen Längen durch die Bank kürzer gemessen wurden als bei der Referenz. Hinsichtlich des Anteils an Pellets < 10 mm an der Gesamtprobe wichen die untersuchten Messgeräte wieder teilweise deutlich von der Referenzmethode ab (Abbildung 25). Im Mittel wich das PelletVision um -4,4 m-% und das BEA LMD um 1,75 m-% von der Referenz ab. Bei einzelnen Sortimenten lag die Abweichung jedoch deutlich höher. Für das Sortiment P2 überschätzte das PelletVision den Anteil an Pellets < 10 mm um 8,0 m-% und für P5 um 8,2 m-% gegenüber der Referenz. Beim BEA LMD lag die größte Abweichung beim Sortiment P2 vor. Hier lag die Abweichung gegenüber der Referenz bei -8,3 m-% wobei der Anteil unterschätzt wurde. Das PelletVision überschätzte den Anteil < 10 mm bei allen Sortimenten der „Marktauswahl“, während das BEA LMD eher unterschätzt und nur bei 3 Sortimenten (P3, P4, P8) einen höheren Anteil maß als die Referenz. Beim PelletVision führte die Abweichung in einem Fall zu zwei Falschkategorisierung (P1 und P6) der Längensklasse im Vergleich zur Referenz, in beiden Fällen wurde die Längensklasse „S“ statt „M“ ausgegeben. Beim BEA LMD wurden ebenfalls zwei Längensklassen falsch ausgegeben (P1 „L“ statt „M“, P2 „M“ statt „S“).

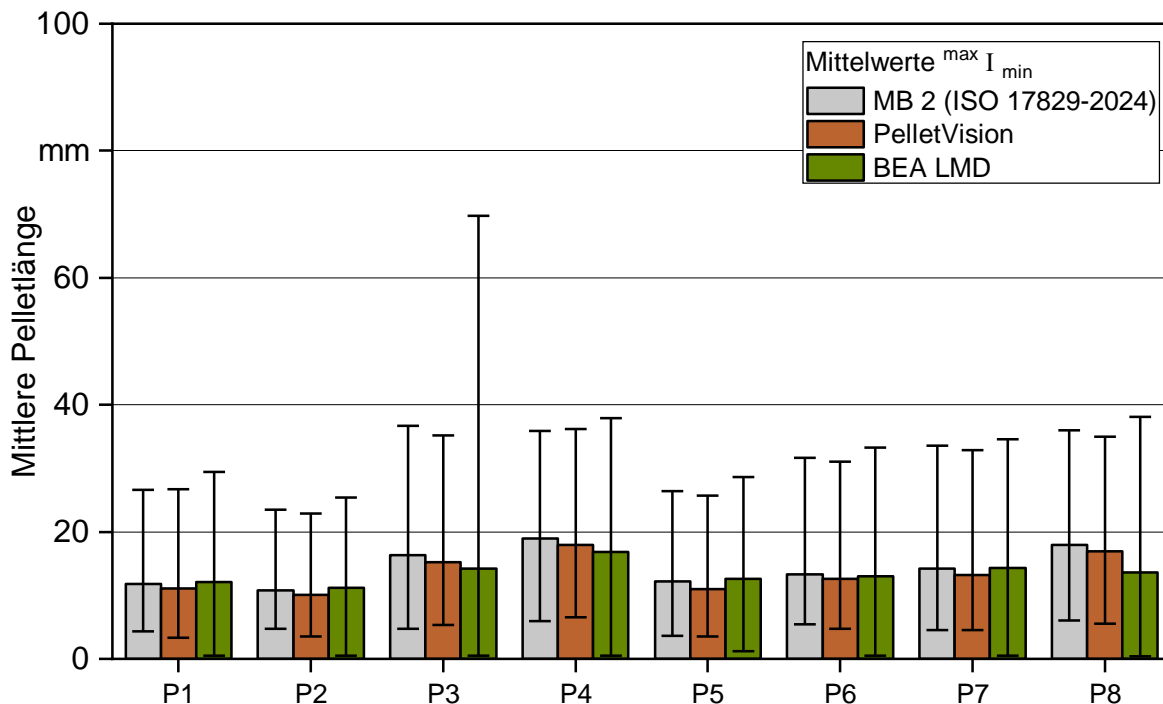


Abbildung 24: Vergleich der mittleren Pelletlänge der untersuchten Sortimente der 6 mm „Marktauswahl“, gemessen mit MB2, PelletVision und BEA LMD.

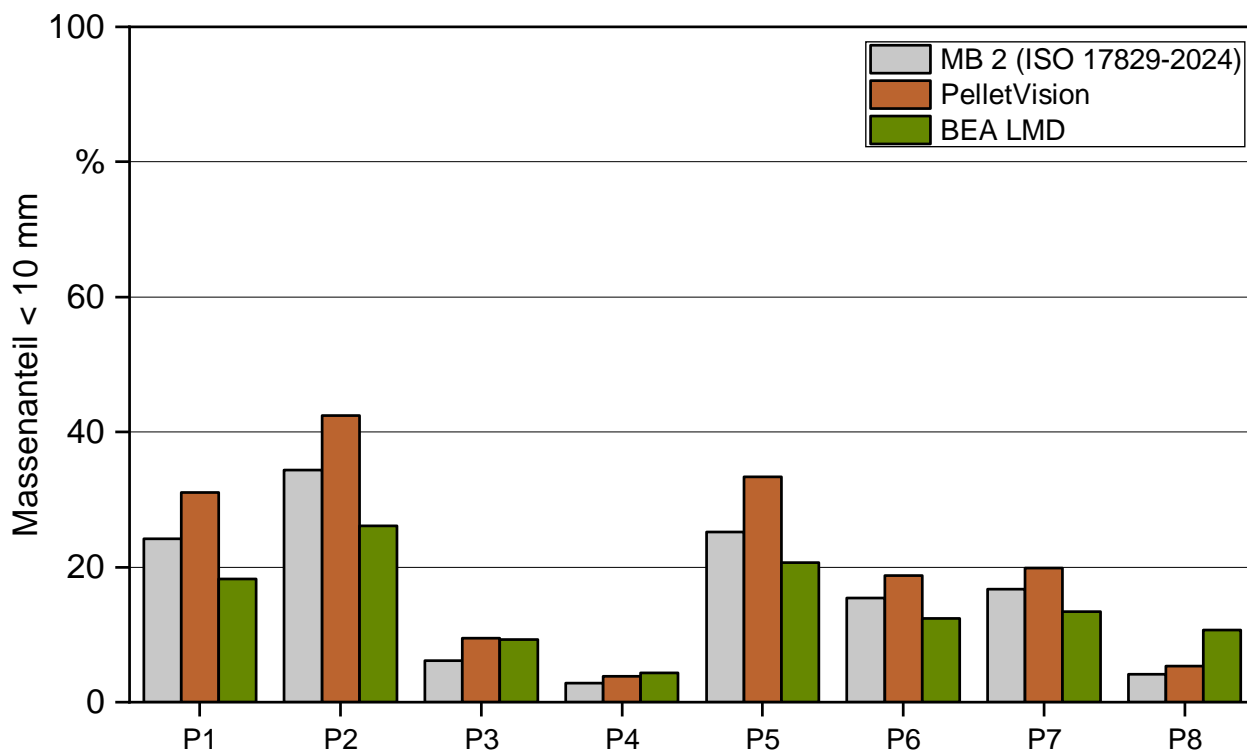


Abbildung 25: Vergleich des Anteils von Pellets < 10 mm der untersuchten Sortimente der 6 mm „Marktauswahl“, gemessen mit MB2, PelletVision und BEA LMD.

Als Grund für die hohen Abweichungen beim BEA LMD wurde bei den Minimallängen das Mitmessen von feinen Staubpartikeln und unvollständigen Pelletbruchstücken beobachtet. Dies dürfte auch zur Unterschätzung der mittleren Pelletlänge führen. Für die teils immense Überschätzung der maximalen Pelletlänge dürfte ein Fehler in der Separierung der Pellets bei der Aufgabe auf das Förderband zugrunde liegen. Hierdurch wurden mehrere Pellets so nah hintereinander auf das Förderband aufgegeben, dass diese vom Laser als ein einziges langes Pellet erfasst wurden. Sowohl die Fehlinterpretation bei den minimalen als auch die bei den maximalen Längen dürfte sich durch Optimierung der Vereinzelungstechnik sowie einen Softwarefilter zu kleiner Partikel beheben lassen. Hierdurch sollte auch die Genauigkeit hinsichtlich der

mittleren Pelletlänge zunehmen. Beim PelletVision war die Genauigkeit im Vergleich zum BEA LMD höher, allerdings ist auch der Aufwand durch das manuelle Einlegen in die Pelletschublade höher und die Probenmenge, die auf einmal gemessen werden kann, deutlich geringer. Zudem ist aufgrund der manuellen Bestückung der Pelletschablone ein erhöhter Einfluss des Bediener auf das Messergebnis zu erwarten. Hier werden ebenfalls zu eng aneinander liegenden Pellets als überlange Pellets erkannt und ausgegeben.

Prinzipiell scheinen beide Messgeräte die Pelletlänge im Vergleich zur überarbeiteten Referenzmethode leicht zu unterschätzen. Dies könnte auch damit zusammenhängen, dass beide Geräte noch auf die alte Referenzmethode (Messschieber) kalibriert wurden. Dies sollte sich ebenfalls durch Softwareanpassungen optimieren lassen bzw. beim BEA LMD durch Anpassung der Korrekturfaktoren.

Zusätzlich erfolgte mit dem BEA LMD eine Messung, bei der die gesamte Restprobe von 1400 g aufgegeben wurde. Hierzu wurde das Messgerät in Absprache mit dem Hersteller mit einem Trichter modifiziert (Abbildung 21). Der Trichter wurde so am Gerät montiert, dass der Vibrotopf noch frei schwingen konnte. Die Messung dieser Menge wäre auch ohne den Trichter möglich gewesen. Hierzu bietet die Software des Messgeräts die Option, mehrere Male die Menge von ca. 650 g Pellets aufzugeben und die Messdaten der Einzelmessungen zu verknüpfen. In Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Messung mit dem BEA LMD bei 1400 g im Vergleich zur Messung der 200 g Probe der gleichen Sortimente dargestellt. Wie bei den Messungen der 200 g Probe wird die minimale Pelletlänge durch das Mitmessen von Staubpartikeln und Bruchstücken unterschätzt. Dies scheint sich durch die große Aufgabemenge und ggf. zusätzlich entstehenden Abrieb sogar noch zu verschlimmern. Auch die Überschätzung der maximalen Länge durch das Aneinanderreihen mehrerer Pellets und deren Interpretation als zusammenhängende Pellets durch den Laser kommt bei der 1400 g Probe noch häufiger vor als bei der 200 g Probe. Im Mittel ist die Abweichung der mittleren Pelletlänge des BEA bei 1400 g von 0,6 mm gegenüber der Referenzmessung (MB2) von 200 g dennoch recht gering. In Einzelfällen betrug die Abweichung bis zu 7,6 mm. Beim Anteil < 10 mm (nicht dargestellt) wichen die Werte durch das Mitmessen der Bruchstücke und Staubpartikel bei der 1400 g Probe teilweise erheblich von der 200 g Probe ab. Allerdings könnte der Anteil der Pellets < 10 mm in der größeren Probenmenge auch tatsächlich größer sein. Eine genauere Aussage hierzu ist erst nach Optimierung der beschriebenen Schwachstellen des Geräts möglich. Auch bei den Pellets aus der „Marktauswahl“ (nicht dargestellt) zeigten sich die beschriebenen Auffälligkeiten der 1400 g Probe im Vergleich zur 200 g Probe. Nach Optimierung könnte das BEA LMD mit der Option, große Pelletmengen zu messen, eine interessante Alternative zur Handsortierung zur Ermittlung der Überlängen und zur genaueren Bestimmung des Anteils von Pellets < 10 mm darstellen. Die beschriebenen Schwachstellen beider Messgeräte scheinen durch Anpassung der Korrekturfaktoren und Softwareseitige Optimierung einfach lösbar zu sein.

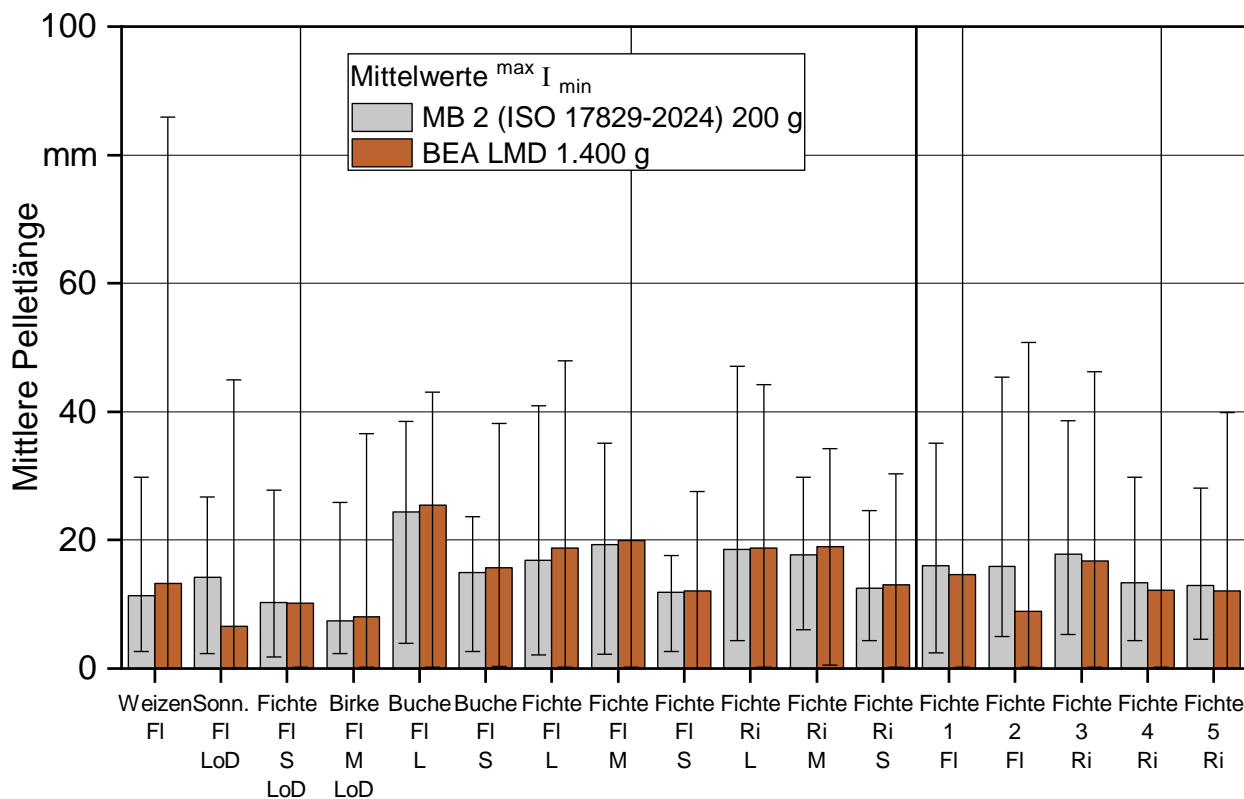


Abbildung 26: Vergleich der mittleren Pelletlänge der untersuchten Sortimente der 6 mm und 8 mm „Versuchsbrennstoffe“, gemessen mit MB2 200 g, PelletVision und BEA LMD 1400 g.

Methoden zur Vorhersage des Versinterungsverhaltens von Holzpellets in Pelletöfen unter Berücksichtigung von Karbonatschmelzen:

In FuturePelletSpec 1 wurden bei den Feuerungsversuchen häufig Versinterungen der Asche im Brennertopf zu Versuchsende festgestellt. Da bei den meisten der verwendeten Brennstoffe der Siliziumanteil, sowie der Asche-Schmelz-Index unkritisch waren [4], wurde die These aufgestellt, dass sich unter bestimmten Bedingungen Kaliumkarbonate und Calciumkarbonate in der Brennerschale bilden, die einen relativ niedrigen Schmelzpunkt (700 bis 1000 °C) [8] aufweisen und dann die beobachteten Ascheversinterungen begünstigen. Bei den meisten siliziumarmen Brennstoffen in Teil 1 des Projekts waren die Versinterungen auch nicht besonders stabil und ließen sich mit der Hand leicht zerdrücken. Bei den siliziumreicheren Brennstoffen waren die Versinterungen wesentlich härter und würden eher schon als Verschlackungen eingestuft werden [29]. Um dieses Phänomen untersuchen zu können und in der Praxis auch vorherzusagen, sollte die im Projekt AshMelt entwickelte PASSA-Methode auf die bereits beschriebenen additivierten Brennstoffe angewendet und die Eignung bewertet werden. Zusätzlich wurde auch noch die wesentlich weniger aufwendige Methode „Rapid Slag Test“ mit bewertet [29].

Bei der PASSA-Methode werden jeweils 200 g Pellets in einer keramischen Glühschale eingewogen und anschließend in einem eigens entwickelten Temperaturprogramm (Abbildung 27) behandelt. Dabei wird nach der aktuellen Vorgehensweise die Probe bei Raumtemperatur in den Veraschungsofen gestellt und es erfolgt zunächst ein Aufheizvorgang auf 250 °C mit einer Aufheizrate von 10 K/min. Die Temperatur von 250 °C wird daraufhin für 4 h gehalten, bevor ein erneutes Aufheizen mit 10 K/min auf 1000 °C erfolgt. Diese Temperaturstufe wird dann für 30 Minuten gehalten, wonach der Ofen ausgeschaltet und die Probe über Nacht zurück auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Die abgekühlte Probe wird aus dem Veraschungsofen entnommen und visuell beurteilt sowie fotografiert und gewogen. Danach wird die Probe aus der Schale unter Zuhilfenahme eines Pinsels entnommen. Der an der Schale anhaftende Teil darf dabei nicht abgekratzt werden. Die Probe wird anschließend mit einer 3D-Siebmaschine und Sieben mit den Maschenweiten 1,0 und 2,0 mm gesiebt. Anschließend erfolgt die Auswertung, wobei der Anteil der an der Schale anhaftenden Probe der Fraktion > 2,0 mm zugeordnet wird. Die Fraktionen werden zudem auch kumulativ betrachtet. Es wird pro Brennstoff jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt, wobei die Schalen separat nacheinander den beschriebenen Messablauf durchlaufen. Bei bisherigen Untersuchungen wurde für die Bewertung immer der kumulierte Wert der Aschepartikel > 1,0 mm herangezogen.

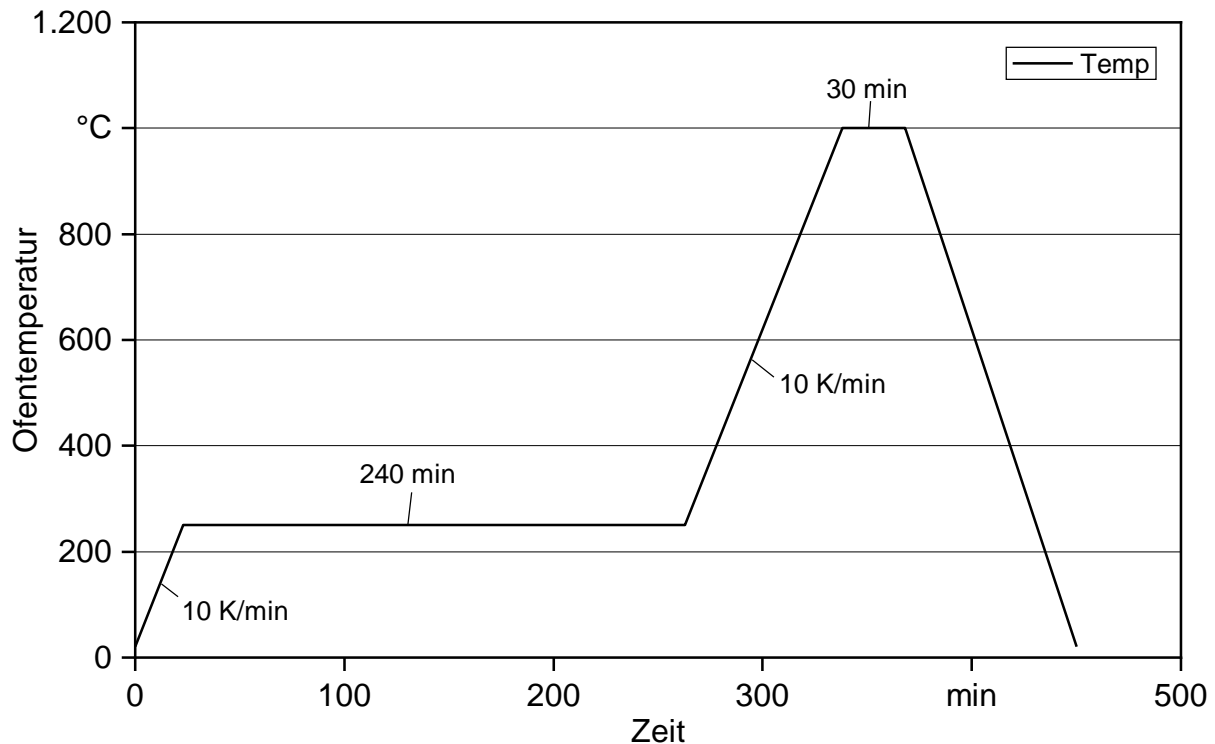


Abbildung 27: Aktuelles Temperaturprofil für die Durchführung der PASSA-Methode mit Holzpellets.

Der Rapid Slag Test [29] wird auf ähnliche Weise zur PASSA-Methode durchgeführt, nur dass hier mit wesentlich kleinen Tiegel (21 ml) und einer Einwaage an 5 g Pellets gearbeitet wird. Bei dieser Methode können aufgrund der geringen Probenmenge mehrere Proben gleichzeitig untersucht werden. Die Proben werden ebenfalls bei Raumtemperatur in den Veraschungsofen gestellt und anschließend mit einer Aufheizrate von 5 K/min auf 1100 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wird für 30 min gehalten, anschließend der Ofen ausgeschaltet und die Probe wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. In der ursprünglichen Methode des Rapid Slag Test erfolgt eine ausschließlich visuelle Bewertung, ob eine Verschlackung vorliegt oder nicht. Das Ergebnis ist in diesem Fall lediglich „ja“ oder „nein“. Bei den Versuchen im Projekt FuturePelletSpec 2

wurden die Schalen zusätzlich gewogen und ebenfalls mit einem Pinsel entleert und erneut gewogen. Somit konnte die Masse des an den Schalen anhaftenden Anteils der Probe nach der Veraschung als quantitative Komponente des Schmelzeverhaltens mit bewertet werden. Die relativ aufwendige Siebung der Asche entfällt bei dieser Methode.

Zum Vergleich der beiden Testmethoden mit der Praxis wurden die Rostaschen aus den Feuerungsversuchen (vier Pelletöfen + Prototyp LEFLEX-PKo, siehe AP 4) ebenfalls gesiebt und mit den Aschen aus den Testmethoden verglichen. Zusätzlich wurden alle Rostaschen und die Aschen der PASSA-Methode im Kohlenstoffanalysator (LECO RC 612) hinsichtlich des Karbonatgehalts (TIC) untersucht. Beim Rapid Slag Test war dies aufgrund der sehr niedrigen Aschemenge nicht möglich.

Die Abbildung 28 zeigt die Ergebnisse der Aschesiebungen bei verschiedenen Ofen- und Brennstoffvarianten. Es wird deutlich, dass bereits bei gleichem Brennstoff erhebliche Unterschiede im Anteil an Partikeln größer als 1 mm zwischen den Rostaschen der untersuchten Öfen bestehen. Besonders die Öfen mit extremer Luftstufung (O4 und LF), die einem Vergasungsprinzip folgen, wiesen ähnliche Massenanteile an Versinterungen auf, die bei den meisten Brennstoffen höher sind als bei herkömmlichen Luftstufungsöfen.

Bei reiner Fichte lagen die Anteile an Versinterungen bei den Abwurff Feuerungen (O1, O3) und der Unterschubfeuerung (O2) zwischen 0 und 0,1, während sie bei den Öfen mit extremer Luftstufung bei ca. 0,4 lagen. Dies könnte auf eine durch das hohe Glutbett und die niedrigen Sauerstoff- sowie hohen CO₂-Konzentrationen bedingte vermehrte Karbonatbildung zurückzuführen sein.

Im Durchschnitt aller fünf untersuchten Öfen betrug der Anteil an Partikeln > 1 mm an der Rostasche 0,2, während die Ergebnisse der PASSA-Methode bei 0,4 und der Rapid Slag Test bei 0,3 lagen. Bei der Variante mit viel Calcium und wenig Magnesium (Ca/K 1) stieg der Anteil an versinterter Asche bei den Öfen 1 bis 3 auf ca. 0,1, während er bei den Prototypen mit extremer Luftstufung (LF) im Vergleich zu reiner Fichte auf ca. 0,2 sank. Hierbei sank auch der Wert der PASSA-Methode auf 0,2, während der Rapid Slag Test bei ca. 0,3 blieb.

Bei der Variante mit viel Kalium und weniger Calcium (Ca/K 2) lagen die Abwurff Feuerung O1 und die Unterschubfeuerung O2 mit 0,1 bis 0,2 auf einem niedrigen Niveau, während O3 mit ca. 0,6 deutlich höhere Werte zeigte, was auf die höheren Kaliumkonzentrationen im Brennstoff zurückzuführen ist. Die Öfen O4 und LF hatten hier mit ca. 0,3 wieder niedrigere Werte. Die PASSA-Methode ergab 0,7, der Rapid Slag Test 0,5, was insgesamt eher hohe Werte sind.

Bei siliziumreichem Brennstoff (Si/K 1) wurden bei den Öfen O1 und O3 mit 0,6 sowie bei O4 und LF mit 0,9 bis 1,0 deutliche Versinterungen festgestellt, während die Unterschubfeuerung mit nur 0,2 einen niedrigen Wert aufwies. Dies könnte an einer niedrigeren Betttemperatur bei Unterschubfeuerungen liegen, da hier der Brennstoff von unten eingeschoben wird. Die Versinterungen sind bei siliziumreichen Brennstoffen deutlich fester, was typisch ist [30].

Im Mittel lag der Anteil an Partikeln < 0,1 mm bei 0,5. Die Ergebnisse der PASSA-Methode und des Rapid Slag Tests zeigten, dass die PASSA-Methode die Neigung zur Versinterung bei Fichte und Ca/K2 deutlich überschätzt, während sie bei Si/K1 stark unterschätzt. Der Rapid Slag Test lag näher an den Mittelwerten der Feuerungen und ist aufgrund seines geringeren Aufwands vermutlich die geeignetere Methode für eine schnelle Bestimmung der Versinterungsneigung bei Holzpellets.

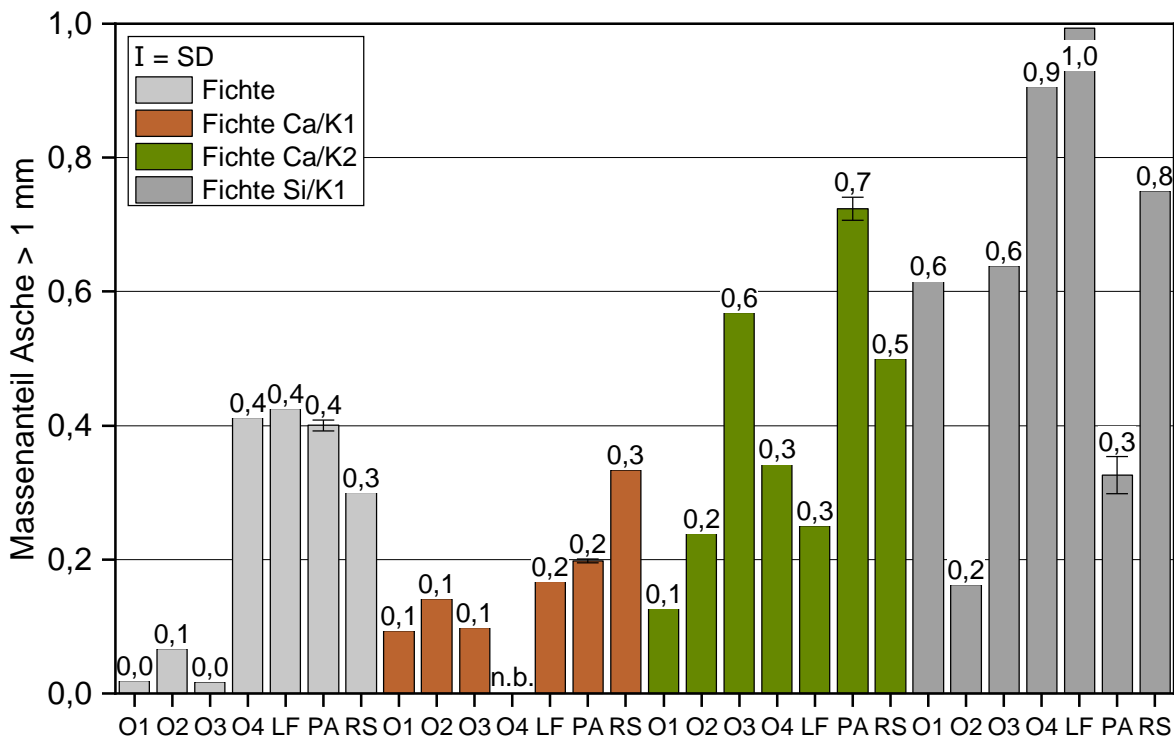


Abbildung 28: Massenanteil der Aschen mit Partikeln > 1 mm der untersuchten Pelletöfen (O1-O4) sowie des Prototypens (LF), der PASSA Methode (PA) und des Rapid Slag Test (RS). n.b. = nicht bestimmt

Die Ergebnisse der Aschenanalyse mittels TIC-Analyse sind in Abbildung 29 dargestellt. Dabei wurden die Karbonate als gebundenes CO₂ in den Aschen gezeigt. Die Karbonatanteile an den Rostaschen der untersuchten Brennstoffe und untersuchten Öfen waren mit Werten zwischen 1,6 und 2,9 mol/kg relativ ähnlich.

Im Durchschnitt lagen die Karbonatanteile der Öfen bei reiner Fichte bei 2,0 mol/kg. Für die Variante Ca/K 1 waren die Karbonatanteile bei Ofen 1 und 3 vergleichbar mit denen bei reiner Fichte, während Ofen 2 bei 2,9 mol/kg lag. Bei Ofen 4, der auf der Vergasungstechnologie basiert, sanken die Karbonatanteile im Vergleich zur reinen Fichte auf 0,7 mol/kg. Beim Prototypen (LF) stiegen die Werte dagegen auf 3,6 mol/kg an. Diese Unterschiede lassen sich vor allem auf die Fläche des Rosts, den Durchmesser und die Höhe des Glutbetts zurückführen. Zudem verfügt der Prototyp über eine Abgasrezirkulation, was zu niedrigeren Restsauerstoffkonzentrationen und Temperaturen im Glutbett führt. Dies erklärt vermutlich die höheren Karbonatgehalte im Prototyp im Vergleich zu Ofen 4 bei ähnlicher Luftstufung.

Die Varianten Ca/K 1 und Ca/K 2 zeigten sich hinsichtlich des Karbonatgehalts keine Unterschiede, wenn die Messunsicherheiten berücksichtigt werden. Bei der Variante Si/K 1 sanken die Karbonatgehalte in allen Öfen deutlich auf Werte zwischen 0,3 und 0,6 mol/kg gebundenem CO₂. Dies war zu erwarten, da Ca und K statt zu Karbonaten mit Silizium zu Silikaten reagieren [30].

Bei den Aschen aus der PASSA-Methode fällt auf, dass keine Karbonate (< 0,2 mol/kg) nachweisbar waren. Dies liegt vermutlich an der Behandlungstemperatur von 1000 °C, bei der die Karbonate bereits zersetzt wurden [8]. Ein Ansatz zur Optimierung der PASSA-Methode und des Rapid Slag Tests könnte daher sein, die Endtemperatur auf 800 bis 900 °C zu senken, was auch realistischer im Hinblick auf die Temperaturen im Glutbett der Pelletöfen ist (siehe Messungen BIOS FuturePelletSpec 1 [4]).

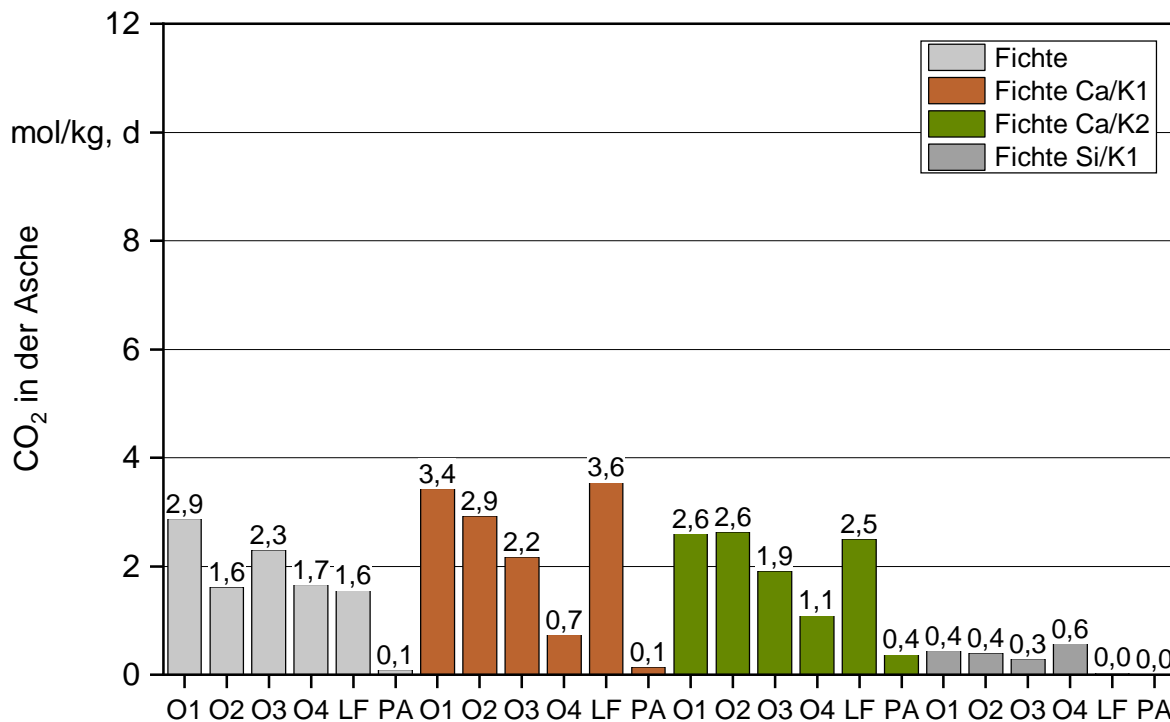


Abbildung 29: Vergleich der Karbonate dargestellt als CO₂ gebunden in den Rost- und Brennstoffaschen der untersuchten Öfen sowie der PASSA-Methode bei Verwendung der additivierten Fichtenbrennstoffe.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass das Versinterungsverhalten stark von der verwendeten Ofentechnologie, sowie von den inhaltsstofflichen Eigenschaften des Brennstoffs abhängig ist. Für grobe Abschätzungen des Versinterungsverhaltens sind die untersuchten Testmethoden PASSA und Rapid Slag test grundsätzlich geeignet. Der Rapid Slag Test lieferte mit der Erweiterung um die Bewertung des an der Schale anhaftenden Anteils der Asche im Mittel aber die realistischeren Ergebnisse. Zudem war der Arbeitsaufwand für diese Methode deutlich geringer, weshalb diese Methode wohl in Zukunft am TFZ weiterentwickelt wird. Optimierungspotentiale werden hinsichtlich des Einflusses der Karbonatbildung auf das Versinterungsverhalten vor allem in der Anpassung der Endtemperatur auf 800 bis 900°C und der Auswahl des Materials der Glühschalen gesehen.

d) Förderversuche an einem neu entwickelten Förderprüfstand zur Bestimmung des feuerungsrelevanten Feinanteils

Während des Projekts FuturePelletSpec 1 wurden bereits Förderversuche an einem realen Pelletkaminofen durchgeführt [4]. Hierbei wurde bemerkt, dass durch das Fördern der Pellets mittels der verbauten Stokerschnecke zusätzlicher Feinanteil entstand. Das bedeutet, dass in der Feuerung teilweise deutlich mehr Feinanteil ankommt, als durch das Zertifikat der Pellets sichergestellt ist. Untersuchungen zum Einfluss des Feinanteils im Teil 1 des Projekts hatten zudem gezeigt, dass Feinanteile ab 3 m-% sich deutlich negativ auf die Emissionen auswirken können [4]. Daher wurde für den hier beschriebenen Teil 2 des Projekts ein Förderprüfstand gebaut, der einerseits dazu dienen sollte, den „feuerungstechnisch relevanten“ Feinanteil und den Einfluss verschiedener Brennstoffparameter auf diesen zu untersuchen. Andererseits wurde der Prüfstand dazu genutzt, den Einfluss der Schneckengeometrie auf den Feinanteil sowie auf das Förderverhalten im Hinblick auf die Entwicklung des LEFLEX-Pko (siehe AP3) zu evaluieren und ggf. zu optimieren. Bei Pelleteinzelraumfeuerungen zeigen sich typischerweise periodisch wiederkehrende Emissionspeaks, die im direkten Zusammenhang mit dem Pelletabwurf stehen. Je größer der Pelletabwurf ist (d.h., je mehr Pellets gleichzeitig abgeworfen werden), desto höher ist der Emissionspeak. Eine gleichmäßigere Pelletzufuhr begünstigt demzufolge einen gleichmäßigeren Verlauf der Emissionen.

Zunächst wurden Voruntersuchungen mit einem Standard-Austragsbehälter sowie einem taktenden und einem permanent drehenden Schneckenmotor mit variabler Drehzahl durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass es beim Abrieb keine signifikanten Unterschiede zwischen taktendem und permanent drehendem Betrieb des Motors gibt. Was die Gleichmäßigkeit der Pelletzufuhr sowie den Geräuschkomfort angeht, bietet der permanent drehende Schneckenmotor jedoch Vorteile. Daher wurde in Absprache mit den Projektpartnern der permanent drehende Schneckenmotor für den Bau des Förderprüfstands festgelegt. Zudem wurden vorab alle Schneckengeometrien der im Projekt verwendeten Pelletöfen sowie bei zusätzlichen Pelletöfen aus der Heizungsausstellung des TFZ vermessen, um die gängigen Schneckengeometrien im Markt zu bestimmen. Des Weiteren erfolgte vorab eine Auslegung nach VDI 2330-Blatt 2 [31] von für die Förderversuche geeigneter

Schneckendurchmesser und Steigungen in enger Zusammenarbeit mit BIOS. Als für den Leistungsbereich von 6 kW geeignete Schnecken mit ausreichender Förderleistung für Nennlast und bis 30 % Teillast wurden Durchmesser der Wendeln von 36 mm bis 56 mm berechnet, wobei die 36 mm Variante nach VDI 2330 gerade noch die nötige Fördermenge für 6 kW (ca. 1,37 kg/h) erreichen sollte. Als Steigungsverhältnisse (Steigung der Schnecke / Durchmesser) wurden 0,71 (aktueller Wert bei mehreren vermessenen Pelletöfen) sowie 1,0 (in der Literatur als bewährter Wert beschrieben [32, 33]) gewählt. Der Durchmesser der Welle wurde auf 20 mm festgelegt, was dem Durchmesser der meisten marktverfügbaren Geräte entspricht. Zusätzlich wurden in der Praxis immer wieder vorkommende „seelenlose“ Spiralen, d.h. Schnecken ohne durchgehende Welle getestet.

Eine Übersicht der verwendeten Schnecken und der wichtigsten technischen Parameter ist in Tabelle 13 zusammengefasst. Mit den zwei unterschiedlichen Längenabstufungen der Schnecken sollte geprüft werden, ob es einen Unterschied hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Beschickung macht, ob die Schnecke die Pellets direkt über das Abwurffenster hinausschiebt, oder die Schnecke unterhalb des Abwurffensters endet und sich eine Art Reservoir bildet, aus dem die Pellets abgeworfen werden.

Tabelle 13: Verwendete Schneckenvarianten unter Angabe der wichtigsten technischen Parameter. Die vordere Zahl der Bezeichnungen gibt dabei den Durchmesser, die zweite Zahl die Schneckensteigung wieder.

Variante	Durchmesser	Schneckensteigung	Länge	Verwendeter Innendurchmesser des Trogs
36-36 kurz	36 mm	36	18,0 cm	40 mm
36-36 lang	36 mm	36	23,5 cm	40 mm
42-42 kurz	42 mm	42	18,0 cm	46 mm
42-42 lang	42 mm	42	23,5 cm	46 mm
42-42 kurz Spirale	42 mm	42	18,0 cm	46 mm
42-42 kurz Spirale in 56 mm-Trog	42 mm	42	18,0 cm	60 mm
56-40 kurz	56 mm	40	18,0 cm	60 mm
56-40 kurz rostig	56 mm	40	18,0 cm	60 mm
56-40 lang	56 mm	40	23,5 cm	60 mm
56-56 lang	56 mm	56	23,5 cm	60 mm

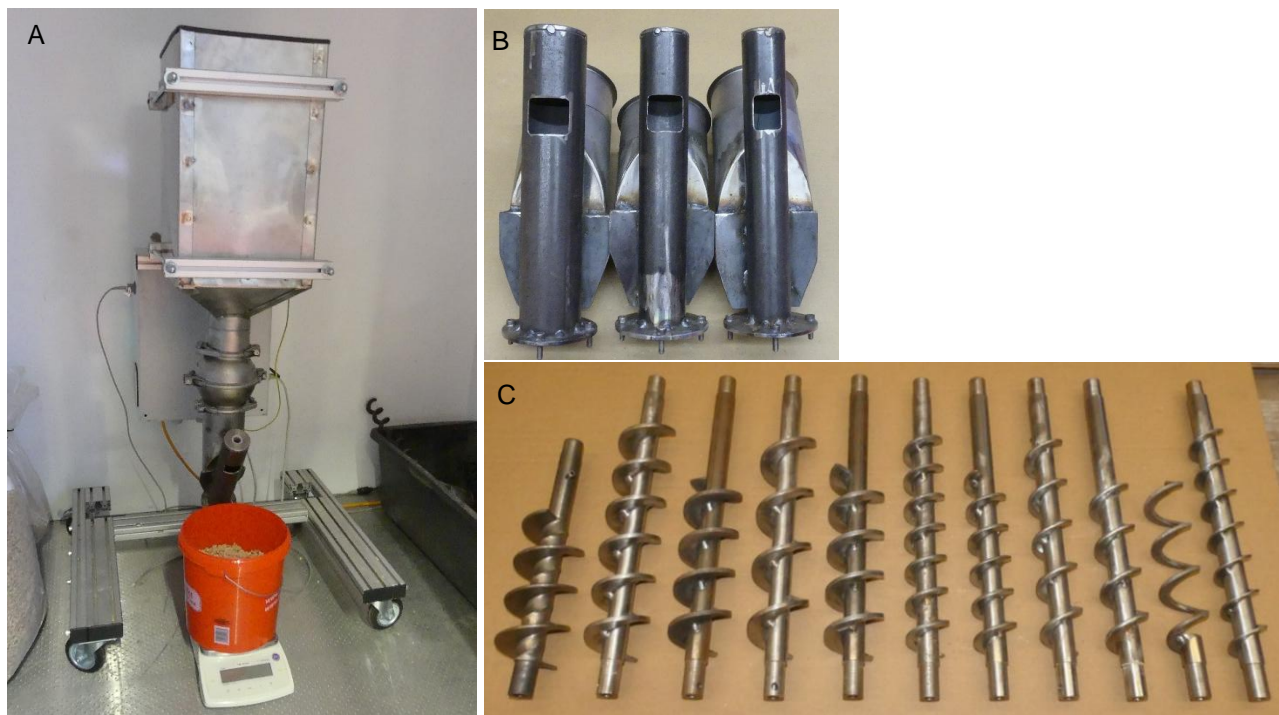


Abbildung 30: Schneckenteststand mit Waage (A); Aufnahmen für Schnecken (Trog) mit Flansch (B); Verwendete Schneckenvarianten (C)

Abbildung 30 zeigt den Schneckenteststand (A) bestehend aus Vorlagebehälter mit Schnecke und Motor, sowie einer hochauflösenden Waage (0,1 g), die Aufnahmen (Trog) für die zu untersuchten Schnecken (B) und die untersuchten Schneckenvarianten (C). Die Pellets werden während der Förderversuche aus der Schnecke in einen auf der Waage stehenden Eimer abgeworfen. Die kumulative Masse an abgeworfenen Pellets wird von der Waage automatisch im Sekundentakt von der Messdatenerfassung gespeichert. Zudem können die Motordaten des Schneckentors erfasst und gespeichert werden. Hier wurde die eingestellte Spannung am Steuereingang von 0 bis 10 V (diese bestimmt die Drehzahl) sowie die über PWM (Pulsweitenmodulierung) ausgegebene aktuelle Ist-Drehzahl des Motors erfasst und ebenfalls sekundlich gespeichert.

Die Durchführung der Förderversuche erfolgte immer an 5 kg Pellets des jeweiligen Pelletsortiments. Um den Feinanteil, der durch das Fördern der Pellets entsteht, quantifizieren zu können, wurden die 5 kg Proben vor und nach den Förderversuchen mit einem 5,6 mm und einem 3,15 mm Sieb abgesiebt und die jeweiligen Anteile an der Gesamtprobe erfasst. Für jede Schnecke und jedes untersuchte Pelletsortiment wurde ein Vorversuch durchgeführt, bei dem die Pellets bei verschiedenen Schneckendrehzahlen ausgelagert wurden, um die richtige Einstellung für Nennlast (6 kW bzw. 1,37 kg/h) und 30 % Teillast (1,8 kW, ca. 0,57 kg/h) zu bestimmen. Anschließend wurden Versuche bei Nennlast und Teillasteinstellung durchgeführt und bewertet. Es wurden mehrere Pelletsortimente untersucht, um neben dem Einfluss der Schneckengeometrie auch den Einfluss der Pelletlänge und der mechanischen Festigkeit zu untersuchen (Tabelle 14).

Tabelle 14: Überblick über die in Förderversuchen untersuchten Pelletsortimente und die dabei verwendeten Schneckentypen

Pelletsortiment	Zielgröße	Eingesetzte Schnecken
Referenz ENplus A1	Untersuchung der Schneckentypen	42-42 kurz, 42-42 kurz Spirale in 56 mm-Trog, 42-42 kurz Spirale, 56-40 kurz, 56-40 kurz rostig, 56-40 lang, 56-56 lang Alle bei Nenn- und Teillast
Fichtenpellets: lang (34 mm), mittel (24 mm), kurz (14 mm)	Untersuchung zum Einfluss der Pelletlänge	42-42 kurz, 56-40 kurz
Birkenpellets mit niedriger mechanischer Festigkeit	Untersuchung zum Einfluss der mechanischen Festigkeit	42-42 kurz, 56-40 kurz
Fichtenpellets mit zusätzlichem Feinanteil (10 m-%)	Untersuchung des Verhaltens bei hohem Feinanteil	56-40 kurz

Die Bewertung erfolgte zu Beginn der Versuche über drei Parameter. Die Gleichmäßigkeit der Beschickung, d.h. wie gleichmäßig fallen die Pellets über die Zeit aus der Schnecke und wie groß sind dabei die einzelnen Abwurfgewichte (mehrere Pellets gleichzeitig oder gut vereinzelt). Der Feinanteil nach dem Förderversuch, aufgeteilt in Feinanteil im Eimer und Feinanteil verbleibend in der Schnecke. Und die Pelletlängenverteilung der Pellets vor und nach dem Förderversuch, bestimmt mittels Bildanalyse des TFZ (Haver & Boecker OHG, Haver CPA 4 Conveyor). Hierdurch sollte festgestellt werden, wie stark die Pellets brechen und in welche Längensklassen. Die Bestimmung der Längenverteilungen wurde bei den späteren Versuchsreihen weggelassen.

Um die Gleichmäßigkeit der Beschickung über die gesamte Dauer des Förderversuches mit 5 kg (Nennlast ca. 4 h, Teillast ca. 10 h) gut quantifizieren zu können, wurde eine relative massenbezogene Häufigkeitsverteilung der Abwurfgewichte bestimmt. Dafür wurden die gemessenen Abwurfgewichte in drei Gruppen zusammengefasst (0 – 2 g, 2 – 5 g und 5 – 20 gw). Für eine möglichst gleichmäßige Beschickung mit niedrigen Emissionsspitzen wäre ein Maximum der Abwürfe im der Gruppe 0 – 2 g, also möglichst kleine Brennstoffmengen pro Abwurf zu präferieren. Je niedriger die Leistung der Feuerung oder der gewählten Leistungsstufe, desto entscheidender ist eine kontinuierliche Beschickung mit möglichst niedrigen Abwurfgewichten. Das Abwurfgewicht wurde bestimmt, indem von dem sekundlich aufgezeichnete Waagensignal jeweils das Waagensignal der letzten Sekunde davor abgezogen wurde. Abbildung 31 zeigt die massenbezogene Häufigkeitsverteilung für die durchgeführten Förderversuche bei Nennlast- und Abbildung 32 für die Teillasteinstellung des Brennstoffmassenstroms. Vergleicht man zunächst die Häufigkeitsverteilung der Abwurfgewichte der untersuchten Schneckentypen bei Nennlasteinstellung und Teillasteinstellung, so fällt auf, dass sich bei Teillasteinstellung die Abwurfgewichte im Vergleich zur Nennlasteinstellung bei allen untersuchten Schnecken tendenziell in Richtung der 0 – 2 g Gruppe verschieben. Sowohl in der 2 – 5 g Gruppe als auch in der 5 – 20 g Gruppe nahmen die Häufigkeiten bei Teillast dagegen für alle untersuchten Schnecken ab. Zudem ist der zeitliche Abstand der Abwürfe im zeitlichen Verlauf (nicht dargestellt, siehe Präsentation im Anhang) bei Teillast deutlich höher, d. h. die Abwürfe erfolgten langsamer.

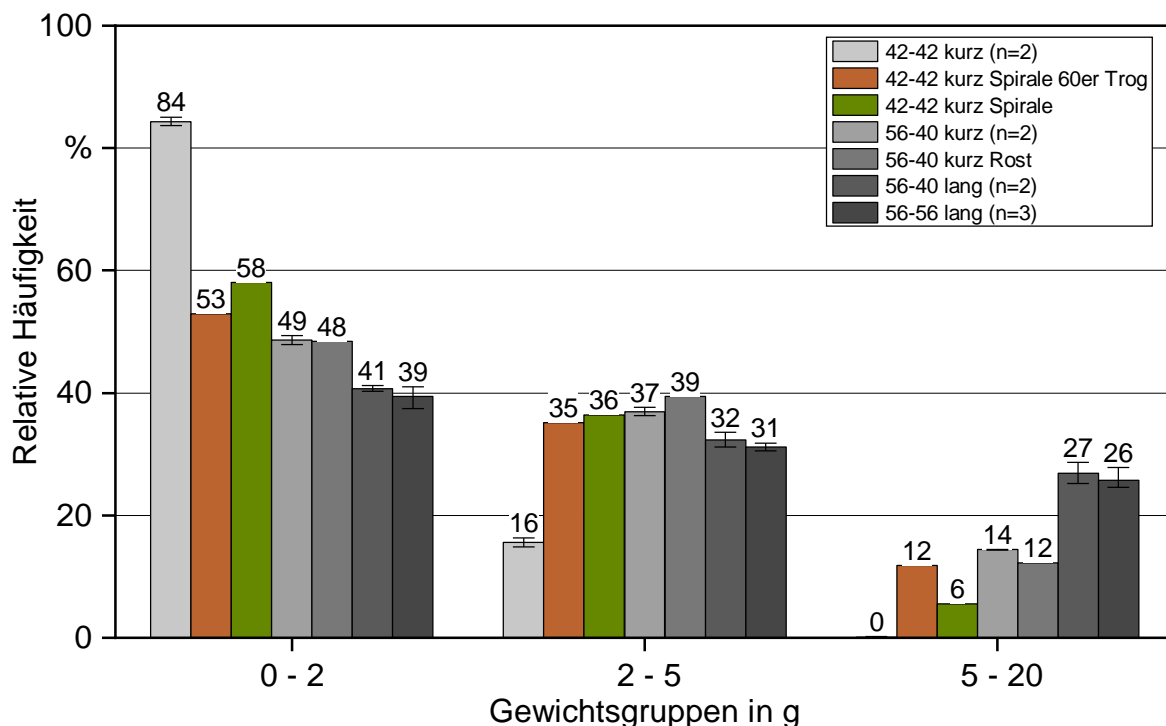


Abbildung 31: Massenbezogene Häufigkeitsverteilung der Abwurfgewichte über die Förderversuche bei Nennlasteinstellung mit verschiedenen Schnecken

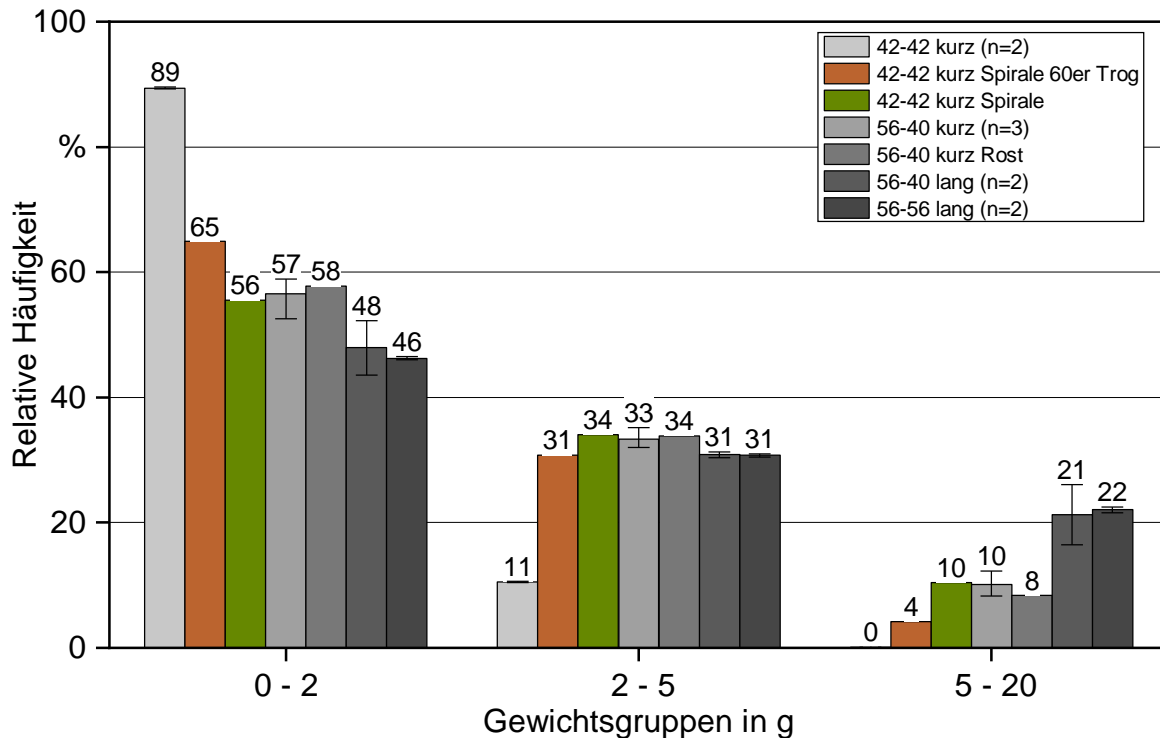


Abbildung 32: Massenbezogene Häufigkeitsverteilung der Abwurfgewichte über die Förderversuche bei Teillasteinstellung mit verschiedenen Schnecken

Die Schnecke mit 42 mm Durchmesser (42-42 kurz) zeigte als einzige der untersuchten Schnecken einen deutlichen Unterschied bei den Abwurfgewichten. Hier verschoben sich die Abwürfe eindeutig in Richtung der 0 – 2 g Gruppe mit 84 % (NL) bis 89 % (TL). Die Häufigkeit der Abwürfe in der 2 – 5 g Gruppe sank auf 16 % (NL) bzw. 11 % (TL) und Abwürfe über 5 g kamen gar nicht mehr vor. Die 42 mm-Varianten als Spirale ausgeführt bringen dagegen nur geringfügige Vorteile gegenüber den 56 mm-Schnecken. Die 42 mm-Spirale im 46 mm Trog (42-42 kurz Spirale) zeigte zwar auch noch einen nennenswerten Shift in Richtung der kleineren Abwurfgewichte, allerdings kam es bei den Förderversuchen zu erheblicher Geräuschentwicklung in Form von Quietschen und Knacken durch Pellets, die sich zwischen der flexibleren Spirale und der Trogwand verklemmt hatten. Deshalb wurden zusätzlich Versuche mit der 42 mm-Spirale im 60 mm Trog durchgeführt. Hier waren zwar die Geräusche weitgehend vermieden, aber auch der Effekt auf die Abwurfgewichte gegenüber den Schnecken mit 56 mm Durchmesser nur noch gering. Hierzu muss auch die Schwankungsbreite bei Versuchswiederholung berücksichtigt werden. Diese lag bei Stichprobenhaften Doppelbestimmungen im Bereich von 0,5 – 6 % (in einem Ausnahmefall sogar bei 9,5 %) in den jeweiligen Gewichtsguppen.

Bei den 56 mm-Schnecken konnte gezeigt werden, dass die Steigung der Schnecke sowie die Oberflächenrauigkeit durch Rost, keinen großen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Beschickung hat, die Länge der Schnecke dahingegen schon. Für eine gleichmäßigere Beschickung mit niedrigeren Abwurfgewichten scheint eine kürzere Schnecke, die vor dem Abwurfenster des Trogs endet, einen positiven Effekt zu haben. Eine längere Schnecke, die die Pellets aktiv über das Abwurfenster schiebt, begünstigt dagegen höhere Abwurfgewichte. Hier liegen die Unterschiede zwischen kurz und lang bei der Gewichtsguppe 5 – 20 g im Schnitt bei rund 15 % und in der Gruppe 0 – 2g im Schnitt bei 11 – 12 % und damit deutlich über der Schwankungsbreite der üblichen Wiederholgenauigkeit.

Die Feinanteile < 3,15 mm und < 5,6 mm („grober Feinanteil“, 3,15 – 5,6 mm) sind für die Nennlasteinstellung in Abbildung 33 und für die Teillasteinstellung in Abbildung 34 dargestellt. Da die Pellets vor den Förderversuchen abgeseibt wurden, ist im Folgenden immer der bei der Förderung zusätzlich entstehende Feinanteil dargestellt. Der Feinanteil im Ausgangsmaterial lag im Mittel über alle untersuchten Proben bei 0,14 m-% (< 3,15 mm) bzw. 0,06 m-% (3,15 – 5,6 mm). Zwischen Nennlast- und Teillasteinstellung waren bei den Feinanteilen keine signifikanten Unterschiede erkennbar. Die 42 mm-Schnecke mit Welle (42-42 kurz) führte gegenüber den Schnecken mit 56 mm zu einer signifikanten Erhöhung des Feinanteils, sowohl in der < 3,15 mm als auch in der 3,15 bis 5,6 mm Fraktion. Der Feinanteil lag in der Nennlasteinstellung mit 3,4 m-% ca. 5,7-mal und in der Teillasteinstellung mit 2,9 m-% ca. 4,8-mal höher als im Mittel über die Schnecken mit 56 mm. Beim groben Feinanteil ist es ebenfalls das 5 bis 5,7-fache. Dies stellt einen erheblichen Nachteil der 42 mm-Schnecke mit durchgehender Welle dar, da bei den Versuchen mit zusätzlichem Feinanteil im Projekt FuturePelletSpec 1 bei 3 m-% bereits eine erhebliche Erhöhung der CO- und OGC (organische gasförmige Kohlenwasserstoffe), sowie eine leichte Erhöhung der Staubemissionen beobachtet wurde.

Bei den Versuchen mit der 42 mm-Spirale (ohne durchgehende Welle) lag der Feinanteil dagegen nur geringfügig höher als bei den 56 mm-Schnecken. Im passenden Trog lag eine mittlere Erhöhung von 80 % bei Nennlast- und 67 % bei Teillasteinstellung vor. Der grobe Feinanteil lag bei der 42 mm-Spirale ca. doppelt bis dreimal so hoch wie im Mittel der 56 mm-Schnecken. Im 60 mm-Trog lag der Feinanteil nur noch ca. 30 % höher für die Nennlasteinstellung und ca. 17 % höher für die Teillasteinstellung. Der grobe Feinanteil lag hier auf einem vergleichbaren Niveau mit den 56 mm-Schnecken. Bei dieser Konfiguration fiel zudem auf, dass sich ein erheblicher Anteil des Feinanteils in der Schnecke akkumulierte und nicht mit den Pellets ausgetragen wurde. Dies könnte zur Geräuschentwicklung und langfristig zu einem erhöhten Verschleiß beitragen. Bei den Schnecken mit 56 mm lagen die Feinanteile auf einem ähnlichen Niveau zwischen 0,5 und 0,7 m-% und beim groben Feinanteil zwischen 0,2 und 0,3 m-%. Angesichts der Schwankungsbreiten waren diese Unterschiede nicht signifikant.

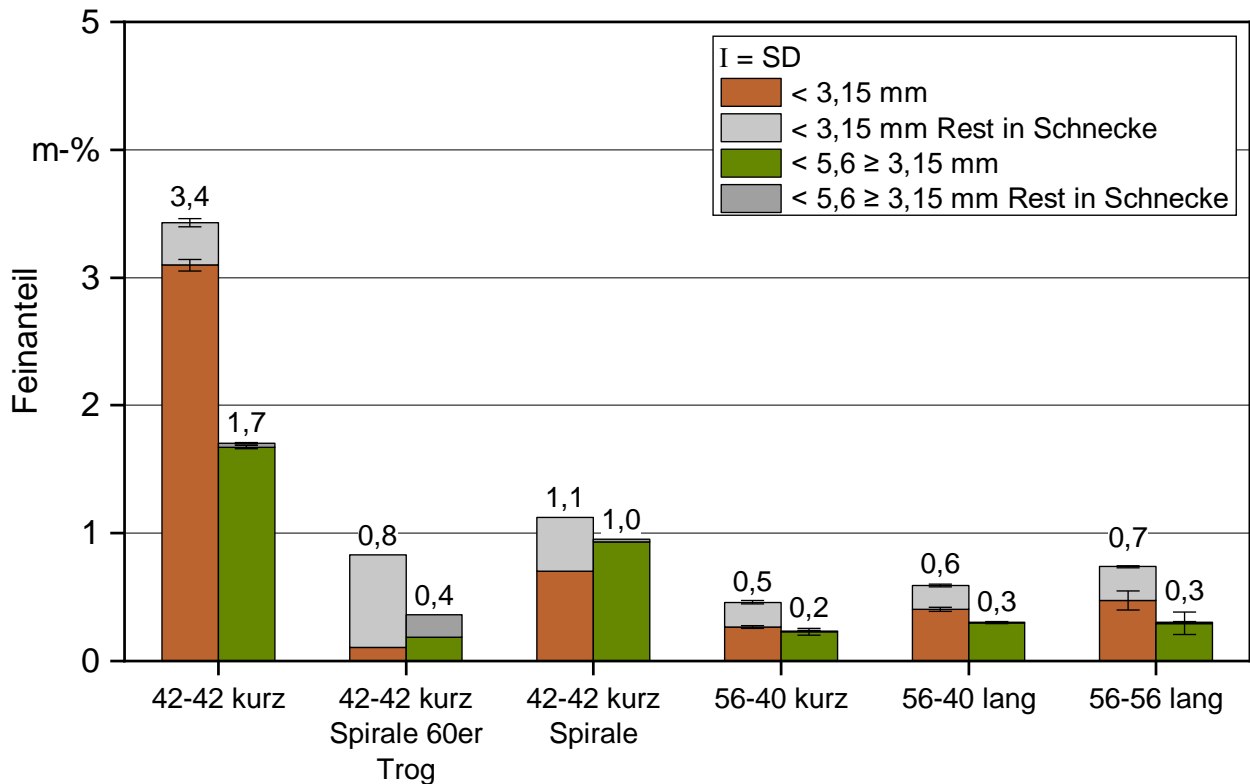


Abbildung 33: Vergleich der Feinanteile (< 3,15 mm) und der groben Feinanteile (3,15 – 5,6 mm) der Förderversuche mit den untersuchten Schneckentypen bei Nennlasteinstellung. Pellets zuvor abgesiebt, d.h. dargestellt ist der durch die Förderung zusätzlich entstehende Feinanteil.

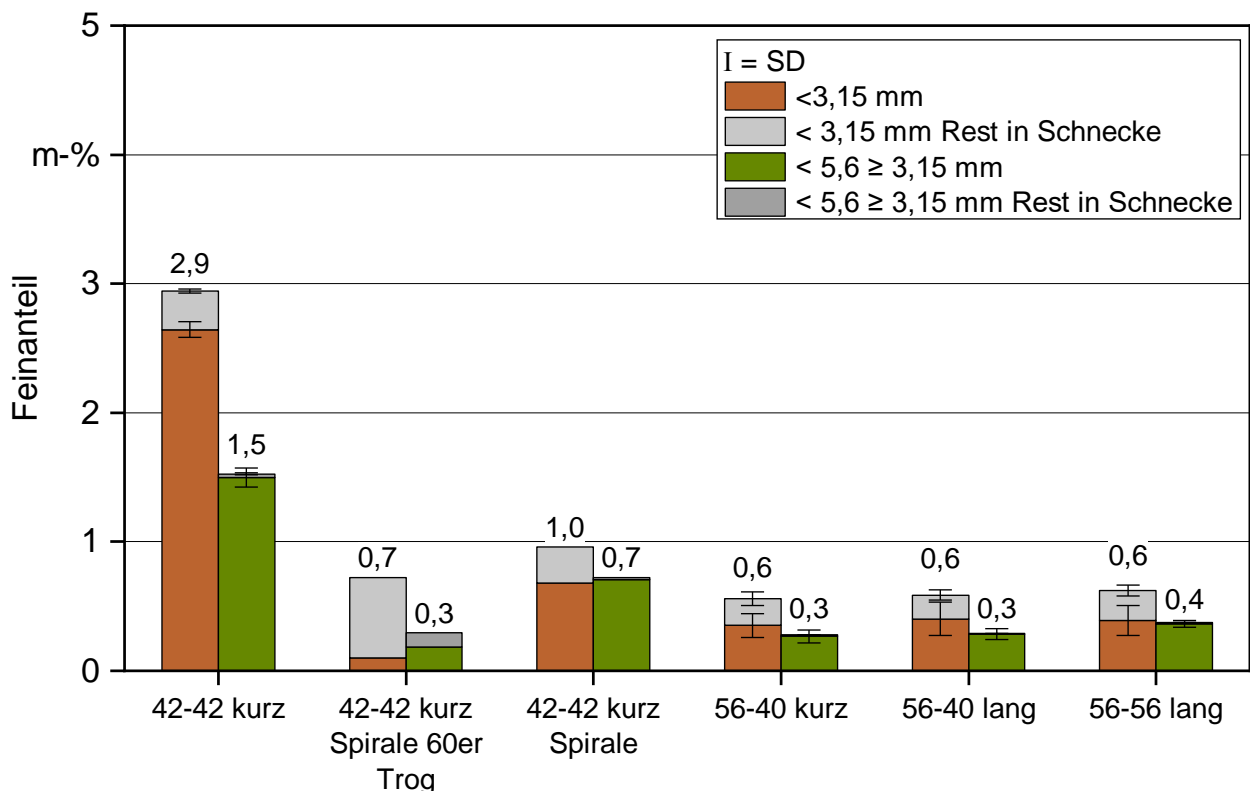


Abbildung 34: Vergleich der Feinanteile < 3,15 mm und < 5,6 mm (3,15 – 5,6 mm) der Förderversuche mit den untersuchten Schneckentypen bei Teillasteinstellung. Pellets zuvor abgesiebt, d.h. dargestellt ist der durch die Förderung zusätzlich entstehende Feinanteil.

Zusätzlich zum Feinanteil wurde versucht, die Änderung der Pelletlängenverteilung (Pelletbruch) durch die Förderung zu bestimmen. Hierzu wurde die Pelletlängenverteilung des Ausgangsmaterials vor dem jeweiligen Förderversuch, sowie des geförderten Materials mittels der am TFZ verfügbaren Bildanalyse (Haver & Boecker OHG, Haver CPA 4 Conveyor) bestimmt. Abbildung 35 zeigt die Differenz der Längenverteilung vor und nach

dem Förderversuch für die Versuche bei Nennlasteinstellung und Abbildung 36 die Differenz bei Teillasteinstellung. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Bestimmung der Längenverteilung mittels Bildanalyse eine größere Unsicherheit (insbesondere bei kurzen Pellets [4]) mit sich bringt und zudem die Größenverteilung des Ausgangsmaterials von einer 5 kg Probe zur nächsten natürliche Schwankungen unterliegt. Dies resultiert in einer relativ großen Gesamtunsicherheit der Ergebnisse. Dennoch geht aus den Ergebnissen eindeutig hervor, dass beim Einsatz der 42 mm-Schnecke mit durchgehender Welle (42-42 kurz) ein größerer Anteil an Pellets > 20 mm gebrochen und in die Fraktionen 10 – 20 mm sowie 0 – 10 mm verschoben wird. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen beim Feinanteil und zeigt sich sowohl bei Nennlast- als auch bei Teillasteinstellung. Die 42 mm-Schnecken in Ausführung als Spirale sowie die 56 mm-Schnecken wiesen relativ vergleichbare Änderungen der Längenverteilungen auf. Tendenziell erwecken die Ergebnisse den Anschein, als würde bei der Schnecke 56-56 lang auch noch ein größerer Anteil an Pellets > 20 mm gebrochen. Dies könnte eventuell durch Pellets, die über das Abwurfenster nach oben transportiert und im oberen Bereich des Trogs am Ende der Schnecke gebrochen werden begründet sein. Andererseits müsste dies dann auch bei der Schnecke 56-40 lang zu beobachten sein, was nicht der Fall war.

Wegen der erheblichen Unsicherheiten wurde für die weiteren Versuchsfragen bei den Förderversuchen zum Einfluss der Pelletlänge sowie der mechanischen Festigkeit auf die Bestimmung der Pelletlängenverteilung vor und nach Förderversuch verzichtet. Zudem wurden die weiteren Versuche nur noch bei Nennlasteinstellung durchgeführt und die Schneckenvarianten in Absprache mit den Projektpartnern stark eingegrenzt. Wegen des bereits bei 42 mm Schneckendurchmesser beobachteten starken Pelletbruch und Feinanteil wurde auf Förderversuche mit den 32 mm Schnecken verzichtet.

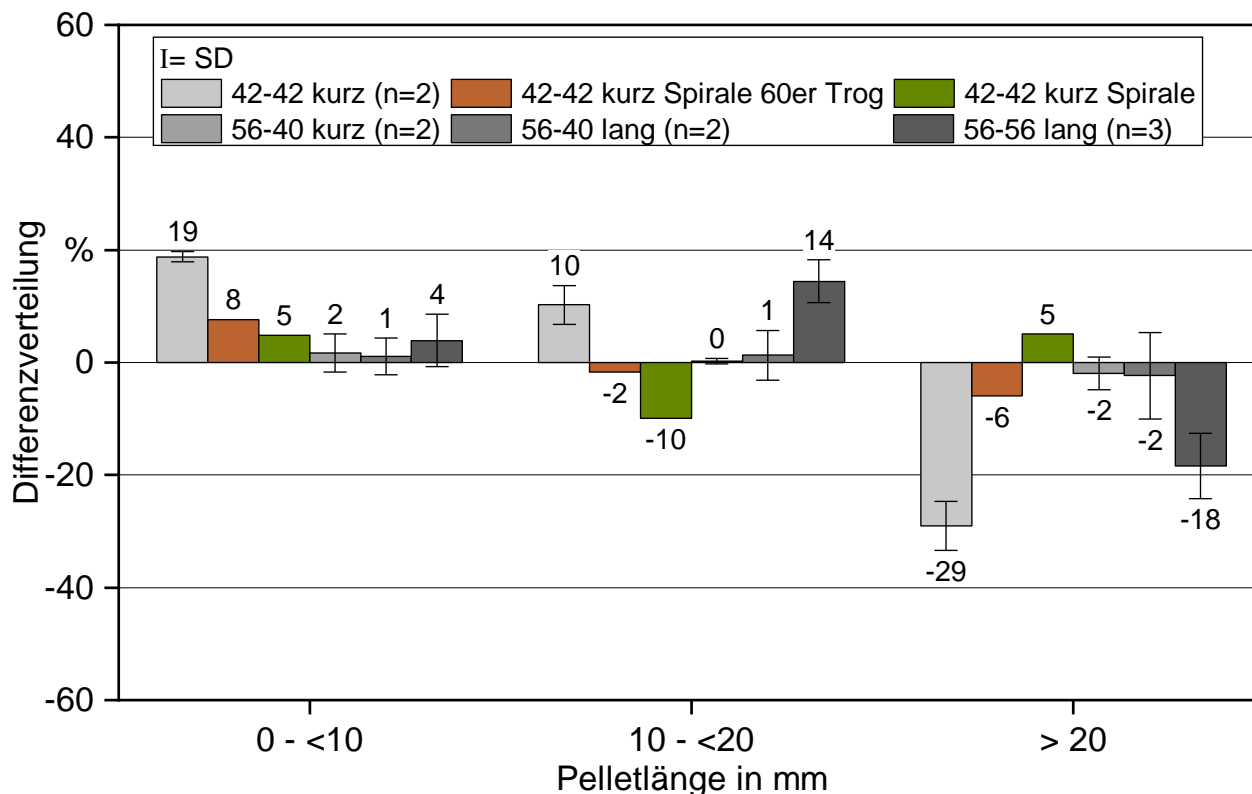


Abbildung 35: Differenzverteilung (Ausgangsmaterial – gefördert Material) der Pelletlängen bei Nennlasteinstellung mit den untersuchten Schneckentypen

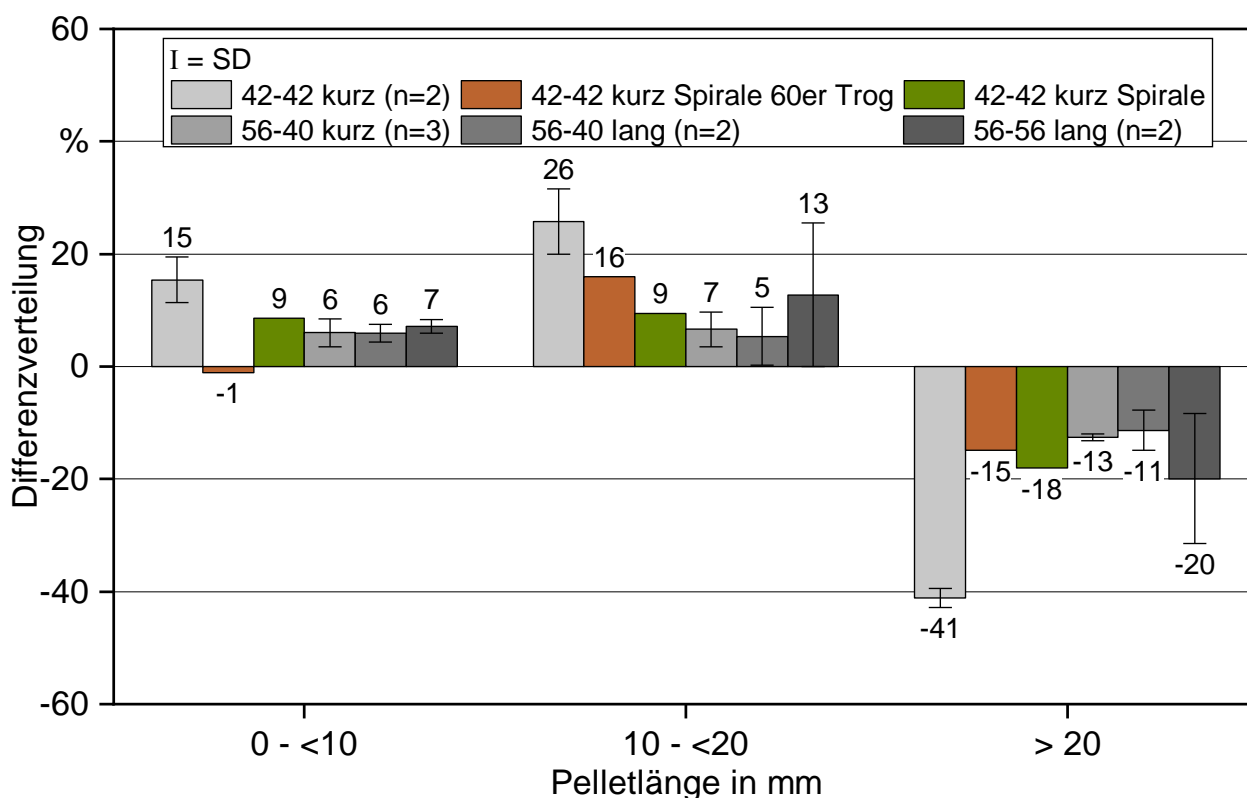


Abbildung 36: Differenzverteilung (Ausgangsmaterial – gefördert Material) der Pelletlängen bei Teillasteinstellung mit den untersuchten Schneckentypen

Die Pelletlänge im Ausgangsmaterial scheint bei Verwendung der 42 m-Schnecke keinen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Beschickung zu haben (Abbildung 37). Hier wurde der gleiche Effekt beobachtet wie mit den ENplus Referenzpellets. Unabhängig von der Längenverteilung des Ausgangsmaterials verschoben sich die Abwurfgewichte im Vergleich zur 56 mm-Schnecke eindeutig in Richtung der kleineren Gewichtsklassen, d.h. die Beschickung wurde gleichmäßiger. Dies verhielt sich für alle drei untersuchten Längenverteilungen näherungsweise gleich.

Auch bei der Verwendung von Pellets mit geringer mechanischer Festigkeit (hier Birke) ergaben sich keine Unterschiede hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Beschickung im Vergleich mit den Referenzpellets. Größere Abwurfgewichte (5 – 20 g) traten bei Verwendung der 42 mm-Schnecke in keinem Fall auf (< 0,5 %). Auch bei einem Schneckendurchmesser von 56 mm sind die Unterschiede zwischen den untersuchten Längenverteilungen gering. Lediglich bei den langen Pellets schienen die hohen Abwurfgewichte im Vergleich zu den mittleren und kurzen Pellets etwas erhöht zu sein. Die Abwurfgewichte der Referenzpellets lagen dabei sehr ähnlich zu den Abwurfgewichten der langen Pellets. Dies deckt sich mit den gemessenen Längenverteilungen der Ausgangsmaterialien. Auch hier führte die Verwendung von Pellets mit niedriger mechanischer Festigkeit (Birke) zu keinen wesentlichen Änderungen. Bei dem Förderversuch mit 10 % zusätzlich hinzugefügtem Feinanteil hingegen verschob sich die Häufigkeit der Abwürfe eindeutig in Richtung der 0 – 2 g Gewichtsguppe. Dies legt nahe, dass der Feinanteil gleichmäßig ausgetragen wird und sich nicht im Pellettank akkumuliert und schwallweise gegen Ende ausgetragen wird. Dies widerlegt teilweise die Interpretation der Beobachtungen aus Teil 1 des Projekts [4], bei dem dieses Verhalten bei Feuerungsversuchen mit zusätzlichem Feinanteil an einer Feuerung beobachtet wurde. Der Grund für die Unterschiede könnte in der Ausführung des Pelletbehälters begründet sein, der, je nachdem wie steil die Seitenwände des Pelletbehälters an der Einmündung zum Schneckenrog gefertigt sind, das Akkumulieren von Feinanteil entweder begünstigt (flachere Ausverteilung) oder verhindert (steilere Ausfertigung).

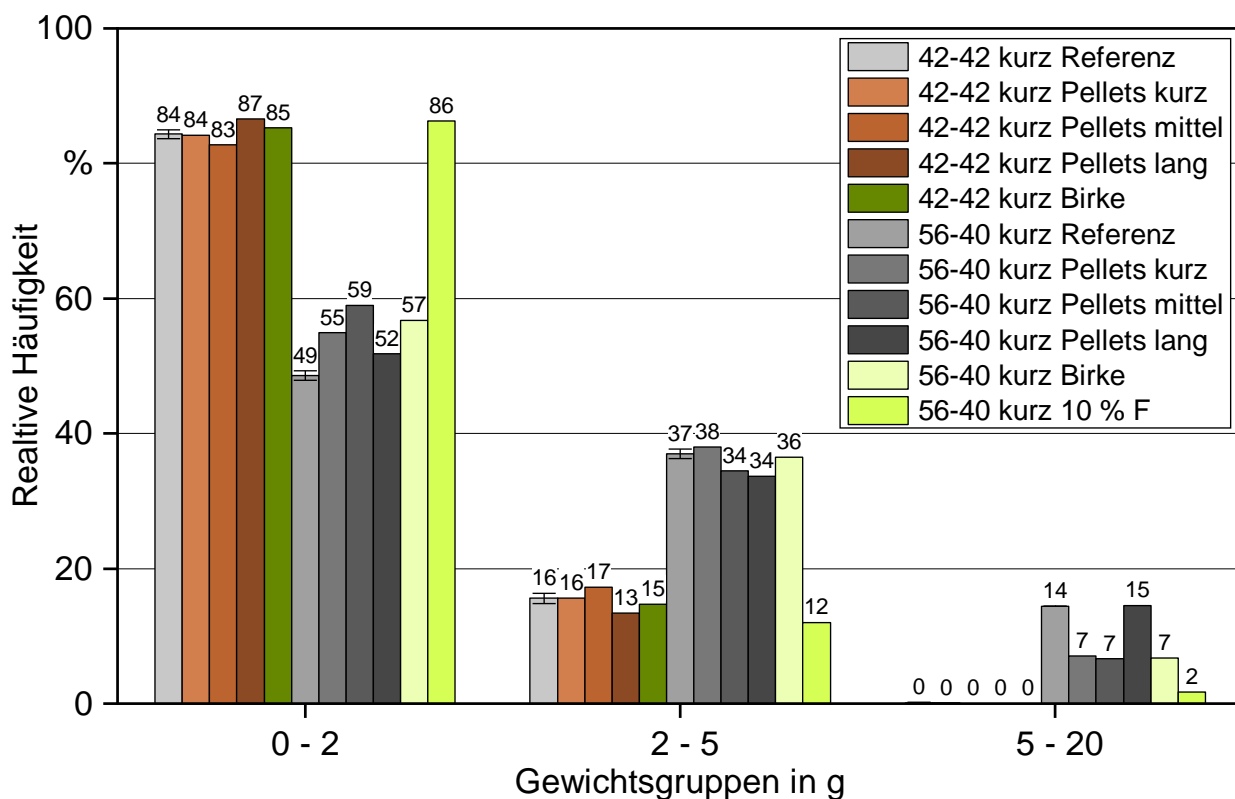


Abbildung 37: Massenbezogene Häufigkeitsverteilung der Abwurfgewichte über die Förderversuche bei Nennlasteinstellung mit verschiedenen Pelletlängen, Pellets mit niedriger mechanischer Festigkeit (Birke) und 10 % zusätzlichem Feinanteil, in den Schneckentypen 42-42 kurz und 56-40 kurz.

Hinsichtlich des Feinanteils und des groben Feinanteils scheint die Pelletlänge bei beiden Schneckendurchmessern erst ab einer gewissen Pelletlängenverteilung einen Einfluss zu haben. Für die kurzen Pellets (Durchschnittslänge 14 mm) und die mittleren Pellets (24 mm) waren die Feinanteile vergleichbar. Bei der 42 mm-Schnecke lagen die Feinanteile gegenüber den Referenzpellets ca. 1 m-% niedriger, beim groben Feinanteil auf einem vergleichbaren Niveau. Bei den langen Pellets (24 mm) erhöht sich der Feinanteil gegenüber der Referenz um 0,6 m-% und gegenüber den kurzen und mittleren Pellets um 1,6 – 1,8 m-%. Der grobe Feinanteil erhöht sich ebenfalls um 0,6 m-% gegenüber der Referenz und um 0,7 – 0,8 m-% gegenüber den kurzen und mittleren Pellets. Bei der 56 mm-Schnecke unterschieden sich die Feinanteile der kurzen und mittleren Pellets im Rahmen der Messunsicherheit nicht von der Referenz. Bei den langen Pellets hingegen kommt es ca. zu einer Verdopplung des Feinanteils auf 1,2 m-% und einer Zunahme des groben Feinanteils um 0,1 – 0,3 m-%. Bei den untersuchten Birkenpellets mit niedriger mechanischer Festigkeit kam es widererwarten zu keinem nennenswerten Anstieg des Feinanteils gegenüber der Referenz. Bei der 42 mm-Schnecke lag dieser sogar nur bei ca. einem Drittel des Werts der Referenz. Dies liegt vermutlich daran, dass die Birkenpellets aufgrund der niedrigen mechanischen Festigkeit vergleichsweise kurz waren (im Mittel 7,5 mm) und einen sehr hohen Anteil an Pellets < 10 mm aufwiesen (77 m-%, vgl. Tabelle 5). Auch der grobe Feinanteil lag mit 1,0 m-% bei der 42 mm-Schnecke niedriger als bei den Referenzpellets. Bei der 56 mm-Schnecke ist der Feinanteil der Birkenpellets identisch mit der Referenz, der grobe Feinanteil

allerdings 5-mal so hoch. Dies spricht im Fall der 56 mm-Schnecke doch für einen gewissen Abrieb. Bei dem Versuch mit ca. 10 m-% zugefügtem Feinanteil kam es zu keiner weiteren Zunahme des Feinanteils während des Förderversuchs. In Summe kamen der Feinanteil und der grobe Feinanteil sogar nur auf 8,6 m-%. Hier kam es eventuell während des Siebens der Probe zu Verlusten.

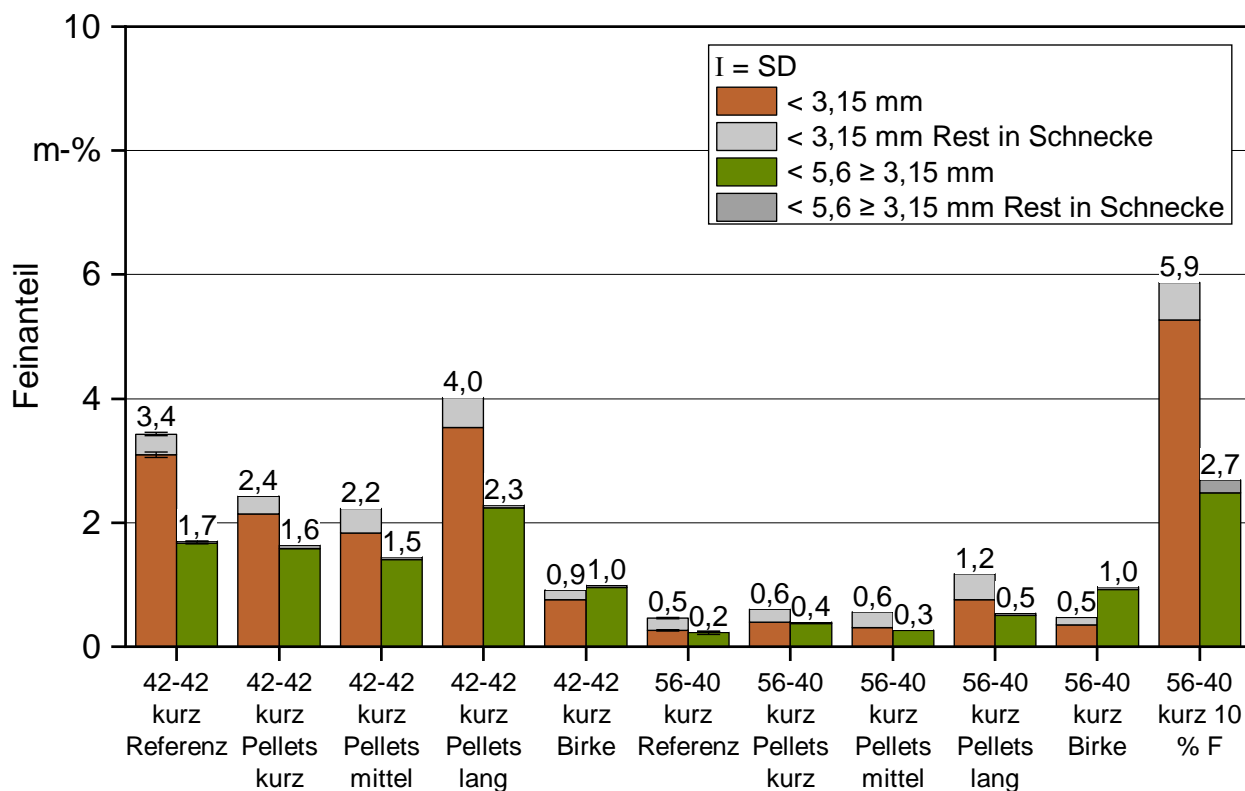


Abbildung 38: Feinanteil (< 3,15 mm) und grober Feinanteil (3,15 – 5,6 mm) der Förderversuche bei Nennlasteinstellung mit verschiedenen Pelletlängen, Pellets mit niedriger mechanischer Festigkeit (Birke) und 10 % zusätzlichem Feinanteil, in den Schneckentypen 42-42 kurz und 56-40 kurz.

Sehr deutlich war der Einfluss auf die Förderrate: Je kleiner die Pellets sind, desto höher war die Förderrate (Abbildung 39). Eine wie hier dargestellte, in der Praxis übliche Änderung der Pelletlängenverteilung resultiert im Extremfall (lang zu kurz) in einer Änderung des Brennstoffmassenstroms von ca. 1,2 kg/h auf 1,6 kg/h. Dieser Unterschied von 0,4 kg/h entspricht bei einem durchschnittlichen Heizwert von Holzpellets von ca. 4,8 kWh/kg einer Schwankung in der Brennstoffleistung von 1,9 kW. Im Fall einer 6 kW Feuerung entspricht dies 32 % der Nennwärmeleistung. Bei wechselnden Pelletlängen stellt dieser ausgeprägte Zusammenhang für die Brennstoffmengensteuerung des Pelletofens eine größere technische Herausforderung dar. Das Dämpfen von Schwankungen bei der pelletlängenabhängigen Fördermenge ist ein wesentliches Erfolgskriterium für eine hohe Brennstoffflexibilität eines Pelletofens.

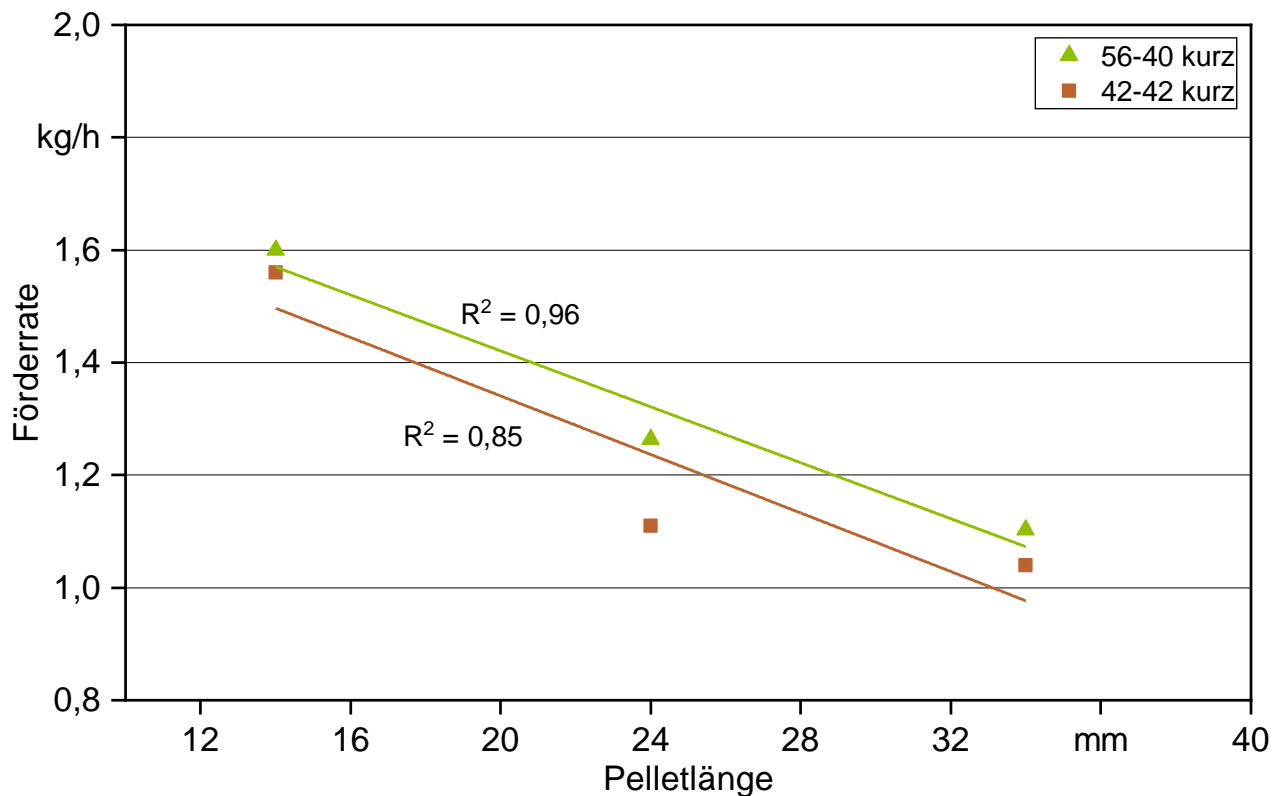


Abbildung 39: Förderaten der 42 mm und 56 mm Schnecke bei gleicher Drehzahl (Nennlasteinstellung) für die untersuchte Variation der Pelletlänge.

Gesamtbewertung der Förderversuche:

Der zusätzliche Feinanteil durch das Fördern in der Schnecke lag über alle Versuche bei 0,5 - 3,5 m-% (< 3,15 mm), der grobe Feinanteil bei 0,2 - 1,7 m-% (3,15 - 5,6 mm). Dieser zusätzliche Feinanteil wird im Wesentlichen durch die Schneckengeometrie, d.h. dem freien Querschnitt zwischen Trog und Schnecke beeinflusst und weniger von der Pelletqualität. Eine weitere Normprüfung zur mechanischen Festigkeit in Schnecken zusätzlichen zur aktuellen Prüfmethode scheint daher nicht notwendig. Stattdessen kann hier ein fester Faktor in Abhängigkeit des Schneckendurchmessers verwendet werden. Die untersuchten Schnecken wiesen in Abhängigkeit des Durchmessers teilweise erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Beschickung und des zusätzlich erzeugten Feinanteils auf. Günstige Kombinationen aus kleinem Schneckendurchmesser mit größerem Trog-Durchmesser oder die Verwendung „seelenloser“ Spiralen konnten die Nachteile kleinerer Schneckendurchmesser und damit einhergehend verstärktem Pelletbruch teilweise kompensieren, wiesen aber unter Umständen negative Eigenschaften hinsichtlich einer erhöhten Geräuschentwicklung auf. Diese lassen sich eventuell durch weitere technische Optimierung vermindern oder ganz vermeiden. Ein Schneckenprüfstand, wie hier verwendet, stellt somit ein wertvolles Werkzeug zur Optimierung bestehender Pelletofen-Konzepte sowie für Neuentwicklungen dar.

Arbeitspaket 3: Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbettabbrandmodells

a) Praxisüberführung des Abbrandmodells aus FuturePelletSpec 1 samt Gasphasenverbrennungsmodell

Zu Beginn wurde das im Projektteil 1 entwickelte Abbrandmodell samt Kopplung mit dem Gasphasenverbrennungsmodell für den Praxiseinsatz tauglich gemacht. Dazu wurden in einem ersten Schritt, um die Genauigkeit der Ergebnisse sicherzustellen und gleichzeitig den numerischen Aufwand für die Simulationen möglichst gering zu halten, verschiedene Zeitschrittweiten getestet (2, 5 und 10 Sekunden). Des Weiteren wurde, um die Modellierung der Holzkohle-Abbrandphase zu verbessern, die Modellierung der Zusammensetzung der Holzkohle angepasst. Dabei wurde die Aufteilung der relevanten Elemente (C, H, O) auf den Holzkohlenanteil und den Flüchtigenanteil so modifiziert, dass die im Brennstoffbett von Pelletkaminöfen verstärkt ablaufenden Verkokungsreaktionen besser berücksichtigt werden. Das sollte die Umsetzung der Holzkohle verlangsamen und damit einen besseren Abgleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten hinsichtlich der Holzkohlen-Abbrandphase bringen.

Validierungsrechnungen erfolgten, wie schon im Projektteil 1, anhand von Testlaufdaten aus Laborreaktor-Testläufen, die im Projektteil 1 bei BIOS durchgeführt worden waren. Die Validierungsrechnungen zeigten, dass ein Zeitschritt von 10 s im Vergleich zu 5 s und 2 s eine längere Dauer der Freisetzungsphase der Flüchtigen bewirkt, während sich zwischen 5 s und 2 s kaum Unterschiede in den Massenabbaukurven ergeben. Ein kleinerer Zeitschritt führt zusätzlich zu starken numerischen Schwankungen, die insbesondere am Beginn der Freisetzungsphase der Flüchtigen (nach der Zündung) auftreten. Ein Zeitschritt von 5 s garantiert daher bei akzeptablen Berechnungszeiten die bestmögliche Genauigkeit. Diese Zeitschrittweite wurde für alle weiteren Berechnungen beibehalten. Die Validierungsrechnungen mit der angepassten Holzkohlenzusammensetzung zeigten im Vergleich zur früheren Modellvariante eine deutlich bessere Beschreibung des Abbrandes der Holzkohle (bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Massenabbaukurven). Diese Modellierung wurde daher für die nachfolgenden 3D-Simulation gewählt, und soll auch in Zukunft verwendet werden.

Um die Anwendbarkeit des Modells im Allgemeinen Fall einer 3D-Geometrie zu testen, wurde der Laborreaktor ohne Rotationssymmetrie mit einem 3D unstrukturierten Berechnungsgitter simuliert. Die Ergebnisse sind direkt mit den 2D-Simulationen vergleichbar. Die Berechnungen zeigten positive Ergebnisse. So bestätigte sich, dass in zukünftigen Rechnungen eine Zeitschrittweite von 5 s weiterverwendet werden kann. Ein Vergleich der Massenabbaukurven der 2D vs. der 3D-Simulation zeigte eine weitere Verbesserung in der Beschreibung des Holzkohle-Ausbrandes (siehe Abbildung 40).

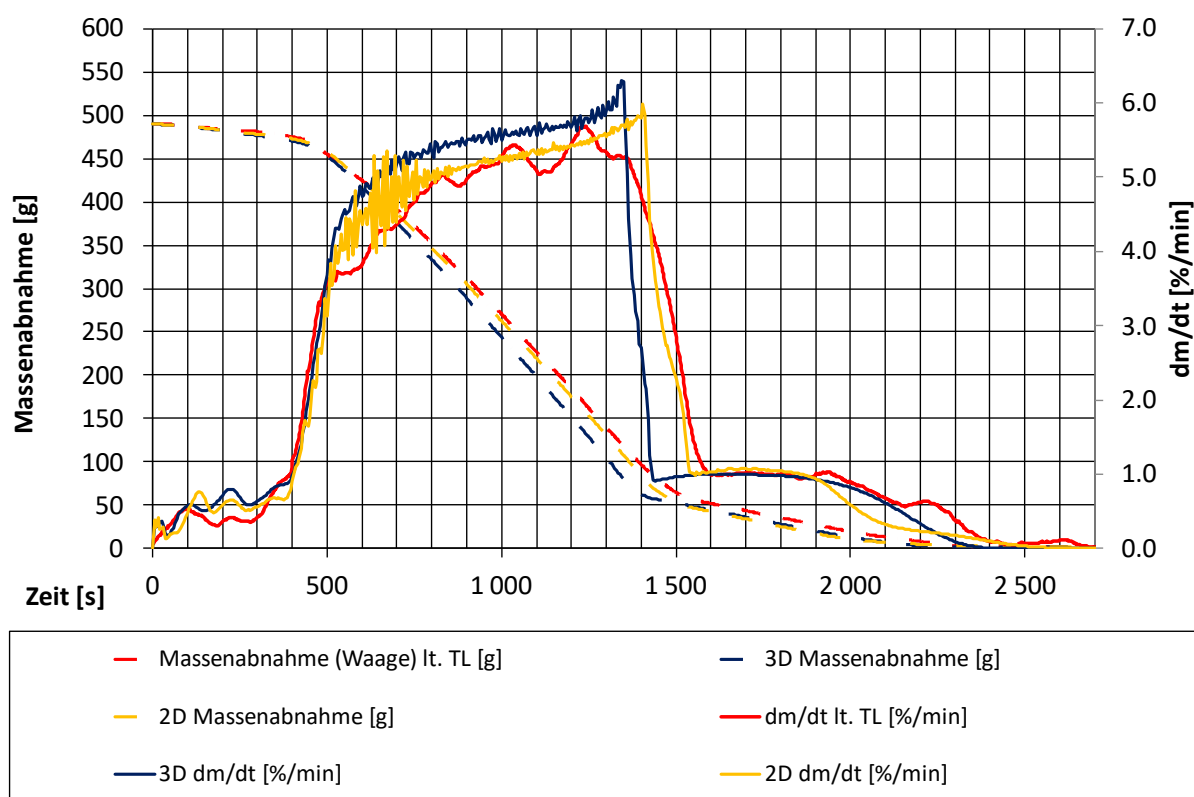


Abbildung 40: Simulation des Massenabbaus beim Abbrand im Laborreaktor – Vergleich der 3D- und der 2D-Simulationen mit den Testlaufergebnissen

Der Grund dafür ist das in der 3D-Simulation verwendete unstrukturierte Berechnungsgitter, das beim Zusammensacken des Bettes keine Beeinflussung der Bewegungsrichtung der Schüttung durch senkrechte Begrenzungen der Berechnungszellen (Wände) mehr aufweist. Dadurch bilden sich keine Auftürmungen an den Wänden, die in der Holzkohle-Ausbrandphase bei 2D-Berechnungen deutlich hervortreten und das Abbrandverhalten negativ beeinflussen. Die Temperaturverläufe an den einzelnen Messpositionen (der experimentellen Vergleichsdaten) sind in der 3D-Simulation deutlich realistischer (alle Trends werden korrekt abgebildet), was ebenfalls auf die realistischere Brennstoffbettform zurückzuführen ist. Auch bzgl. der O₂-Konzentrationen stimmt die 3D-Rechnung deutlich besser mit den Messdaten überein als die 2D-Berechnung (siehe Abbildung 41). Auch hier liegt die Ursache im Berechnungsgitter und der Brennstoffbettform.

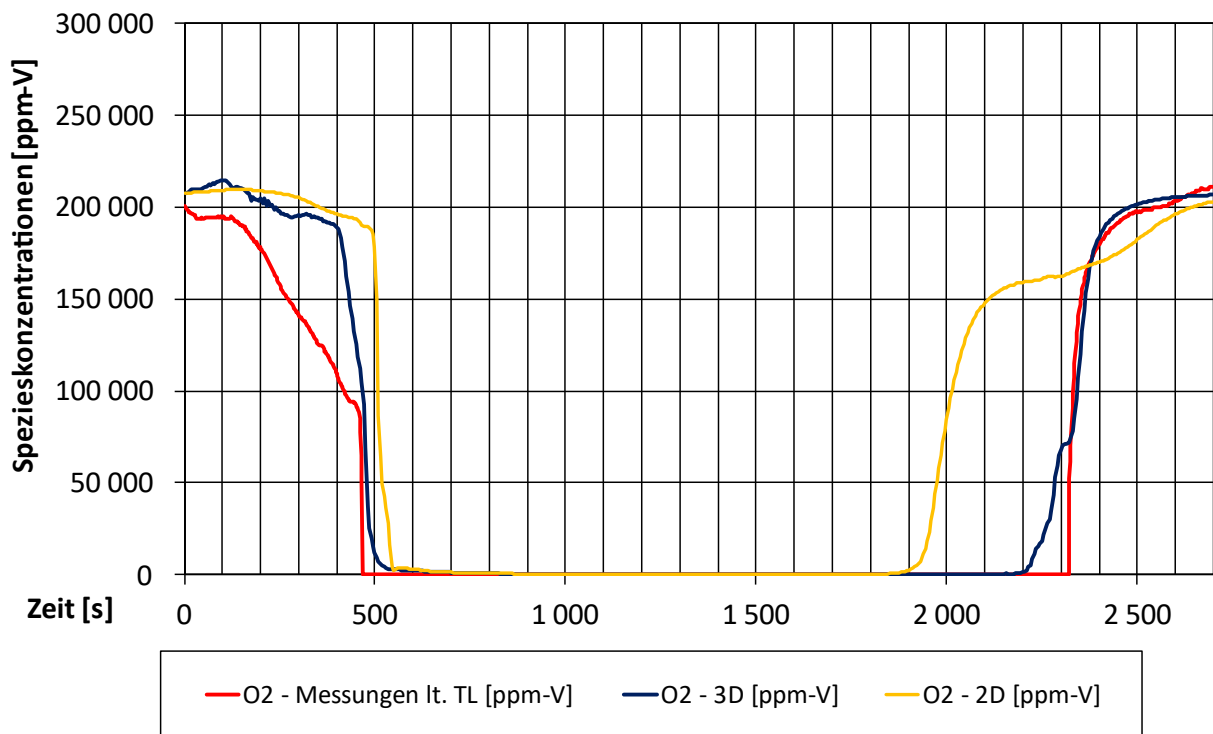


Abbildung 41: Simulation der O₂-Verläufe beim Abbrand im Laborreaktor – Vergleich der 3D- und der 2D-Simulationen mit den Testlaufergebnissen

Das Modell beschreibt somit den Brennstoffabbrand realistisch und wurde nach diesen Validierungsrechnungen von BIOS für den Praxiseinsatz freigegeben. Schlussendlich wurde für die Berücksichtigung der Brennstoffbeschickung ein Algorithmus ergänzt, der das Nachsacken der Schüttung modelliert.

Daraufhin erfolgten erste Abstimmungen zwischen BIOS und Olsberg hinsichtlich der Entwicklung des LEFLEX-Pko. Dabei wurde festgelegt, dass das aktuelle Pelletofenmodell Levana von Olsberg bzgl. prinzipiellem Aufbau und geometrischen Abmessungen die Basis für die Neuentwicklung bilden soll. Dieses „Basiskonzept“ wurde im ersten Schritt von BIOS einer CFD-gestützten Ist-Analyse (mit dem neuen Abbrandmodell) unterzogen. Die Grundlage dafür stellten neben der Geometrie auch die Ergebnisse der im Rahmen von AP 4 am TFZ gemeinsam mit BIOS durchgeführten Testläufe dar (siehe AP 4). Die dort ermittelten Betriebsparameter lieferten die Randbedingungen für die Simulationen. Neben der Ist-Analyse verfolgten die Simulation auch das Ziel, Schwachstellen bzgl. Strömungsverhältnissen, dem Ausbrand, der Luftstufung und hinsichtlich Strähnenbildung aufgrund der Abbrandbedingungen im Brennstoffbett zu identifizieren.

Die Bett-Simulationen zeigten, dass die sich ausbildende Höhe des Pelletbetts deutlich zu gering ist, um eine gute Temperaturschichtung und eine Reduktion von Strähnenbildung zu erreichen. In Abbildung 42 sind die diesbezüglichen Ergebnisse der CFD Simulationen hinsichtlich Brennstoffbetthöhe, Höhe der im Brennstoffbett enthaltenen Holzkohleschicht und Höhe der im Brennstoffbett enthaltenen Ascheschicht dargestellt.

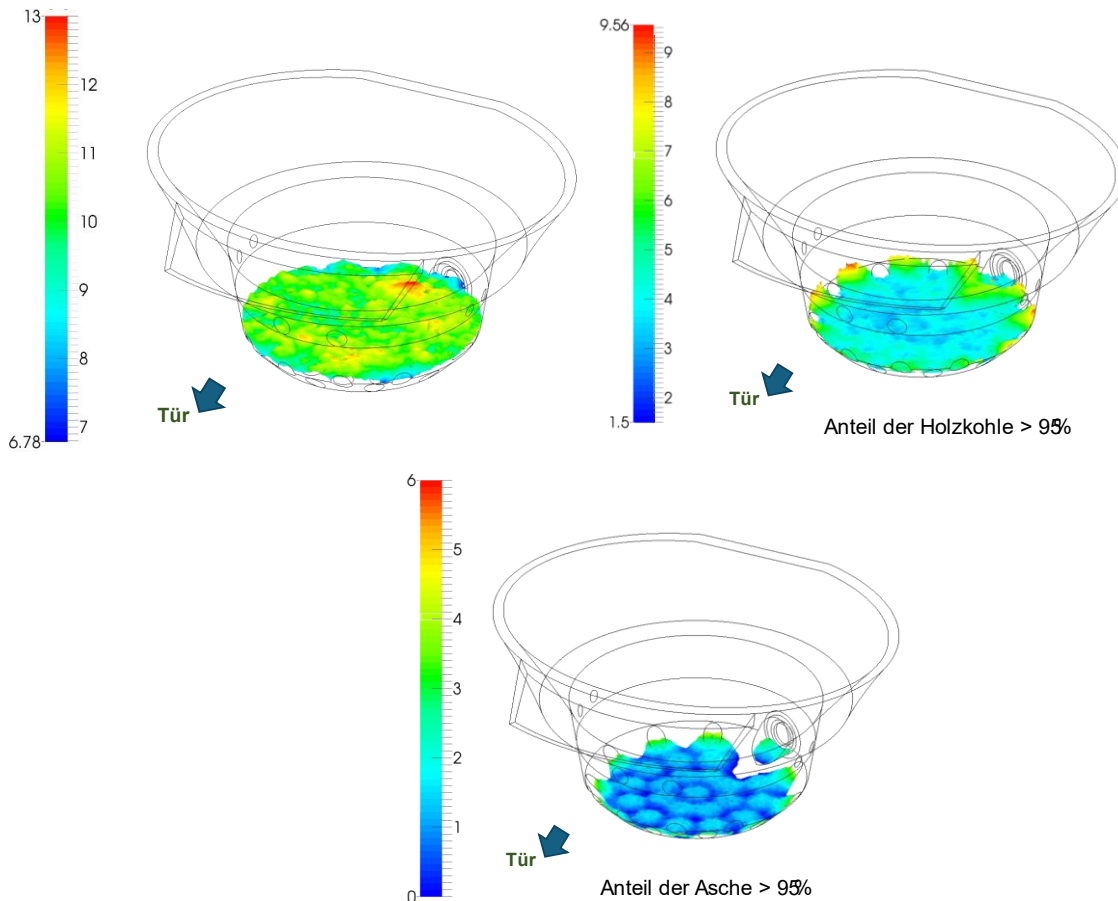


Abbildung 42: Ergebnisse der CFD Ist-Analyse des Basiskonzeptes des LEFLEX-PKo – Brennstoffbetthöhe (oben links), Höhe der Oberfläche der verkohlten Schicht innerhalb des Brennstoffbettes (oben rechts) und Höhe der Ascheschicht innerhalb des Brennstoffbettes (unten) (Höhe in mm)

Es zeigen sich im Brennstoffbett große Gradienten bzgl. der Feststofftemperatur. Der kälteste Bereich befindet sich auf der Oberfläche des Bettes (ca. 25 – 400 °C, da der Brennstoff mit Umgebungstemperatur zugeführt wird und in diesem Bereich die Trocknung und Erwärmung stattfindet). Im Bereich der Holzkohle sind die Temperaturen aufgrund des Ausbrandes am höchsten (rund 1.000 °C). Direkt über dem Rost, wo sich die Asche ansammelt, sinken die Feststofftemperaturen auf 700 – 800 °C, da hier keine Verbrennungsreaktionen mehr stattfinden. Auch die Gastemperaturen zeigen deutliche Gradienten im Brennstoffbett. Die niedrigsten Temperaturen treten direkt beim Eintritt der Primärluft (PL) auf (mittlere PL-Temperatur am Austritt aus den Düsen: 172 °C).

Bzgl. der Vorwärmung der Primärluft zeigen sich deutliche Unterschiede bei den einzelnen PL-Düsen (siehe Abbildung 43). Die Düsen, bei denen die PL kühler ist, liegen näher an der Luftzufuhr, woraus eine geringere Luftaufwärmung resultiert. Die Temperaturen liegen zwischen 126 °C und 231 °C.

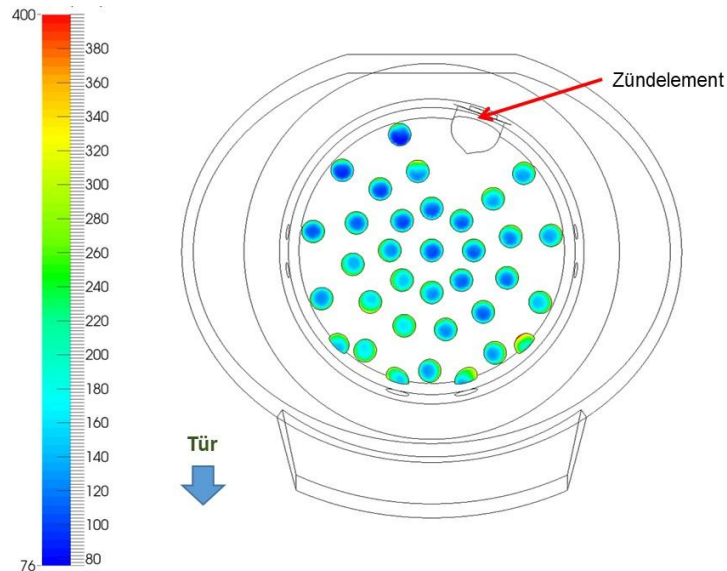


Abbildung 43: Ergebnisse der CFD Ist-Analyse des Basiskonzeptes des LEFLEX-PKo – Primärlufttemperatur in [°C] am Austritt aus den PL-Düsen (Ansicht von oben)

Es zeigte sich, dass der Luftstrom der Primärluft einen kühlenden Effekt hat und die maximalen Gastemperaturen dort auftreten, wo die Strömungsgeschwindigkeiten am geringsten sind (zwischen den Düsen und im Bereich vor dem Zündelement, wo sich keine PL-Düse im Rost befindet). So bildet sich neben dem Zündelement ein Temperaturmaximum der Gasphase von rund 1.470 °C aus. Dieses Maximum korreliert auch mit einem Temperatur-Maximum der festen Phase von rund 1.280 °C. Auf der Brennstoffbettoberfläche weist das Gas starke Temperaturgradienten auf. Nahe den Wänden der Brennerschale ist die Temperatur am geringsten. Radial weiter innen ergeben sich Temperaturen im Bereich von etwa 800 bis 1.100 °C.

So hohe Austrittstemperaturen und insbesondere die festgestellte starke Strahlenbildung an der Brennstoffbettoberfläche sind als negativ zu beurteilen, da sie zu erhöhtem Austrag von Kalium aus dem Brennstoffbett und damit zu erhöhter Feinstaubbildung führen. Um den Kaliumaustrag möglichst gering zu halten, sollten die Maximaltemperaturen an der Bettoberfläche kleiner 600 °C liegen. Deshalb wurde eine Verbesserung der Luftstufung sowie eine Modifikation der Geometrie und Anzahl der PL-Düsen empfohlen. Durch diese Maßnahmen sollte auch die Betthöhe deutlich angehoben werden.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Gasgeschwindigkeiten knapp über der Brennstoffbettoberfläche bei rund 2,4 m/s liegen (siehe Abbildung 44). Das ist als negativ zu bewerten, da bei diesen Geschwindigkeiten Partikel aus dem Bett ausgetragen werden (Staubbildung). Die maximalen Gasgeschwindigkeiten an der Bettoberfläche sollten < 0,5 m/s liegen, um den Austrag von Partikeln aus dem Bett möglichst gering zu halten. Zusätzlich treten starke Gradienten auf. Nahe den Wänden sind die Geschwindigkeiten am geringsten (<0,8 m/s). Maximalgeschwindigkeiten von rund 6,2 m/s liegen im Bereich des Zündelements vor, von wo aus die Primärluft nach oben strömt, wodurch eine sauerstoffreiche Strähne aus dem Bett austritt. Auch im vorderen Bereich (wo vier PL-Düsen nicht vollständig vom Bett bedeckt sind) entstehen starke Strahlen. Diese Strahlenbildungen sind als negativ zu beurteilen.

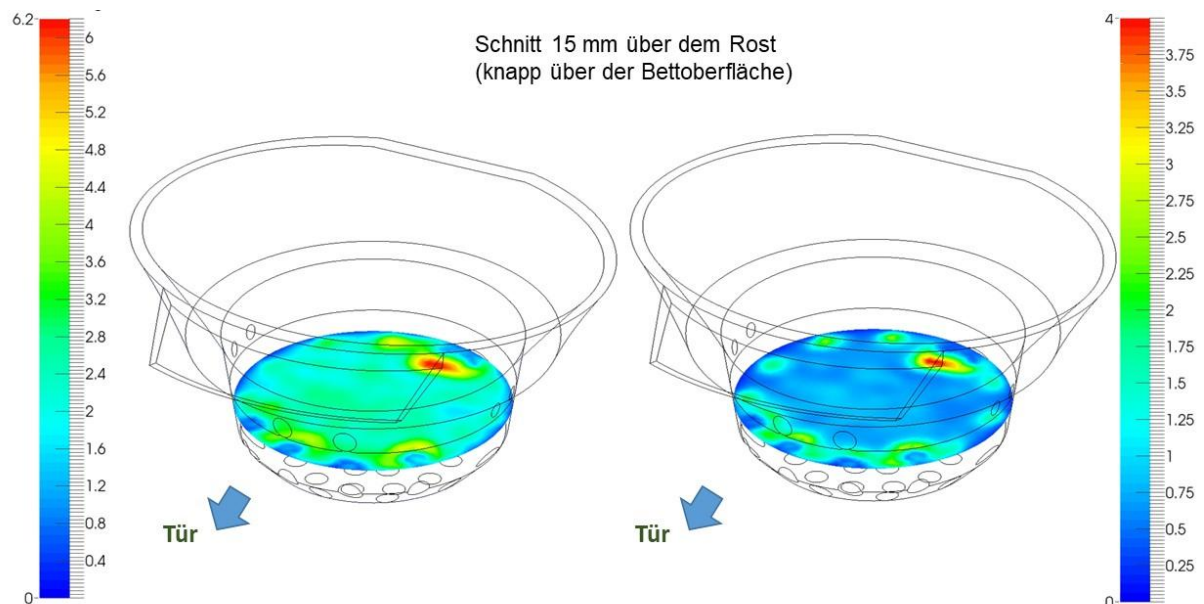


Abbildung 44: Ergebnisse der CFD Ist-Analyse des Basiskonzeptes des LEFLEX-PKo – Gasgeschwindigkeiten [m/s] (links) und Massenstromdichte [kg/(m².s)] (rechts) im Brennertopf

Die nachfolgenden Gasphasensimulationen zeigten, dass die Position und Geometrie der Sekundärluft (SL)-Düsen sowie die Luftstufung ebenfalls modifiziert werden müssen, um eine bessere Einmischung der Sekundärluft zu erreichen. Hierbei sollte auch ein größerer Abstand zur Brennstoffbettoberfläche berücksichtigt werden, um die Rückwirkung auf das Brennstoffbett zu minimieren. Auch das Gesamtluftverhältnis von 2,1 ist sehr hoch und sollte entsprechend angepasst werden. Weiter zeigte sich, dass die O₂-Profile über der Bettoberfläche sehr ungleichmäßig sind, mit starken O₂-Strahlen nahe dem Rand der Brennerschale. Dadurch entsteht eine O₂-arme Strähne, die vom Zentrum der Schale ausgeht. Da die SL aufgrund des geringen Massenstroms nicht sehr weit in die Schale eindringt und sich dadurch keine gute Durchmischung zwischen der SL und dem Rauchgas ausbildet, bleibt die O₂-arme Strähne auch noch über die Brennerschale hinaus bestehen, was insbesondere bezüglich des Teillastbetriebes problematisch ist, wie die Messungen in AP 4 bestätigten.

b) Konzeption des ersten Prototypen der LEFLEX-PKo-Technologie VA1

Auf Basis der durchgeführten Simulationen empfahl BIOS folgenden Schwerpunkte für die Entwicklung der LEFLEX-Pko-Technologie und stellte dazu bereits verbesserte Konzepte vor.

- Modifikation der Brennerschale und deutliche Verbesserung der Luftstufung
- Modifizierte Geometrie und Position der PL-Düsen
- Modifizierte Geometrie und Position der SL-Düsen und deutlich größerer Abstand zw. Bettoberfläche und SL-Düsen
- Konzeption einer automatischen Brennerschalenentaschung

In weiterer Folge wurden die Vorschläge von BIOS durch Olsberg geprüft und im Zuge dreier weiterer MS-Teams Meetings im Februar 2023 diskutiert und konkretisiert. Daraufhin erstellte Olsberg ein verbessertes Konzept für die LEFLEX-Pko und fertigte entsprechende 3D-Zeichnungen an, die an BIOS übermittelt wurden.

Für dieses verbesserte Konzept wurden anschließend bei BIOS CFD-gestützte Sensitivitätsanalysen bzgl. der Auswirkungen relevanter Parameter auf den Ofenbetrieb durchgeführt. Dabei wurden drei Geometrien (V02 – V04) detaillierten Bettsimulationen unterzogen, um das Abbrand- und Strömungsverhalten im Brennstoffbett zu bewerten. Die drei untersuchten Varianten unterschieden sich dabei insbesondere bzgl. der Rostgeometrie bzw. der Luftzufuhr über den Rost

- V02 besitzt einen Spalt im Rost nahe der Brennerschalenwand, über den ein Teil der Primärluft über den Ascheraum in das Bett einströmen kann.
- Bei V03 sind der Rostspalt und die Öffnung der Luftzufuhr zur Aschelade geschlossen. Hier tritt die Primärluft nur über die Düsen und das Zündelement in das Bett ein.
- V04 besitzt mehrere Schlitze mittig im Rost, über die ein Teil der Primärluft über den Ascheraum in das Bett einströmen kann.

Mit Variante V02 wurden dann auch Gasphasensimulationen des gesamten Ofens (bis zum Rauchgasaustritt nach dem Rauchgasventilator) durchgeführt. Im Zuge dieser Simulationen wurden auch die Öffnungsquerschnitte der Spalte bzw. Klappen in der Luftzufuhr so skaliert, dass in der neuen Geometrie die gewünschten Luftaufteilung (Primär-, Sekundär- und Scheibenluft) erreicht werden kann.

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zeigten für alle Varianten ähnliche **Betthöhen**, die sehr gut mit der für das neue Konzept vorabgeschätzten Höhe übereinstimmten. Am niedrigsten ist das Bett bei allen Varianten im Bereich des Zündelementes. Das ist auf den größeren Primärluft (PL)-Massenstrom über das Zündelement im Vergleich mit dem Massenstrom über die einzelnen PL-Düsen und dem daraus resultierenden schnelleren Abbrand des Brennstoffes in diesem Bereich zurückzuführen. Am höchsten ist das Brennstoffbett mittig in der Brennerschale, was durch den Sauerstoffmangel aufgrund der begrenzten Einströmtiefe der Primärluft in das Brennstoffbett bedingt ist. Bei Variante V03 ist das Maximum am stärksten ausgeprägt. Bei Variante V04 ist das Bett deutlich flacher als bei den anderen Varianten und die Maxima in der Mitte sind weniger prägnant, was positiv zu beurteilen ist.

Bzgl. der **Verteilung von Pellets, verkohlten Pellets und Asche** in der Schüttung zeigten die Simulationen, dass die frischen, feuchten Pellets oben auf der Schüttung liegen. Trockene Biomasse befindet sich auch nur im obersten Bereich des Brennstoffbettes. In den Bereichen direkt über den PL-Düsen und dem Zündelement ist die Schicht des trockenen Brennstoffes etwas dicker, da dort der Ausbrand der Holzkohle schneller erfolgt. Darunter befindet sich eine Schicht aus verkohlten Pellets. Diese Schicht ist im Vergleich zur Basisvariante deutlich stärker ausgeprägt. Direkt über dem Rost sammelt sich die Asche. Asche bildet sich auch direkt unterhalb der PL-Düsen, vor dem Zündelement und bei V02 und V04 über den Rostspalten, da in diesen Bereichen das größte Sauerstoffangebot herrscht. In der Realität würde bei V02 und V04 ein Teil der Asche (sobald die Partikel klein genug sind) durch die Öffnungen im Rost in die Aschelade fallen.

Im Brennstoffbett treten bei allen Varianten große Gradienten bzgl. der **Feststofftemperatur** auf (siehe Abbildung 45). Der kühlste Bereich ist auf der Oberfläche des Bettes (ca. 25 bis maximal ca. 750 °C), da der Brennstoff mit Umgebungstemperatur (25 °C) zugeführt wird und in diesem Bereich die Trocknung stattfindet. Der Ausbrand der Kohle findet am unteren Rand der Schale am schnellsten statt, da dort aufgrund der Düsen das größte Sauerstoffangebot herrscht. Dadurch ist die Kohleschicht nahe den Wänden am niedrigsten, wodurch sich der frische Brennstoff vermehrt an den Rändern der Brennerschale sammelt, speziell über den Düsen. Folglich gibt es bei den Varianten V02 und V03 mittig auf der Bettoberfläche sehr heiße Bereiche mit deutlich über 500 °C, was in Bezug auf die Freisetzung von anorganischen Feinstaubbildnern als negativ zu bewerten ist. Da sich bei Variante V04 aufgrund der dort implementierten Rostschlitze eine flachere Bettoberfläche einstellt, ist hier auch der frische, kühlere Brennstoff gleichmäßiger über der Bettoberfläche verteilt, was in Bezug auf die Freisetzung von anorganischen Feinstaubbildnern als positiv zu bewerten ist, da die Bettoberflächentemperaturen unter 500 °C liegen.

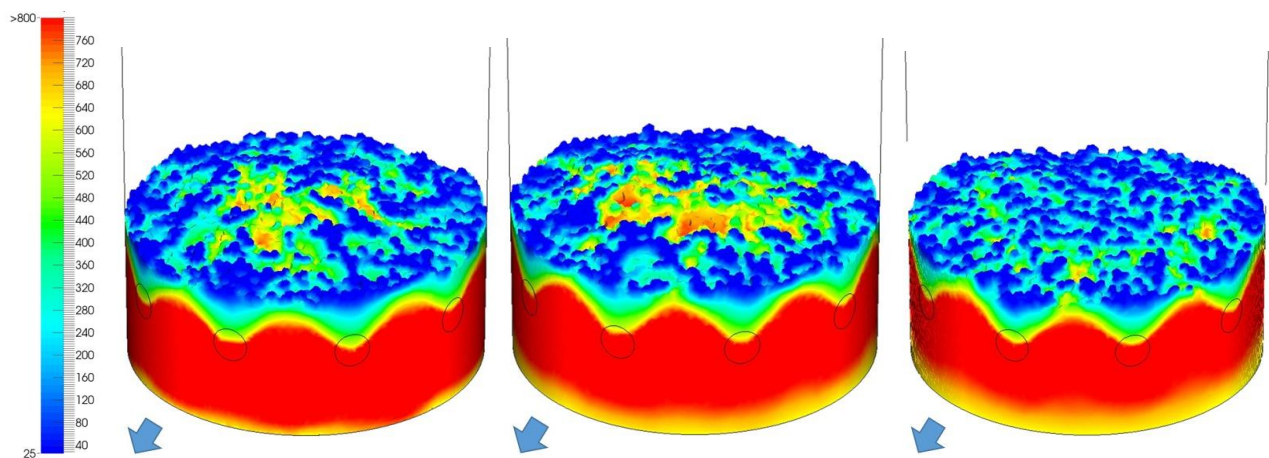


Abbildung 45: Feststofftemperaturen [°C] auf der Oberfläche des Brennstoffbettes für Variante V02 (links), V03 (Mitte) und V04 (rechts) (der Pfeil weist in Richtung Brennkammertür)

Im Bereich der Holzkohle sind die Temperaturen aufgrund des Ausbrandes am höchsten (im Mittel 1000 – 1200 °C). Bei den Öffnungen der Primärluft (Düsen und ums Zündelement) treten lokal höhere Feststofftemperaturen auf, die bei V02 und V03 1450 °C erreichen und bei V04 deutlich niedriger sind (ca. 1330 °C), da die Luft durch die Rostschlitze gleichmäßiger über den Querschnitt verteilt wird. Die Temperaturspitzen vor den PL-Düsen sind bei V03 stärker ausgeprägt, da hier der PL-Massenstrom über die Düsen etwas größer ist. Direkt über dem Rost, wo sich die Asche ansammelt, sinken die Feststofftemperaturen auf 700 – 800 °C, da hier keine Verbrennungsreaktionen mehr stattfinden.

Bei Variante V02 zeigt sich knapp über dem Rost ein Ring mit höheren Temperaturen. Das ist der Bereich, in dem der Sauerstoff, der mit der Luft über den Rostspalt einströmt, umgesetzt wird (ähnlich bei V04 mittig über dem Rost). Diese Aufwärmung im mittigen Bereich der Brennerschale hat einen positiven Effekt auf das Feststoff-Temperaturprofil, da geringere Temperaturgradienten resultieren. Bei V04 ist durch die mittigen PL-Öffnungen im Rost die Temperaturverteilung am ausgeglichtesten, da die PL-Verteilung über den Querschnitt am gleichmäßigsten ist.

Auch die **Gastemperaturen** zeigen deutliche Gradienten im Brennstoffbett. Die niedrigsten Temperaturen treten direkt beim Eintritt der Primärluft auf, da diese kühlend wirkt. Auch bei den Gastemperaturprofilen ist der positive Einfluss der Luftzufuhr über die Rostspalte zu erkennen, da bei V02 und V04 die Temperaturverteilung deutlich gleichmäßiger ist als bei V03. Zusätzlich sind die Maximaltemperaturen bei V04 deutlich reduziert. Die Gradienten der Gasphasentemperaturen korrelieren prinzipiell mit den Gradienten der Feststofftemperaturen, sind allerdings stärker ausgeprägt. Eine Ausnahme bildet hier der Bereich der Asche über den Rostspalten in Varianten V02 und V04, wo die eintretenden Primärluft einen kühlenden Effekt hat.

Auf der **Brennstoffbettoberfläche** weist das **Gas** bei allen Varianten starke Temperaturgradienten auf (siehe Abbildung 46). Nahe den Wänden der Brennerschale ist die Temperatur am geringsten, wo die Luft aus den PL-Düsen aufgrund der geringen Eindringtiefe in leichten Strähnen nach oben strömt. Radial weiter innen ergeben sich Temperaturen im Bereich von etwa 800 – 1000°C. Die Varianten V02 und V04 zeigen hier ein sehr ähnliches Profil. Bei Variante V03 gibt es an der Bettoberfläche über den PL-Düsen Temperaturspitzen, die auf die starken Gradienten im Bett zurückzuführen und als negativ zu beurteilen sind.

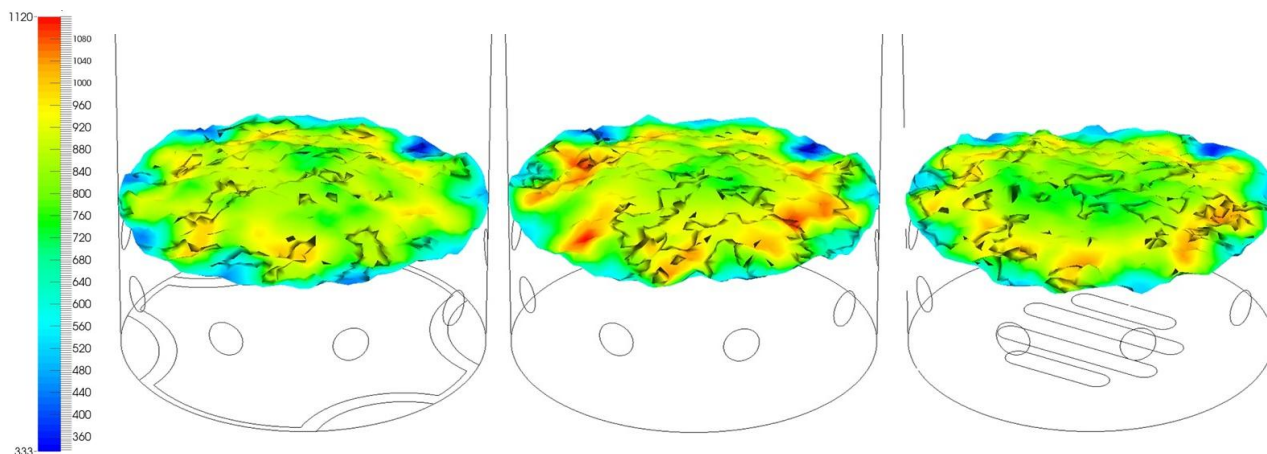


Abbildung 46: Gastemperatur [°C] an der Brennstoffbett-Oberfläche für Variante V02 (links), V03 (Mitte) und V04 (rechts)

Knapp über der Bettoberfläche ergeben sich mittlere Rauchgastemperaturen von rund 800 °C (V02), 830 °C (V03) bzw. 815 °C (V04). Diese liegen deutlich höher als bei der Basisvariante (ca. 620 °C), was daran liegt, dass bei der Basisvariante Primärluft in Luftüberschuss zugeführt wurde, was bei den verbesserten Varianten vermieden werden soll, um Aufwirbelungen von Brennstoff- und Aschenpartikeln zu minimieren. Generell sind die Rauchgastemperaturen relativ hoch, speziell auf der Brennstoffbettoberfläche sollten die Gastemperaturen möglichst im Bereich unter 600 °C liegen, um die Freisetzung von anorganischen Feinstaubbildnern (Kaliumverbindungen) aus dem Bett möglichst gering zu halten.

Um niedrigere Gastemperaturen im Bett zu erhalten, sollte, als erste Option versucht werden, die PL-Zufuhr über den Bettquerschnitt weiter zu vergleichmäßigen. Als zweite Option sollte die Implementierung einer Rauchgas-Rezirkulation geprüft werden (Zumischung von Rauchgas zur Primärluft im Bereich des Ascheraumes).

Bei V02 treten die **maximalen Wandtemperaturen** am Rost auf und erreichen bis zu 640 °C. Sie sind höher als bei V03, wo die Temperaturen des Rostes unter ca. 480 °C liegen und als bei V04 (ca. 580 °C). Die Temperaturen der Wände der Brennerschale liegen bei V02 unter ca. 480 °C, erreichen bei V03 maximal ca. 560 °C bei V04 maximal ca. 520 °C. Die Unterschiede lassen sich mit den unterschiedlichen Luftzufuhrvarianten erklären, generell erscheinen die Temperaturen moderat und bzgl. Materialbelastung als unproblematisch.

Die **Einmischung der Luft in das Bett** ist bei V02 und V03 nicht ideal. Bei der V02 wird die Luft aus dem Rost durch die Luft aus den Düsen in die Mitte des Bettes gedrängt und führt zu einem Ausbrand direkt über dem Rost, was diesen stark erwärmt. Außerdem verhindert die Luft über den Rost auch das tiefere Eindringen der Luft aus den Düsen, wodurch der Holzkohlenausbrand nur sehr nahe an den Wänden der Brennerschale stattfindet. Bei V03, bei der die Primärluft mit höherer Geschwindigkeit in das Brennstoffbett einströmt, dringt der Sauerstoff nicht bis in die Mitte des Bettes vor. Hier herrscht also Sauerstoffmangel und somit erfolgt kein effizienter Holzkohlenumsatz. Bei V04 ergibt sich aufgrund der mittigen Rostspalte ein gleichmäßigerer Holzkohlenumsatz. Allerdings ist die Eindringtiefe der Luft aus den PL-Düsen ähnlich wie bei V02 zu gering. Folglich ergeben sich bei allen Varianten sauerstoffreiche Strähnen am Rand der Brennerschale über den Düsen und dem Zündelement. Der Sauerstoffumsatz ist bei allen Varianten mit rund 79 % sehr ähnlich, allerdings für das gegebene Primärluftverhältnis von 0.4 als niedrig einzustufen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde empfohlen, keine PL-Düsen zu verwenden, sondern die Primärluft gleichmäßig verteilt über den Rost zuzuführen.

Die für das bei V02 aus dem Bett austretende Rauchgas durchgeführten **Gasphasensimulationen** zeigten ähnliche Strömungsprofile der Scheibenluft in der Brennkammer wie bei der Basisvariante. Der Scheibenluft-Impuls ist stark genug, um entlang der gesamten Scheibe für eine gute Umströmung zu sorgen. Die Strömung des aus der Brennerschale austretenden Rauchgases wird durch die Scheibenluft weniger in Richtung der Isolierung abgedrängt wie bei der Basisvariante, was auf die höheren Geschwindigkeiten auf Grund der höheren Temperaturen des Rauchgases am Austritt aus der Brennerschale zurückzuführen ist. Das hat zur Folge, dass ein kleiner Anteil des Rauchgases von den Wirbeln der Scheibenluft entlang der Scheibe mitgerissen wird. Allerdings dringt das Rauchgas dennoch nicht bis zur Sichtscheibe durch (auf Grund der Sperrwirkung der Scheibenluft).



Abbildung 47: Stromlinien der Scheibenluft ab dem Eintritt in die Brennkammer (links) sowie des Rauchgases ab dem Austritt aus dem Brennstoffbett (rechts), eingefärbt nach der Verweilzeit [s] für Variante V02

Die CFD-Simulationen zeigten weiters, dass sich die **Luft aus den SL-Düsen** auf Grund der ihr aufgeprägten Drallströmung sehr gut in das Rauchgas einmischt. Die höchsten Rauchgastemperaturen treten in der Brennerschale nach der Sekundärlufteindüsung auf und erreichen lokal bis zu 1790 °C. Die Rauchgastemperatur am Austritt aus der Schale liegt bei rund 1410 °C und damit deutlich über der von V01 (rund 600 °C), was aufgrund der angepassten Luftstufung zu erwarten war. Hohe Temperaturen bei Nennlast sind wichtig, um auch bei Teillast noch einen vollständigen Ausband zu erreichen, da bei Teillast die Temperaturen deutlich abfallen.

Bis zum Eintritt in den Wärmetauscher sind die weiteren **Rauchgastemperaturen** für die beiden Varianten sehr ähnlich. An der für die Ofenregelung verwendeten Messstelle in der Brennkammer beträgt die Flammtemperatur bei beiden Varianten rund 810 °C und beim Eintritt in den Wärmetauscher hat das Rauchgas eine Temperatur von rund 500 °C. Am Austritt aus dem Wärmetauscher erreicht die Temperatur bei V02 rund 207 °C und liegt damit 20 °C unter dem Wert der Basisvariante, was auf den geringeren Rauchgasmassenstrom auf Grund des geringeren Luftüberschusses zurückzuführen ist, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirkt.

Aufgrund der Drallströmung und der guten O₂-Einmischung im Bereich der SL-Düsen ergibt sich ein guter Abbau des CO bereits in der Brennerschale. Des Weiteren zeigt sich eine gute Durchmischung der Scheibenluft mit dem Rauchgas, wodurch es zu einem beschleunigten CO-Abbau über der Brennerschale kommt. Am Austritt aus der Hauptbrennkammer ergibt sich eine **CO-Konzentration** von rund 10 mg/Nm³ (bei 13 Vol.% O₂) und bis zum Eintritt in den Wärmetauscher von 9 mg/Nm³ (bei 13 Vol.% O₂). Diese CO-Konzentrationen liegen somit noch unter dem Niveau der Basisvariante (Austritt Hauptbrennkammer: 19 mg/Nm³ bzw. 18 mg/Nm³ bei 13 Vol.% O₂).

Die maximale CO-Konzentration an der Innenseite der Sichtscheibe liegt bei V02 bei rund 10 ppmv. Diese CO-Konzentration an der Scheibe ist als sehr gering einzustufen, was in Bezug auf eine mögliche Verschmutzung der Scheibe als positiv zu bewerten ist.

Die **Maximaltemperaturen** auf der Innenseite der Brennerschale liegen mit knapp 600 °C was in Bezug auf Materialbelastung als akzeptabel einzustufen ist. Auch die **Materialtemperaturen in der Brennkammer**, die an der Innenwand der Brennkammerisolierung auftreten sind mit 710 °C bzgl. Materialbelastung als unproblematisch einzustufen. Dasselbe gilt für Maximaltemperaturen an der Sichtscheibe auf der Innenseite (rund 410 °C).

Rund 3 kW der **Wärmeleistung** werden über die Außenwände des Ofens nach außen abgegeben. Über die Sichtscheibe wird ungefähr 1 kW abgestrahlt und die Konvektionsluft nimmt knapp 2 kW auf. An der Normmessstelle ergibt sich für V02 ein Abgasverlust von ca. 450 W, rund 250 W weniger als bei der Basisvariante. Bezogen auf die Brennstoffwärmeleistung von knapp 6.6 kW folgt daraus ein Wirkungsgrad von ca. 93%, der rund 4% höher liegt als der der Basisvariante. Der deutlich höhere Wirkungsgrad ist durch den deutlich geringeren O₂-Gehalt im Rauchgas und die gesunkene Abgastemperatur bedingt.

Die geschilderten Ergebnisse der CFD-Simulationen wurden allen Partnern beim Projektmeeting in Straubing (Mai 2023) präsentiert und darauf aufbauend, noch weitere Optimierungsmaßnahmen besprochen, die im Wesentlichen die Eindüsung der Primärluft, die Zündluftzufuhr, die Luftführung der Sekundärluftzufuhr und die Implementierung von Rauchgasrezirkulation betrafen.

Die Umsetzung dieser Vorschläge wurde von Olsberg geprüft und im Zuge von zwei nachfolgenden Onlinemeetings mit BIOS im Detail abgestimmt. Daraufhin wurde von Olsberg eine neue 3D-Zeichnung erstellt.

Die Zufuhr des Brennstoffes erfolgt nun wie empfohlen oberhalb des Brennstoffbettes aber unterhalb der SL-Düsen. Die Position der SL-Klappe wurde so angepasst, dass es zu keiner direkten Anströmung von einzelnen Düsen kommt. Mit V05 wurden wieder Bett- und Gasphasensimulationen für den Nennlastbetrieb von BIOS durchgeführt, wobei das Primärluftverhältnis bei gleichbleibendem Gesamtluftverhältnis von 0,4 auf 0,3 abgesenkt wurde. Die Simulationen erfolgten mit und ohne Einsatz von Rauchgasrezirkulation.

Die **Ergebnisse der CFD-Simulationen** zeigen bei V05 durch das neue Rost- und PL-Führungskonzept eine gleichmäßigere Sauerstoffverteilung im Brennstoffbett. Die O₂-Strähnen konnten im Vergleich zu V04 deutlich reduziert werden. Aufgrund der gleichmäßigeren Einmischung ist auch der O₂-Umsatz im Bett deutlich höher als bei V04. Daher wurde auch das PL-Verhältnis weiter reduziert, um eine vernünftige Betthöhe zu erreichen.

Die Verteilung aller relevanten Größen (Feststoff- und Gastemperatur, Geschwindigkeit, Sauerstoff) über den Querschnitt des Bettes sind bei V05 deutlich gleichmäßiger als bei V04. Als Beispiel dafür ist in Abbildung 48 ein Vergleich der Feststofftemperaturen auf der Oberfläche des Brennstoffbettes dargestellt.

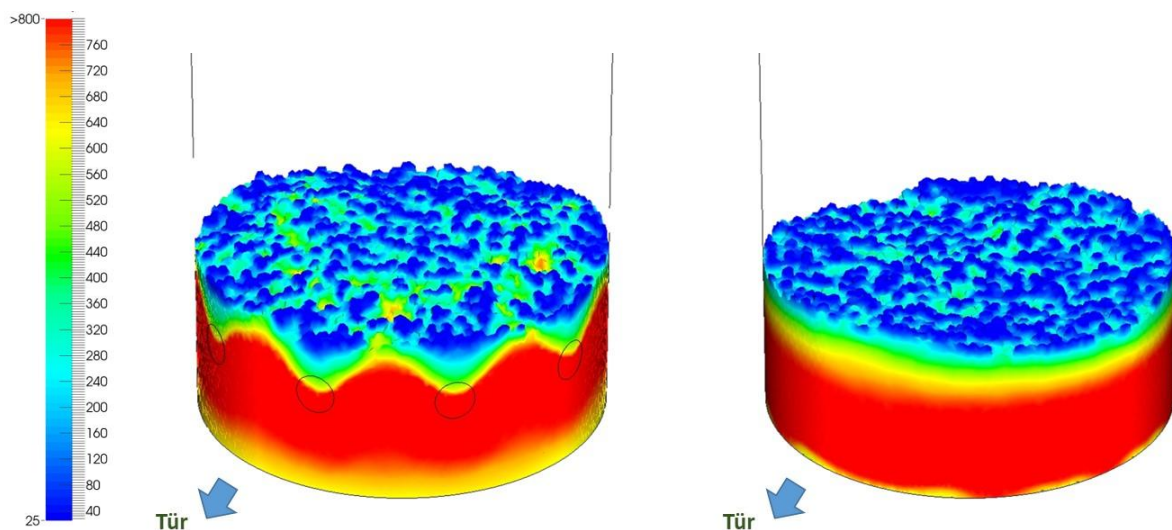


Abbildung 48: Feststofftemperaturen [°C] auf der Oberfläche des Brennstoffbettes für Variante V04 (links) und V05 (rechts)

Die Gastemperatur an der Bettoberfläche ist um ca. 70 °C niedriger (V04 ca. 815 °C, V05 ca. 740 °C) und es zeigen sich keine Hot-Spots bzgl. der Betttemperatur bei V05. Auch die Verteilung der kühlen Schicht an der Bettoberfläche und die Temperaturverteilung an der Bettoberfläche ist bei V05 viel gleichmäßiger, was in Bezug auf den Partikelaustrag bzw. den Austrag feinstaubbildender Dämpfe (insbesondere Kaliumverbindungen) als positiv bewertet wird. Aufgrund des geringeren PL-Massenstroms und der geringeren Temperatur an der Bettoberfläche ergibt sich auch eine deutlich geringere Geschwindigkeit über dem Bett (V04: 1,1 m/s, V05: 0,8 m/s bis 0,9 m/s), was bzgl. Partikelaustrag positiv zu bewerten ist.

Die Geometrie der Variante V05 erscheint von allen simulierten Varianten, als die Beste und es wurde von BIOS daher empfohlen, diese Variante für die Konzeption des ersten Versuchsofens zu übernehmen.

Außerdem zeigten die CFD-Simulationen, dass der Betrieb mit Rauchgasrezirkulation zu bevorzugen ist, da die Temperaturen im Brennstoffbett (Feststoff und Gas) und auch die Rosttemperaturen (Maximaltemperaturen bei V05 von ca. 540 °C mit Rauchgasrezirkulation im Vergleich zu ca. 660 °C ohne Rauchgasrezirkulation) durch das rezirkulierte Rauchgas deutlich reduziert werden können. Durch diese deutlich niedrigeren Temperaturen im Brennstoffbett sinken die Freisetzungsraten von anorganischen Feinstaubbildnern (im Wesentlichen Kaliumverbindungen) und damit die Feinstaubemissionen. Des Weiteren

wird die Brennstoffflexibilität hinsichtlich des Einsatzes von Pellets mit niedrigeren Ascheschmelztemperaturen erhöht.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden in einem Onlinemeeting Anfang August 2023 den Partnern präsentiert. Im Anschluss an das Meeting erfolgte noch eine Gasphasensimulation, um den Einfluss der geänderten SL-Düsen und eines Leitblechs unter Rost bewerten zu können. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden dem Konsortium beim Partnertreffen in Olsberg (Januar 2024) präsentiert.

Die CFD-Simulationen mit dem neu entwickelten Abbrandmodell samt Kopplung mit Gasphasensimulationen zur Entwicklung des ersten Prototyps des LEFLEX-Pko konnten somit erfolgreich abgeschlossen werden. Aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse bzgl. der schlussendlich für die Realisierung des Prototyps vorgesehenen V05 mit der Basisvariante und dem Bestandsmodell Levana von Olsberg lassen sich signifikante Verbesserungen hinsichtlich Emissionsreduktion und Wirkungsgradsteigerung erwarten, die durch die Testläufe (siehe AP4) bestätigt wurden.

Auf Basis der CFD-Simulationen wurde die Versuchsanlage 1 (VA1) von Olsberg gebaut und im Dezember 2023 an BIOS ausgeliefert. Nach intensiven Testläufen bei BIOS wurde die VA1 im April 2024 für weitere Testläufe zum TFZ überstellt.

c) Konzeption des verbesserten Prototyps (VA2) der LEFLEX-PKo-Technologie

Bereits parallel zu den Testläufen mit der VA1 am TFZ erfolgten die Entwicklung und der Bau der VA2 durch Olsberg. Als Basis dazu diente eine detaillierte Liste an Verbesserungsmaßnahmen, die von BIOS im Zuge der Präsentation der finalen Ergebnisse der Testläufe mit VA1 beim Online-Meeting am 22.04.2024 mit Olsberg diskutiert und an Olsberg übergeben wurde. Diese Modifikationen betrafen im Wesentlichen folgende Punkte:

- Der Pelletabwurf sollte laut Vorgaben von Olsberg oberhalb des Sekundärluftdüsenringes in die Brennkammer einmünden.
- Alle Kanten in den Luft- und Rauchgaskanälen sollten zur Minimierung von Falschlufteinträgen und internen Kurzschlussströmungen bis in die Ecken vollständig verschweißt werden und gegeneinander dicht sein.
- Verbesserte Abdichtung des Ofens zur Minimierung von Falschlufteintrag
- Überarbeitung des Zündelements zur Reduktion des Zündlufteintrags
- Implementierung eines stärkeren Rauchgasventilators oder Betrieb des bestehenden Ventilators bei höherer Maximal-Drehzahl, um mehr Flexibilität bzgl. des erzielbaren Brennkammerunterdrucks zu erreichen.

Auf diesen Vorschlägen aufbauend, erarbeitete Olsberg das Ofenkonzept sowie die Regelung für die VA2. Nach Endabstimmung mit den Projektpartnern erfolgte die Fertigung der VA2 durch Olsberg. Wie schon bei VA1, sollten auch mit VA2 erste Testläufe bei BIOS durchgeführt werden. Die VA2 wurde Anfang August (KW33/2024) an BIOS geliefert.

d) CFD Nachsimulationen von Testläufen mit VA2

Ebenfalls als Teil von AP3, führte BIOS CFD-Nachsimulationen auf Basis der Messdaten ausgewählter Testläufe mit der VA2 durch. Die Ergebnisse dieser CFD-Nachsimulationen sollten einerseits dazu dienen, dass neue Bettmodell einer weiteren Prüfung im Praxiseinsatz zu unterziehen, sie sollten aber auch die Testläufe hinsichtlich der Identifikation weiterer betrieblicher Optimierungsmaßnahmen unterstützen.

Konkret zeigte sich während der Testläufe, dass die Brennstoffbetthöhe im Verlauf des Betriebes über mehrere Stunden unterschiedlich stark anwächst (insbesondere abhängig von Primärluft- und Rezirkulationsverhältnis). Um zu überprüfen, ob die Testlaufergebnisse bzgl. Brennstoffbetthöhe reproduziert bzw. erklärt werden können wurden Daten des Testlaufes vom 28.01.2025 (im Folgenden Betriebsfall 6 – BF6) und des Testlaufes vom 03.04.2025 (BF7) als Grundlage für die Simulationen ausgewählt. Diese beiden Testläufe unterscheiden sich im Wesentlichen durch die eingestellten Primärluftverhältnisse (0,33 bei BF6 und 0,26 bei BF7).

Während der Testläufe wurde ein Druckverlust der Sekundärluft von etwa 95 Pa gemessen, die CFD-Simulationen zeigten aber deutlich höhere Druckverluste. Es wurde vermutet, dass die Scheibenluftmenge tatsächlich höher war als gemessen. Das erschien als plausibel, da die Volumenstrommessungen im dreieckigen Scheibenluftkanal erheblichen Unsicherheiten unterliegen. Deshalb wurden für die Simulationen Korrekturen an den Massenströmen (Sekundärluft und Scheibenluft) vorgenommen. Die Sekundärluft wurde reduziert und die Scheibenluft entsprechend erhöht, um plausible Druckverluste über den Sekundärluftdüsen zu erreichen. Aus diesen Erkenntnissen resultierte auch die Empfehlung, die zu hohe Sekundärluftmenge zu reduzieren, um den Ausbrand zu verbessern, was sich im Zuge der Testläufe bestätigte.

Die Ergebnisse der Simulationen ergaben außerdem, dass sich die Höhe des Brennstoffbetts bei **BF6** im Laufe der Zeit ändert und nach 6 h auf etwa 69 mm ansteigt (siehe Abbildung 49). Der Hauptgrund hierfür ist die Zunahme der Ascheschicht. Diese wächst auf 45 mm nach 6 h an. Am niedrigsten ist das Bett

immer im Bereich des Zündelementes, was auf den Lufteintrag über das Zündelement und den daraus resultierenden schnelleren Abbrand des Brennstoffes in diesem Bereich zurückzuführen ist. Die Temperaturen an der Brennstoffbettoberfläche liegen zum Großteil deutlich unter 400 °C (kritische Temperatur bzgl. Feinstaubbildung), nur in einzelnen Bereichen werden höhere Temperaturen erreicht. In der Realität kann es hier gewisse Abweichungen geben, da die Temperaturverteilung davon abhängig ist, wie der frische, kühlere Brennstoff auf dem Bett auftrifft (in der CFD-Simulation wird der Brennstoff idealisiert gleichmäßig zugeführt).

Die Verteilung der Gastemperaturen im Brennstoffbett zeigt, wie schon auf Basis der vorangegangenen Simulationen erwartet, deutliche Unterschiede im Bereich der kühlen Ascheschicht. Der Hotspot im Bereich des Zündelements bleibt im Verlauf des Abbrandes bestehen. Eine kühle Strähne über dem Zündelement nimmt mit zunehmender Zeit ab, was auf die bessere Einmischung der Zündluft im Brennstoffbett mit steigender Höhe des Brennstoffbetts zurückzuführen ist. Daraus resultiert auch die Zunahme der Gastemperatur über der Brennstoffbettoberfläche mit der Zeit (BF6-2 h: 796 °C, BF6-6 h: 892 °C). Steigende Gastemperaturen und Gasgeschwindigkeiten an der Brennstoffoberfläche sind dabei als negativ zu bewerten, da sie die Feinstaubbildung und den Partikelaustrag begünstigen. Im Bereich des Zündelements bildet sich eine deutliche Sauerstoffsträhne aus.

Die mittlere Höhe des Brennstoffbetts bei **BF7** ist nach 3 h mit 35 mm ungefähr 10 mm höher als bei BF6 (siehe Abbildung 49). Das ist auf die deutlich höher Holzkohlenschicht zurückzuführen, welche aus dem geringeren Primärluftverhältnis, das während dieses Testlaufes eingestellt war, resultiert. Extrapoliert auf 6h Betriebszeit wächst das Brennstoffbett für BF7 auf ca. 84 mm an (46 mm Asche, 35 mm Holzkohle) Die Brennstoffbettoberfläche liegt aber noch unterhalb der Sekundärluftdüsen.

Das geringere Primärluftverhältnis bedingt auch eine geringere Gastemperatur an der Bettoberfläche bei BF7 im Vergleich mit BF6 (BF6-3 h 829 °C, BF7-3 h 711 °C), was in Bezug auf Partikelaustrag und Feinstaubbildung als positiv zu bewerten ist. Die Rauchgasmenge am Betaustritt ist bei BF7 kleiner als bei BF6, was sich auch an der niedrigeren Rauchgasgeschwindigkeit am Betaustritt zeigt (BF6 (3 h): 1.07 m/s, BF7 (3 h): 0.87 m/s). Das ist durch das niedrigere PL-Verhältnis begründet und positiv bezüglich Partikelaustrag aus dem Bett.

Auf Grund des geringeren Zündluft-Massenstroms bei BF7 ist die O₂-Strähne über dem Zündelement stark reduziert. Darum ist der Anteil des umgesetzten Sauerstoffs bei BF7 deutlich höher als bei BF6 (BF6 (3 h): 90.5 %, BF7 (3 h): 99.5 %). Bei BF7 wird somit fast der ganze zugeführte Sauerstoff im Bett umgesetzt.

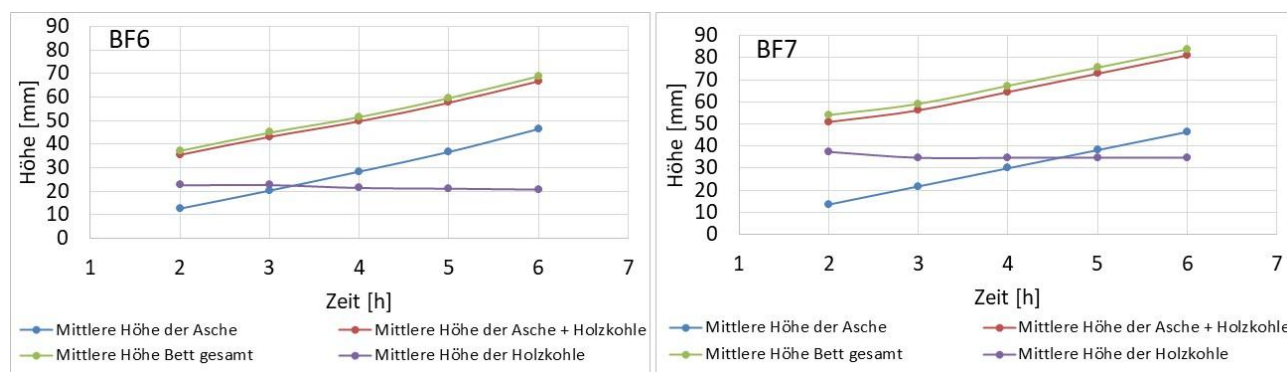


Abbildung 49: Brennstoffbettentwicklung für BF6 (links) und BF7 (rechts) über die Abbranddauer aufgeschlüsselt auf Asche und Holzkohle

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Variation der Betthöhe über die Zeit und in Abhängigkeit des Primärluftverhältnisses gut nachvollziehbar sind und die Simulationsergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen während der Testläufe zeigen. Die CFD-Nachsimulationen zeigen einen signifikanten Einfluss des Zündluftmassenstromes auf die Form des Brennstoffbetts. Dieser Strom sollte möglichst gering sein, um negative Effekte auf die Entwicklung des Brennstoffbetts zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden auf Basis der Ergebnisse der CFD-Simulationen eine Reduktion der Lufteintrittsöffnung in das Zündelement vorgeschlagen (Ziel: Zündluftmassenstrom von 11% der Primärluft). Diese Maßnahme wurde dann auch umgesetzt und führte zu einer deutlichen Verbesserung des Ofenbetriebs und zu einer Emissionsreduktion (siehe AP4).

Das geringere Primärluftverhältnis von BF7 (BF7: 0.26, BF6: ca. 0.33) reduziert die Gastemperaturen und Gasgeschwindigkeiten am Betaustritt (positiv bezüglich Partikelaustrag). Es erhöht außerdem das Brennstoffbett, was die Einmischung der Zündluft und den Sauerstoffumsatz verbessert. Auf Basis der CFD-Nachsimulationen wurde empfohlen, das Primärluftverhältnis niedrig zu halten (wie bei BF7) und den Rezi-Anteil etwas anzuheben. Auch diese Empfehlung wurde im Zuge der Testläufe mit positivem Ergebnis umgesetzt.

Zudem hatten die CFD-Nachsimulationen gezeigt, dass die Scheibenluftmenge zu hoch eingestellt war. Die Absenkung resultierte in einer Reduktion des Gesamt-Luftüberschusses und somit einer Erhöhung des Wirkungsgrades. Sie verbesserte auch den Ausbrand (niedrige CO-Emissionen) aufgrund höherer Brennkammertemperaturen bei Nennlast und insbesondere bei Teillast.

Abschließend ist zu merken, dass die CFD-Nachsimulationen ausgewählter Testläufe mit der VA2 ein weiteres Mal die Plausibilität der Simulationsergebnisse nachgewiesen haben. Sie haben vor allem auch gezeigt, dass das neue Simulationsprogramm gezielt zu weiteren Ofenoptimierung bzw. Regelungsoptimierung (z.B. bzgl. Luftstufungseinstellungen) eingesetzt werden kann. Ein bedeutender Synergieeffekt der Simulationen mit den experimentellen Arbeiten ist dabei, dass schwer messbare Parameter (z.B. Scheibenluftvolumenstrom) über die Simulationen bestimmt werden können, und so die Optimierung der Luftstufungseinstellungen effizient unterstützt werden kann. Insgesamt zeigte sich, dass die auf Basis der CFD-Nachsimulationen vorgeschlagenen Modifikation in ihrer realen Umsetzung während der Testläufe auch die erwarteten Wirkungen bzw. Verbesserungen brachten (siehe AP4).

ee) Inbetriebnahme und Verifizierungsmessungen der VA2 am TFZ:

Es erfolgte eine Inbetriebnahme und erste Einstellung der VA2 am TFZ gemeinsam mit BIOS. Nach weiteren Testläufen, bei denen die Luftpfeinstellungen der Anlage feinjustiert wurden, erfolgte die Bewertung des Nenn- und Teillastbetriebs ohne aktivierte Brennstoffregelung. Dabei wurden Nenn-/Teillast Messungen mit PowerPellets durchgeführt, bei denen die Werte der VA1 vor allem bei Teillast nochmals optimiert werden konnten (CO 9/158 mg/Nm³, Staub 8 / 4 mg/Nm³, OGC 1/3 mg/Nm³). Damit konnten die Ergebnisse, die von BIOS mit der VA2 erzielt wurden, am TFZ unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten verifiziert werden.

ff) Regelungsoptimierung an der Versuchsanlage 2 (VA2) am TFZ und weitere Optimierungsmaßnahmen:

Die VA2 wurde am TFZ mit einer Softwareversion, die bereits bei BIOS adaptiert wurde, angeliefert (Softwarestand g). Die Regelung war bereits auf die Regelung der Ventilatorumdrehzahl in Abhängigkeit des Unterdrucks in der Brennkammer umgestellt. Zudem war bereits eine automatische Anhebung des Unterdrucks implementiert, um den über die Zeit steigenden Druckverlust über das Glutbett auszugleichen. Nach Inbetriebnahme und Inbetriebnahmemessungen am TFZ, die gemeinsam mit BIOS durchgeführt wurden, kam es zu einer umfangreichen Versuchsreihe bei der wechselnd Standard-Fichtenpellets ENplus A1 und Buchenpellets eingesetzt wurden, um die Regelung hinsichtlich Brennstoffflexibilität zu optimieren.

Es wurden insgesamt 66 volle Feuerungsversuche über mindestens 6 h stationären Anlagenbetrieb an der Versuchsanlage 2 durchgeführt. Davon waren 18 Feuerungsversuche für die Regelungsoptimierung, 27 für die Einstellung und Optimierung der Luftpfeinstellungen und insgesamt 21 Versuchstage für die Messungen der Brennstoffflexibilität.

Bei den Versuchen zur Regelungsoptimierung einerseits iterativ die Parameter der bestehenden Software adaptiert, in Zusammenarbeit mit dem Softwareentwickler von Olsberg in regelmäßiger Abstimmung mit BIOS insgesamt 5 weitere Softwareversionen entwickelt und zusätzliche Features zum bestehenden Regelalgorithmus entwickelt. Folgende wesentliche Parameter wurden dabei adressiert:

- Ideale Solltemperatur für Nennlast und Teillast
- Brennstoffkorrektur min. und max.
- Saugzugkorrektur
- Reglergeschwindigkeit und Intensität der Eingriffe sowie Art der Mittelwertbildung für die Flammtemperatur als Regelgröße.
- Anpassung des Reglertotbands, um ein zu frühes eingreifen der Regelung zu verhindern.
- Optimierung der zeitlichen Abläufe (ab wann darf die Regelung arbeiten, wenn z.B. Leistungsstufen geändert werden).
- Verhalten des Reglers bei Lastwechsel.
- Verhalten des Reglers beim Zündvorgang

Nach diesen Adaptionen wurden die Messungen des Ofenscreenings mit allen Brennstoffen durchfahren (siehe Beschreibung AP4). Im Ergebnis zeigte die VA2 mit der optimierten Regelung sehr niedrige Varianzen der Emissionen und der Leistung über alle Brennstoffe hinweg. Die Regelung erfüllt ihren Zweck hinsichtlich der Brennstoffflexibilität also hinreichend. Weiteres Optimierungspotential ist im Wesentlichen nur durch die Implementierung weiterer Sensoren, wie z.B. Druckverlust über das Glutbett und/oder Restsauerstoff erreichbar. Hierfür wären dann aber auch weitere Aktoren zur Verstellung der Luftmassenströme nötig.

Nach diesen Messungen wurde durch Nachsimulation der Testergebnisse bei BIOS weiteres Optimierungspotential durch Verringerung der Zündluft sowie Anpassung der Scheibenspülluft und Sekundärluftvolumenströme. Dies wurde durch Anpassung der Zuluftöffnungen auf einen kleineren Durchmesser sowie Anpassung der Scheibenspülluft und Sekundärluftvolumenströme durch gezielte Versuchsreihen erreicht. Durch diese Optimierungsmaßnahmen konnten die Emissionen gegenüber dem vorherigen Zustand nochmal deutlich gesenkt werden. Aufbauend auf diesen Optimierungen wurden gezielte

die Versuche bei Nennlast und Teillast mit EN*plus* Pellets, sowie eine Auswahl der Messungen zur Brennstoffflexibilität wiederholt, um den Effekt der Optimierungen auf die restlichen Brennstoffe übertragbar zu machen. Zudem wurde in diesem Zustand der Anlage die beReal Messung durchgeführt. Die Ergebnisse sowie der Effekt der Optimierung sind in AP4 dargestellt.

Arbeitspaket 4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen

a) Vortests am TFZ

Im Zuge einer Testlaufserie, die in Kooperation von TFZ und BIOS in KW30/2022 erfolgte, wurde der Pelletofen Levana des Projektpartners Olsberg einer umfangreichen Bewertung unterzogen. Dabei wurden die gasförmigen Emissionen (O_2 , CO , CO_2 , OGC und NO_x), der Rauchgasvolumenstrom, die Verbrennungsluft- und Scheibenlufttemperaturen, die Brennkammertemperaturen und die Rauchgastemperaturen vor und nach dem Wärmetauscher sowie am Ofenausritt kontinuierlich aufgezeichnet und diskontinuierliche und kontinuierliche Staubemissionsmessungen vom TFZ durchgeführt. Außerdem wurden spezielle Messungen durchgeführt, die Basisdaten für die CFD-Simulationen und die LEFLEX-Pelletofenentwicklung in AP 3 liefern sollten. Letztere umfassten Pyrometermessungen vor und nach dem Wärmetauscher des Pelletofens (durch BIOS), Messungen der Verbrennungsluftvolumenströme (gesamte zugeführte Verbrennungsluft sowie Scheibenluftstrom) sowie Druckmessungen an verschiedenen Positionen entlang des Verbrennungsluft- und Rauchgasweges durch den Pelletofen. Der Teststandaufbau ist in Abbildung 50 dokumentiert. Die Testläufe erfolgten bei Nennlast, Teillast und im Lastwechselbetrieb (entsprechend dem beReal-Testzyklus). Es kamen ENplus A1 Fichtenpellets (siehe Referenz Tabelle 5 und Tabelle 6 AP2) zum Einsatz.

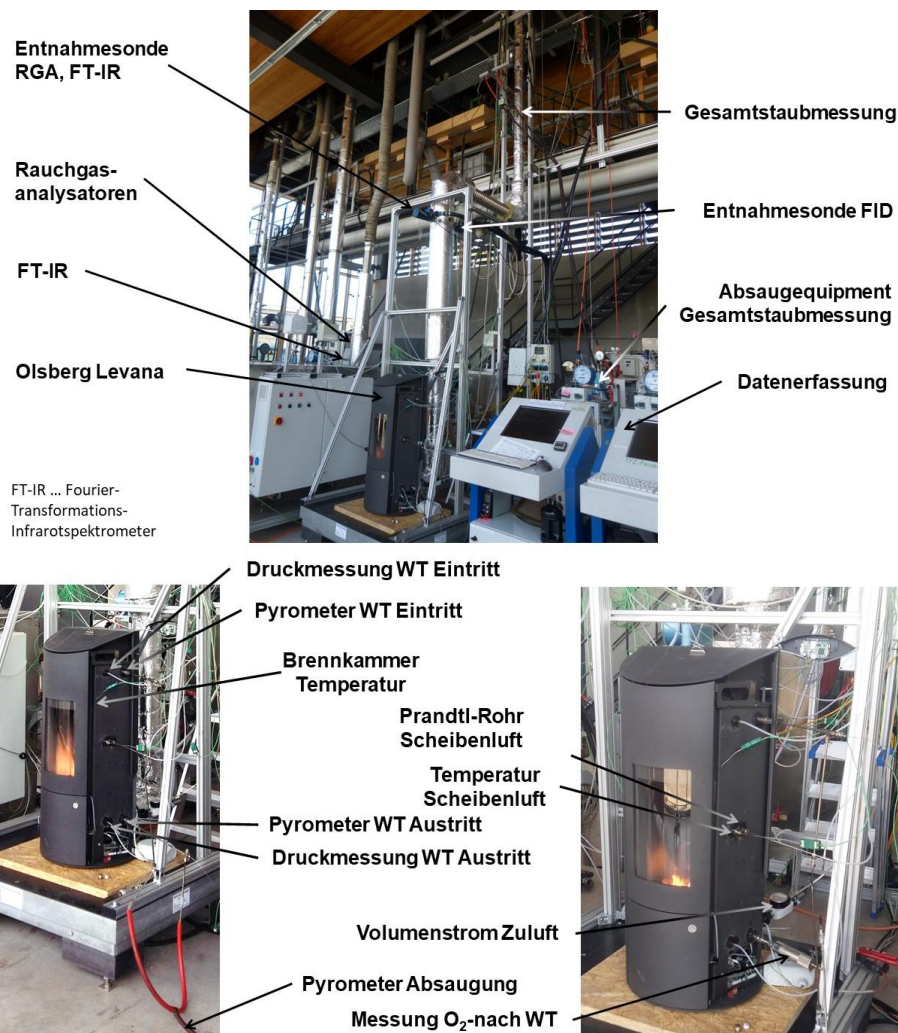


Abbildung 50: Teststandaufbau bei den Vortests mit einem Levana Pelletofen der Firma Olsberg beim TFZ

Die Testläufe zeigten, dass der Anteil an Falschluff, der vor dem Rauchgasgebläse in den Ofen eintritt, im Nennlast- und Teillastbetrieb bei $<10\%$ der Verbrennungsluft lag. Der Falschluffeintrag in den Kaminofen ist somit generell als gering einzustufen, was positiv zu bewerten ist.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass mit den vorliegenden Standardeinstellungen der Regelung die Restsauerstoffgehalte im Rauchgas im Nennlast- und Teillast-Betrieb vergleichsweise hoch lagen und sehr starken Schwankungen unterlagen. Auch die CO -Emissionen wiesen deutliche Schwankungen mit ausgeprägten Emissionspeaks auf.

Die Testläufe zeigten außerdem, dass der Pelletofen Levana ein stark variierendes Flammenbild aufwies, was auf eine unregelmäßige Brennstoffdosierung zurückzuführen war (siehe auch AP2 Abschnitt c)). Das Auftreffen der Pellets in der Brennschale wirkte zwar sehr gleichmäßig bzgl. der flächigen Verteilung (es waren

keine präferierten Seiten oder Zonen erkennbar, an denen sich Pellets anhäufen) und kurze Überhänge an Brennstoff auf einer Seite wurden schnell durch den nächsten Abwurf ausgeglichen. Es traten jedoch Betriebsphasen auf, während denen für eine längere Zeit keine bzw. nur vereinzelt Pellets abgeworfen wurden (ca. 30 bis 40 Sekunden). Daraus resultierte zwischenzeitlich ein Betrieb mit sehr kleiner Flamme. Nach solchen Phasen mit kleiner Flamme trat eine stark erhöhte Zufuhr von Pellets in kurzer Zeit auf, worauf sich eine Phase mit hohen bis sehr hohen Flammen ergab, bis diese große Menge an neuem Brennstoff abgebrannt war. Analog zu diesem Brennstoffbetthöhenvariationen sanken und stiegen wie bereits angesprochen die Sauerstoffgehalte im Rauchgas. Temporär zu niedrigerer oder zu hoher Verbrennungsluftüberschuss führte zu den bereits angesprochenen CO-Emissionsspitzen. Bzgl. der Gleichmäßigkeit der Pelletzufuhr ist somit Handlungsbedarf gegeben. Das betrifft nicht nur die mechanische Realisierung (Schneckenengeometrie), sondern auch die Ofenregelung, die insgesamt für den LEFLEX-Pko in Richtung einer geringeren Komplexität überarbeitet werden sollte, da die getestete Regelung sehr viele Korrekturparameter enthielt, deren genaue Auswirkungen auf den Ofenbetrieb nicht klar nachvollziehbar waren.

Außerdem zeigte sich, dass durch die Zuführung der Sekundärluft direkt über dem Brennstoffbett keine ausgeprägte Luftstufung gegeben war, was sich in vergleichsweise hohen x -NO_x-Emissionen widerspiegelte.

Die Testläufe brachten speziell hinsichtlich der Druckverluste und der Wärmeabfuhr über den Wärmetauscher, des Falschlufteintrages und des Verhaltens des Brennstoffbettes wichtige Erkenntnisse für AP 3. Des Weiteren lieferten sie wertvolle Daten bzgl. der Verbrennungsluftaufteilung auf Scheibenluft und Verbrennungsluft, die über die Brennerschale aufgegeben wird. Sie zeigten auch deutlich Optimierungspotentiale für die Entwicklung des LEFLEX-Pko auf:

- Verbesserung der Brennstoff-Förderung in Richtung einer gleichmäßigeren Brennstoffzufuhr
- Entwicklung einer neuen Brennschalengeometrie mit verbesserter Luftstufung und verbesserter Luftdüsengeometrie
- Entwicklung und Implementierung einer vereinfachten und verbesserten Regelung. Dabei sollten auch die Sollwertvorgaben für die Verbrennungsluftregelung in Richtung eines niedrigeren Luftüberschusses sowie einer verbesserten Luftstufung zwischen Primär- und Sekundärluft angepasst werden.

Die Testlaufmethodik samt einer Beschreibung der eingesetzten Analysemethoden, Messmethoden und Messgeräte, die Ergebnisse der Testläufe sowie die daraus gezogenen Schlussfolgerungen wurden von BIOS in einem Bericht zusammengefasst und beim Projektmeeting im Oktober 2022 den Partnern präsentiert und diskutiert. Die Ergebnisse dienen als wichtige Grundlage für die Entwicklung der neuen LEFLEX-Pko Technologie in AP 3.

b) Testläufe bei BIOS

Testläufe mit der Versuchsanlage 1

Der im Zuge von AP3 neu entwickelte und von Olsberg gefertigte Pelletkaminofen (Versuchsanlage 1 – VA1) traf im Dezember 2023 bei BIOS ein. Zu Beginn erfolgte eine Geometrieprüfung und dann die erste Inbetriebnahme, bei der einige regelungstechnische Probleme ausgeräumt werden mussten. Daran anschließend erfolgten erste Testläufe bei Nennlast im Zuge derer schrittweise mechanische Schwachstellen identifiziert und behoben wurden. Ende KW02/2024 konnten dann die Einstellungstests für Nennlast starten. Das daran anschließende Testlaufprogramm bei BIOS dauerte bis Anfang April 2024. Das war deutlich länger als ursprünglich erwartet, da zusätzliche Modifikationen am Ofen und der Regelung (Umprogrammierungen) durchgeführt und getestet wurden. Der Fortschritt der Arbeiten wurde von BIOS in mehreren Berichten dokumentiert (PowerPoint Präsentationen), die mit Olsberg und TFZ in Onlinemeetings sowie mit allen Partnern beim Projektmeeting Ende Januar in Olsberg diskutiert wurden. Diese Berichte enthalten

- eine Beschreibung des Ofens und von Modifikationen am Ofen, die zur Implementierung zusätzlicher Messtechnik von BIOS durchgeführt wurden,
- eine genaue Beschreibung des Teststandaufbaus, der Messmethodik und der verwendeten Messgeräte,
- eine detaillierte Beschreibung der einzelnen durchgeführten Testläufe und der durchgeführten Anpassungen der Regelung bzw. der Regelungsparametrierung,
- die Ergebnisse der Bewertungstestläufe,
- eine detaillierte Schwachstellenanalysen und Vorschläge für Maßnahmen zur Eliminierung der Schwachstellen,
- Schlussfolgerungen und Empfehlungen hinsichtlich der Konzeption eines verbesserten zweiten Prototyps.

Im Zuge der **Geometrieprüfung** wurden die Naturmaße aller wesentlichen Ofenkomponenten geprüft und mit den Konstruktionsunterlagen bzw. den Empfehlungen aus den CFD-Simulationen (AP3) verglichen. Dies umfasste die Prüfung der Geometrien der Brennkammer (Hauptabmessungen) und der Brennerschale

(Durchmesser, Höhe), des Abstandes der Unterkante des Fallrohreintritts zum Rost, der Rostgeometrie, der Sekundärluft-Düsen hinsichtlich Durchmesser und Ausrichtung (Winkel) und des Zündelements. Es wurde festgestellt, dass die Geometrien der Luftklappen (Gesamtluft und Sekundärluft) nicht denen laut den CFD-Vorgaben entsprachen, weshalb die Parametrierung der Regelung an die Naturmaße angepasst werden musste.

Anschließend erfolgte eine **Falschluffprüfung im kalten Zustand**. Dabei wird der Rauchgasaustrittskanal verschlossen und mit einer Nebelmaschine Nebel über die Zuluftansaugung eingeblasen. Austretender Nebel weist auf undichte Stellen des Ofens hin. Dabei identifizierte Schwachpunkte wurden nachgedichtet.

Daran anschließend wurden Testläufe mit dem Kaminofen durchgeführt. Der Teststands Aufbau ist in Abbildung 51 dargestellt.

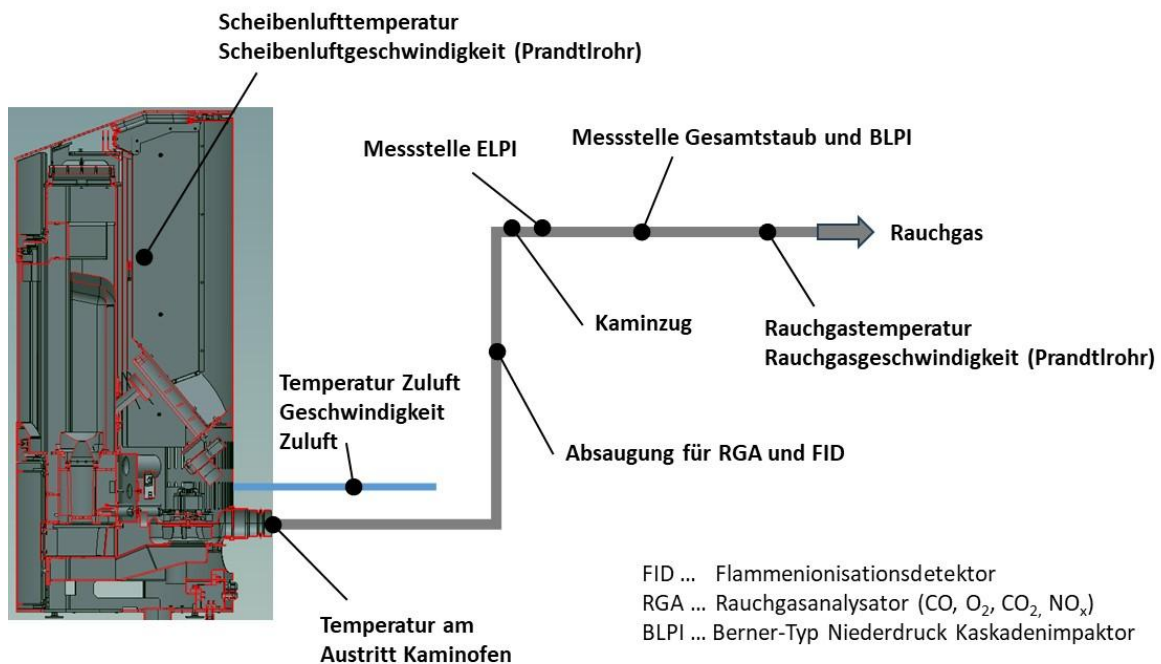


Abbildung 51: Teststandaufbau bei den Testläufen mit Versuchsanlage 1 bei BIOS

Zu diesen ersten Arbeiten ist prinzipiell anzumerken, dass es für BIOS besonders wichtig ist, dass zu untersuchende Prototypen den Vorgaben aus den CFD-Simulationen entsprechen. Nur wenn die Geometrien relevanter Bauteile (Brenner, Luftdüsen, Brennkammer, Wärmetauscher, etc.) sowie die Isolierungen mit den für die CFD-Simulationen verwendeten Rahmenbedingungen übereinstimmen, kann ein sinnvoller Vergleich von Testlaufergebnissen mit den Ergebnissen der CFD-Simulationen erfolgen. Dasselbe gilt auch für Falschluffeinträge. Ein gewisser in der Realität nicht vermeidbarer Falschluffeintrag (z.B. über die Brennstoffzufuhr) wird bei den CFD-Simulationen berücksichtigt, weitere vermeidbare Falschluffeinträge sollten zur besseren Vergleichbarkeit von Simulationen und Messungen aber vermeiden werden.

Nach Beseitigung der identifizierten Schwachstellen, die bei ersten Prototypen neu entwickelter Technologien durchaus auftreten können, wurde mit dem Testlaufbetrieb begonnen. **Im Zuge der Testläufe** wurden weitere **Schwachstellen** identifiziert, protokolliert und wenn möglich behoben. Diese betrafen zum Beispiel die neu konzipierte Pelletszufuhr, die die Pellets unter den Sekundärluftdüsen in den Brennertopf einwirft, und bei der es zu Verstopfungen kam. Blockaden der Brennstoffzufuhr störten den Testlaufbetrieb nachhaltig, da sie in vielen Fällen einen kontinuierlichen Betrieb über mehrere Stunden verhinderten. Um das Problem zu reduzieren, wurden ab Mitte Januar Testläufe mit vom TFZ bereitgestellten so genannten „kurzen“ Pellets gefahren, bei denen derartige Verstopfungen nicht auftraten. In der Zwischenzeit wurde der Pelletfallschacht von Olsberg überarbeitet und dann ein neu konstruierter Fallschacht eingebaut. Die Testläufe wurden dann mit handelsüblichen Pellets fortgesetzt. Während aller Testläufe wurde das vom TFZ bereitgestellte **ENplusENplus A1** Fichtensortiment (siehe Referenz Tabelle 5 und Tabelle 6 AP2) eingesetzt, das auch bei den Testläufen am TFZ verwendet wurde. Außerdem wurde festgestellt, dass sich während der ersten Testläufe das Brennstoffbett schneller als erwartet aufbaute und bereits nach ca. zwei Betriebsstunden die Unterkante des Pelletabwurfs erreichte, was einen Zwischenabbrand zur Betthöhenreduktion notwendig machte. Es wurden Bemühungen unternommen, den Ofenbetrieb weiter in Richtung längerer Betriebszeiten zu optimieren. Dazu wurden in erster Linie die Verbrennungsluftzufuhr und die Luftstufung schrittweise angepasst.

Die genannten schrittweisen Verbesserungen und Umbauten erfolgten im Laufe der Testlaufserien, weshalb beschlossen wurde, die Bewertungstests für die Nenn- und Teillastzustände am Ende der Testlaufserien nochmals mit der endgültigen optimierten Konfiguration zu wiederholen, um sie besser vergleichbar zu machen. Im Zuge der Testlaufserien selbst wurde immer so vorgegangen, dass während erster Testläufe die Parametrierungen der Ofenregelung so angepasst wurden, dass sich ein Betriebszustand einstellte, der mit dem der CFD-Simulationen gut vergleichbar war. Als Bewertungsparameter gelten hier der Brennkammerunterdruck, die Volumenströme der Primärluft und der Scheibenluft sowie der Sauerstoffgehalt im Rauchgas. Mit diesen Einstellungen wurden dann so genannten Bewertungstests gefahren und bezüglich der Emissionen und des Wirkungsgrades ausgewertet.

Die **ersten Testläufe** erfolgten noch mit der ursprünglichen Luftführung und ohne Einsatz von Rauchgasrezirkulation. Bei diesen Testläufen konnte die Nennleistung von 6 kW erreicht werden und es wurden mit CO-Emissionen von $<25 \text{ mg/Nm}^3$, OGC-Emissionen von durchschnittlich $0,5 \text{ mg/Nm}^3$, NO_x/NO_x -Emissionen von durchschnittlich 138 mg/Nm^3 (NO_x als NO_2) und Staubemissionen von durchschnittlich $11,5 \text{ mg/Nm}^3$ (alle Daten bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O_2) sehr niedrige Emissionen erzielt. Der Wirkungsgrad lag mit 93,5 % ebenfalls auf einem sehr hohen Niveau. Vergleiche mit den Ergebnissen der CFD-Simulationen zeigten gute Übereinstimmungen:

- Wärmeleistung: CFD/Testlauf 1,37 / 1,39 kg Brennstoff bzw. 6,6 kW / 6,6 kW Brennstoffwärmeleistung
- Brennkammerunterdruck: CFD: 82 Pa / Testlauf: 79,1 Pa
- O_2 -Gehalt im Rauchgas: CFD: 7,3 Vol% / Testlauf: 8,4 Vol% in der Brennkammer gemessen (ohne Falschlufteintrag über den Ventilator)
- Verbrennungsluftvolumenstrom: CFD: $8,7 \text{ Nm}^3/\text{h}$ / Testlauf: $8,1 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- CO-Emissionen: CFD: 9 mg/Nm^3 / Testlauf: 25 mg/Nm^3 (bez. auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O_2)

Nach Abschluss der oben angesprochenen Modifikationen wurden zur Verifikation der Emissionsdaten die Testläufe mit Nennlast wiederholt und dann der Teillastbetrieb untersucht. Daran anschließend wurden Testläufe mit Rauchgasrezirkulation bei Nennlast und Teillast durchgeführt. Die wichtigste Erkenntnis aus diesen Testläufen war, dass dieselben niedrigen gasförmigen Emissionen wie beim Betrieb ohne Rauchgasrezirkulation erzielt werden konnten, die Staubemissionen aber um ca. 50 % niedriger waren, was auch der Erwartungshaltung auf Basis der Ergebnisse der CFD-Simulationen entsprach. Es wurde somit empfohlen, die neue Kaminofentechnologie mit Rauchgasrezirkulation auszustatten und zu betreiben.

Es zeigte sich jedoch, dass die im Prototyp verfügbare Betthöhe, die durch die Einmündung des Brennstoffabwurf unterhalb der Sekundärluftdüsen begrenzt wird, lediglich Betriebszeiten von ca. 3 Stunden zuließ, bis das Brennstoffbett die Unterkante des Brennstoffeinwurfs erreichte und somit ein Reinigungsabbrand (Abbrennen des Brennstoffbettes bei Stillstand der Brennstoffzufuhr) notwendig wurde. Aus diesem Grund wurde beschlossen, zusätzliche Testläufe mit einer Brennstoffzufuhr oberhalb der Sekundärlufteindüsung durchzuführen (im Folgenden „Abwurf oben“ genannt). Diese Variante ist mechanisch einfacher zu realisieren und ermöglicht eine in etwa doppelt so hohe Brennstoffbetthöhe. Sie hat aber den Nachteil, dass der Brennstoff durch den Sekundärluftdüsenring in den Brenner fallen muss und dabei, auf Grund der im Vergleich zu konventionellen Öfen in diesem Bereich höheren Rauchgasgeschwindigkeiten, Feinanteil mit dem Rauchgas mitgerissen und ausgetragen werden kann. Die Testläufe erfolgten aus oben genannten Gründen (niedrigere Staubemissionen), nur noch mit Rauchgasrezirkulation. Die Betriebszeit zwischen zwei Reinigungsabbränden konnte dabei sowohl im Nennlast- als auch im Teillastbetrieb auf 6 Stunden erhöht werden.

Zu den **Testlaufergebnissen** kann zusammenfassend gesagt werden, dass für beide Abwurfvarianten entsprechende Regelungsparametrierungen gefunden wurden, die einen sehr emissionsarmen und stabilen Betrieb mit einem ansprechenden Flammenbild erlauben. Es ist dabei anzumerken, dass Grundeinstellungen für die Regelung gefunden werden konnten mit denen sich alle untersuchten Szenarien (Nennlast und Teillast bei beiden Abwurfvarianten) betreiben lassen. Die wichtigsten Betriebsdaten, die die Betriebsfälle der CFD-Simulationen in AP3 definieren (Brennkammerunterdruck, Primärluft- und Scheibenluftstrom, Sauerstoffgehalt im Rauchgas) konnten dabei zufriedenstellend reproduziert werden. Besonders erwähnenswert ist, dass der Teillastbetrieb mit lediglich 30 % der Nennleistung (also 2 kW) gefahren werden konnte, was ein sehr niedriger Wert ist. In Abbildung 52 sind die Ergebnisse der Messungen hinsichtlich der erzielten Emissionen zusammengefasst. Des Weiteren enthält Abbildung 52 den Vergleich mit Grenzwerten relevanter Richtlinien und Qualitätszertifikate.

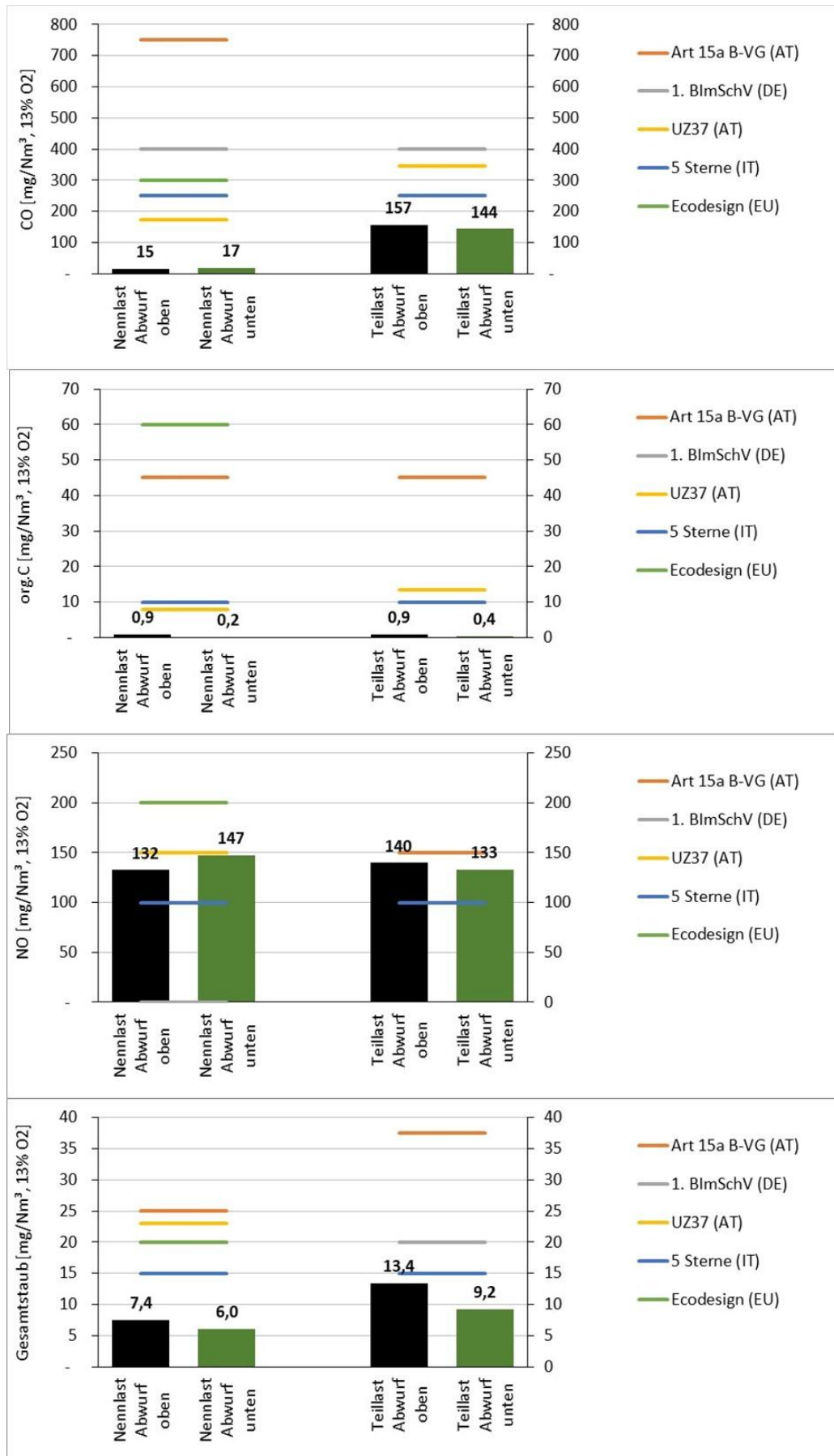


Abbildung 52: Ergebnisse der mit der Versuchsanlage 1 bei Nennlast und Teillast mit Pelletabwurf unterhalb (Abwurf unten) und oberhalb der (Abwurf oben) der Sekundärlufteindüsung erzielten Emissionen und Vergleich mit Grenzwerten relevanter Richtlinien und Qualitätszertifikate (Emissionen bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O₂)

Diskussion der Ergebnisse (alle Emissionen bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O₂).

- CO-Emissionen - Nennlast: mit 15 mg/Nm³ (Abwurf oben) und 17 mg/Nm³ (Abwurf unten) liegen die Emissionen unter 10 % des schärfsten europäischen Emissionsgrenzwertes (UZ37 in Österreich).
- CO-Emissionen - Teillast: mit 157 mg/Nm³ (Abwurf oben) und 144 mg/Nm³ (Abwurf unten) liegen die Emissionen bei ca. 63 % (Abwurf oben) bzw. 57 % (Abwurf unten) des schärfsten Grenzwertes (5 Sterne, IT).
- OGC-Emissionen – Nennlast und Teillast: mit <1 mg/Nm³ (Abwurf oben und (Abwurf unten) liegen die Emissionen im Bereich der Messunsicherheit des eingesetzten Analysators und somit weit unter den schärfsten europäischen Emissionsgrenzwerten.
- NO_x-Emissionen (NO_x als NO₂) - Nennlast: mit 132 mg/Nm³ (Abwurf oben) und 147 mg/Nm³ (Abwurf unten) wird der italienische Grenzwert für das 5 Sterne Zertifikat mit dem eingesetzten Brennstoff um 32 % (Abwurf oben) und 47% (Abwurf unten) überschritten, alle anderen Grenzwerte werden eingehalten. Die NO_xNO_x-Emissionen werden allerdings in erster Linie durch den Stickstoffgehalt des eingesetzten Brennstoffes beeinflusst.
- NO_x-Emissionen (NO_x als NO₂) - Teillast: mit 140 mg/Nm³ (Abwurf oben) und 133 mg/Nm³ (Abwurf unten) wird der italienische Grenzwert für das 5 Sterne Zertifikat mit dem eingesetzten Brennstoff um 32 % (Abwurf oben) und 47 % (Abwurf unten) überschritten. Die NO_xNO_x-Emissionen werden allerdings, wie eben erwähnt, in erster Linie durch den Stickstoffgehalt des eingesetzten Brennstoffes beeinflusst.
- Staubemissionen - Nennlast: mit 7,4 mg/Nm³ (Abwurf oben) und 6,0 mg/Nm³ (Abwurf unten) liegen die Emissionen unter 50 % des schärfsten europäischen Emissionsgrenzwertes (5-Sterne Zertifikat, IT).
- Staubemissionen - Teillast: mit 13,4 mg/Nm³ (Abwurf oben) und 9,2 mg/Nm³ (Abwurf unten) liegen die Emissionen deutlich unter allen europäischen Grenzwerten.

Der Ofen konnte bei Nennlast mit einem Sauerstoffgehalt im Rauchgas von 7,5 Vol% (Abwurf oben) bzw. 8,3 Vol% (Abwurf unten) betrieben werden. Bzgl. des Teillastbetriebes stellten sich O₂-Gehalte von 14,9 Vol% (Abwurf oben) bzw. 13,7 Vol% ein. Es konnten für beide Abwurfvarianten Wirkungsgrade von bis zu 94,8 % (Nennlast) bzw. 97,1 % (Teillast) erzielt werden, was einer Verbesserung zum Bestandsmodell der Firma Olsberg von ca. 6 % (absolut) bedeutet. Die hohen Wirkungsgrade sind ein Resultat des geringeren Luftüberschusses und der niedrigeren Rauchgastemperaturen am Ofenausstritt, die aus dem, durch den geringeren Luftabschluss ebenfalls niedrigeren Rauchgasvolumenstrom, resultieren.

Bezüglich der beiden untersuchten Abwurfvarianten konnte geschlussfolgert werden, dass der Abwurf oben eine längere Betriebsdauer zwischen zwei Reinigungsabbränden und eine einfachere mechanische Umsetzung mit sich bringt. Für den Abwurf unten hingegen spricht ein deutlich geringerer Funkenflug, der zu geringeren Staubemissionen (besonders im Teillastbetrieb) und zu einer geringeren Verschmutzung der Brennkammer und der Wärmetauscher führt. Im Zuge eines Onlinemeetings im April 2024 wurde dieses Thema im Detail diskutiert und von Olsberg die Entscheidung gefällt, den Einwurf von oben im Zuge der Entwicklung des zweiten verbesserten Prototyps umzusetzen. Diese Überlegung erfolgte auf Basis fertigungstechnischer und marktorientierter Erwägungen.

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass die Testläufe mit der Versuchsanlage 1 bei BIOS gezeigt haben, dass mit dem neuen im Projekt entwickelten LEFLEX-PKo Konzept eine Technologie entwickelt werden konnte, die das Potential hat, durch extrem hohe Wirkungsgrade und sehr niedrige Emissionen einen neuen Meilenstein in der Pelletkaminofentechnik zu setzen. Die Testläufe am ersten Prototyp haben aber auch Schwachstellen aufgezeigt, die im Zuge der Konzeption des zweiten verbesserten Prototyps eliminiert werden sollten. Diese betreffen z.B. die Stabilisierung eines hohen Brennstoffbettes auf akzeptablem Niveau, die Erreichung einer entsprechenden Anlagendichtheit und die Optimierung der Verbrennungsluftführung. Der Pelletofen wurde im Anschluss an die Testläufe bei BIOS zum TFZ überstellt.

Testläufe mit der Versuchsanlage 2 (VA2)

Genauso wie bei Versuchsanlage 1, erfolgten Ersttests mit Versuchsanlage 2 bei BIOS, bevor diese für weitere umfangreiche Testläufe zum TFZ überstellt wurde, Ziel dieser Testläufe war es, die Auswirkungen der durchgeführten Modifikationen zu prüfen und die Regelungseinstellungen auf die neuen Rahmenbedingungen anzupassen und zu optimieren.

Im Zuge der **Testläufe mit VA2 bei BIOS**, wurde in einem ersten Schritt wieder eine **Geometrieprüfung** durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Modifikationen wie geplant von Olsberg umgesetzt wurden. In einem nächsten Schritt erfolgten **Falschlufftests** im Kaltzustand. Dabei zeigte sich, dass gewisse Nachbesserungen durch BIOS notwendig waren. Die identifizierten Falschluffströme wurde zum Großteil als vermeidbar eingestuft und sind zum Teil dem Prototypen-Status von VA2 geschuldet. In einer zukünftigen Serienfertigung sollten sie durch entsprechende Anpassung der Produktionsprozesse minimiert werden können.

Im September und Oktober 2024 erfolgten dann die Testläufe mit der VA2 bei BIOS. Dabei wurde zu Beginn von den, mit der VA 1 ermittelten, finalen Regelungseinstellungen ausgegangen. In einem ersten Schritt

wurden die Sollwerte für die Unterdruckregelung an die neuen Verhältnisse von VA2 für den **Nennlastbetrieb** angepasst. Dann erfolgte, ebenfalls bei Nennlastbetrieb, eine Anpassung der Primärluftzufuhr und die Rauchgaszirkulation. Nach Anpassung dieser Parameter konnten im Nennlastbetrieb Emissionen erreicht werden, die bei einem, mit VA1 vergleichbarem Luftüberschuss (8,4 Vol% O₂ im trockenen Rauchgas) am niedrigen Niveau der Emissionen von VA1 lagen.

Erste Testläufe bei **Teillast** zeigten zwar im Vergleich zu VA1 reduzierte Staubemissionen (8,7 mg/Nm³ im Vergleich zu 13,4 mg/Nm³) aber erhöhte CO-Emissionen. Letztere waren vor allem auf ein Freibrennen des Brennstoffbettes im Bereich der Zündluftzufuhr zurückzuführen. Deshalb wurden die Eintrittsquerschnitte der Zündluft nochmals verkleinert. Diese Maßnahme zeigte eine deutliche Abnahme der CO-Emissionen (von 301 auf 179 mg/Nm³) und führte auch zu einer Halbierung der Staubemissionen. Bezüglich des Zündvorganges führte sie zu keinen Verschlechterungen (keine verlängerten Zündzeiten). Es ist dazu anzumerken, dass die Zündluft nicht direkt gemessen werden kann und anhand von Strömungssimulationen auf Basis von Betriebsdaten aus den Testläufen abgeschätzt wurde. Auf Basis dieser Simulationen erfolgten dann auch die durchgeführten Querschnittsverengungen.

Im Anschluss wurden auch die Testläufe bei Nennlast mit den neuen Zündlufteinstellungen wiederholt (siehe Abbildung 53).

Mit diesen verbesserten Regelungseinstellungen, Primärluft- und Rauchgaszirkulationseinstellungen sowie der verringerten Zündluftzufuhr, konnte ein stabiler Betrieb bei Nennlast und Teillast über rund 6 Stunden mit sehr niedrigen Emissionen erzielt werden. In Abbildung 53 und in Abbildung 54 sind die finalen Ergebnisse der Testserie bei BIOS zusammengefasst.

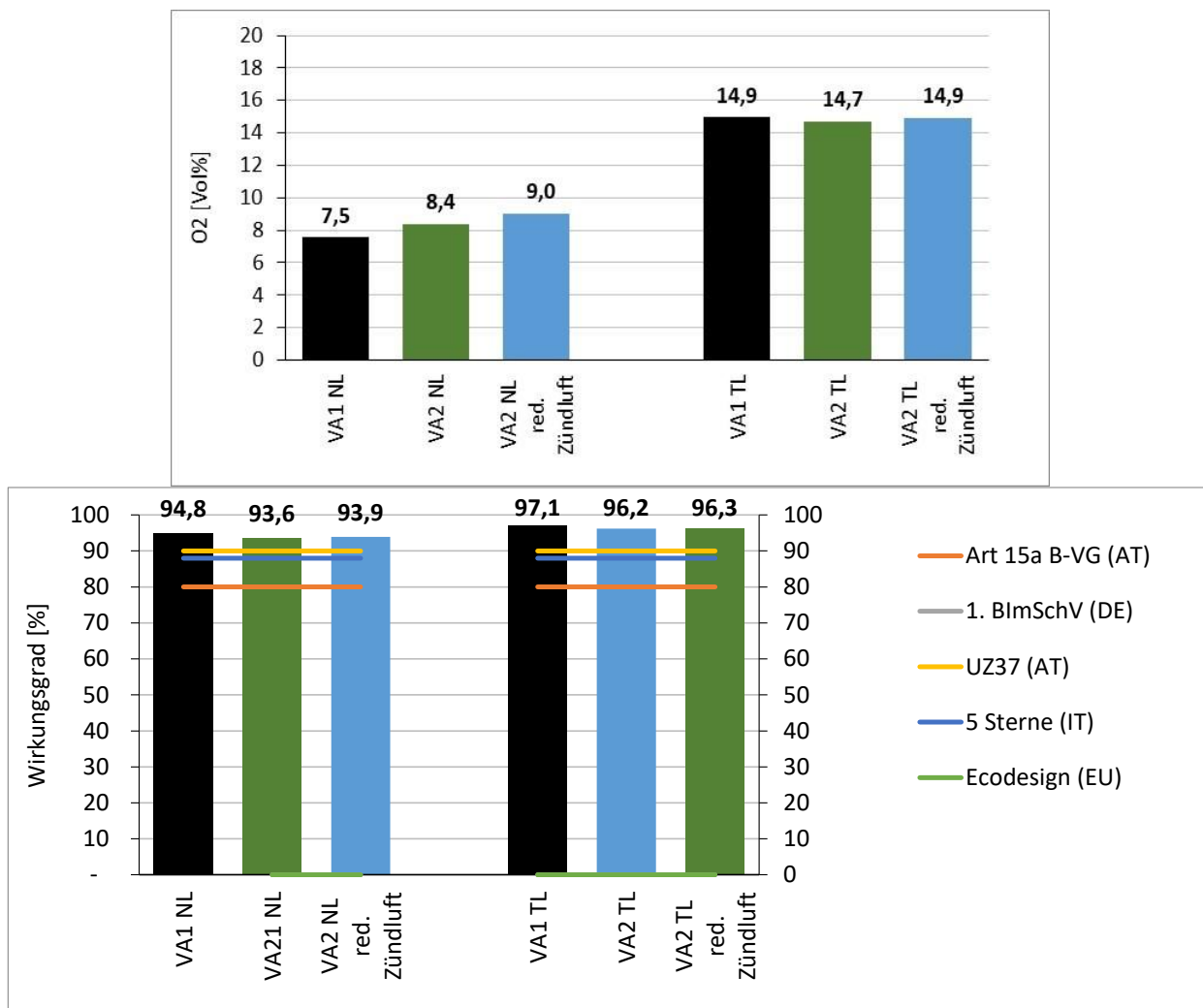


Abbildung 53: Ergebnisse der mit der Versuchsanlage 2 (VA2) bei Nennlast (NL) und Teillast (TL) mit der ursprünglichen und der optimierten Zündlufteinstellung erzielten O₂ Gehalte (bezogen auf trockenes Rauchgas) und Wirkungsgrade im Vergleich zur Versuchsanlage 1 (VA1)

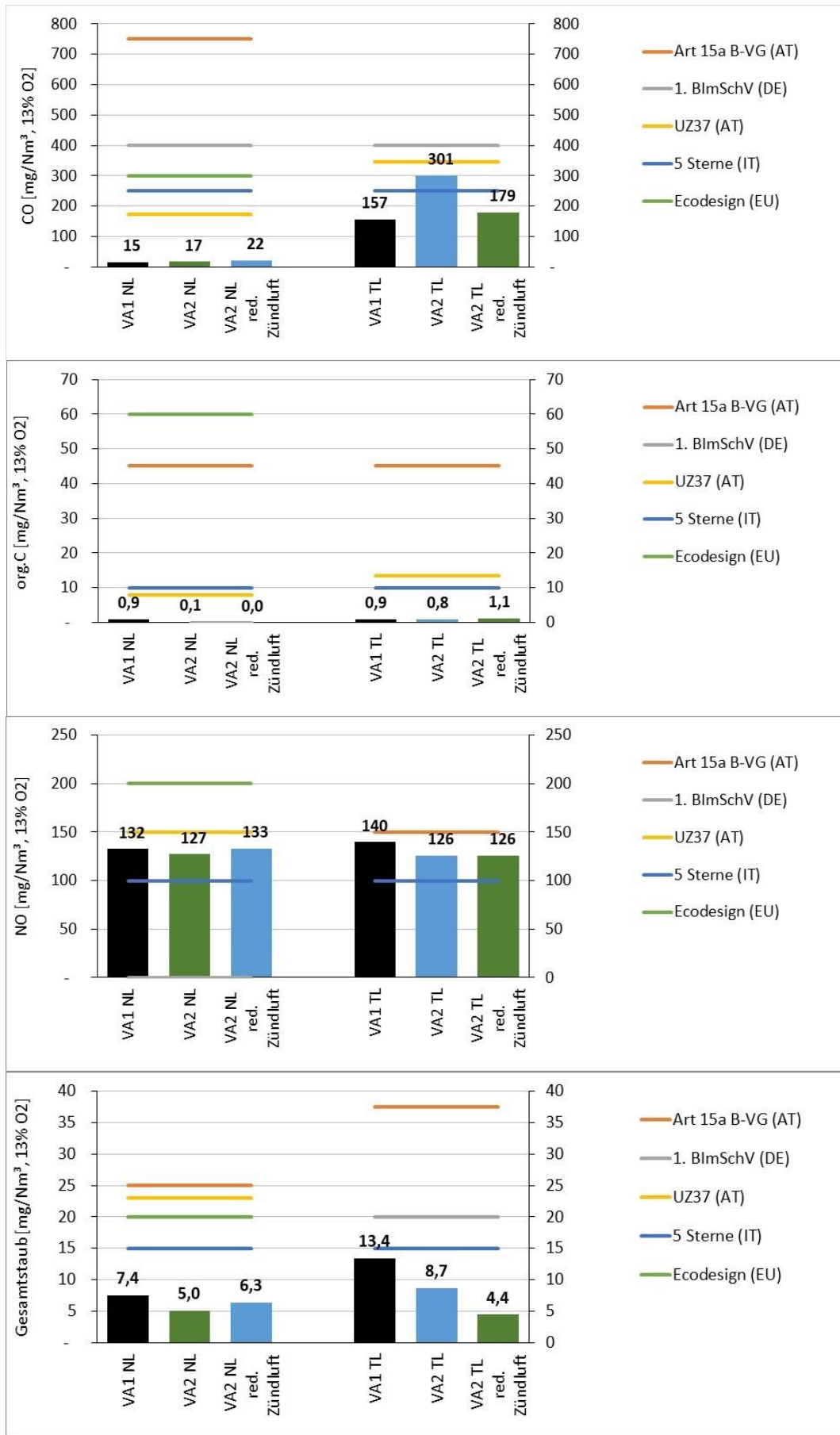


Abbildung 54: Ergebnisse der mit der Versuchsanlage 2 (VA2) bei Nennlast (NL) und Teillast (TL) mit der ursprünglichen und der optimierten Zündlufteinstellung erzielten Emissionen und Vergleich mit Versuchsanlage 1 (VA1) sowie mit Grenzwerten relevanter Richtlinien und Qualitätszertifikate (Emissionen bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O₂)

Diskussion der Ergebnisse:

- O₂-Gehalt - Nennlast: auch mit Reduktion der Zündluft lagen die O₂-Gehalte für VA2 1,0 bis 1,5 Vol% über denen von VA1. Der Falschlufanteil beim Testlauf mit reduzierter Zündluftmenge war aber laut durchgeführten Massen- und Energiebilanzen mit 16,5 % deutlich höher als zuvor (13,1 %), was der Grund für die höheren O₂-Gehalte sein dürfte.
- O₂-Gehalt - Teillast: Die O₂-Gehalte sind mit denen von VA1 vergleichbar
- CO-Emissionen - Nennlast: liegen für VA2 auf ähnlichem Niveau wie für VA1. Sie liegen allesamt deutlich unter den einschlägigen Grenzwerten (<9 % des schärfsten Grenzwertes)
- CO-Emissionen – Teillast: liegen für VA2 mit reduzierter Zündluft auf einem ähnlichen Niveau wie bei VA1. Sie betragen für VA2 72 % des schärfsten Grenzwertes (5 Sterne, IT)
- Org.C-Emissionen - Nennlast und Teillast: bei VA2 wie auch bei VA1 praktisch nicht nachweisbar. Die gemessenen Werte liegen im Bereich der Messunsicherheit des eingesetzten Analysators. Die org.C-Emissionen unterschreiten damit die Grenzwerte um zumindest eine Größenordnung.
- NO_x-Emissionen – Nennlast: liegen bei VA2 im selben Bereich wie bei VA1. Der italienische Grenzwert für 5 Sterne wird von VA2 (mit reduzierter Zündluft) mit dem eingesetzten Brennstoff um 33% überschritten, alle anderen Grenzwerte werden eingehalten. Die NO_xNO_x-Emissionen hängen allerdings vom Stickstoffgehalt des Brennstoffes ab.
- NO_x-Emissionen – Teillast: Die Emissionen von VA2 liegen unter denen von VA1. Der italienische Grenzwert für 5 Sterne wird mit dem eingesetzten Brennstoff um 26 % überschritten, alle anderen Grenzwerte werden eingehalten.
- Staubemissionen – Nennlast: Die Emissionen von VA2 liegen etwas unter denen von VA1. Allgemein liegen die Staubemissionen unter 50% des schärfsten Grenzwertes (5 Sterne, IT)
- Staubemissionen – Teillast: Die Emissionen konnten bei VA2 deutlich reduziert werden, speziell nach Reduktion der Zündluft (von 13,4 auf 4,4 mg/Nm³). Allgemein liegen die Staubemissionen nun deutlich unter dem schärfsten Grenzwert (5 Sterne, IT).

Nach Abschluss der Testläufe wurde die VA2 für weitere umfangreiche Testläufe zum TFZ überstellt.

b) Messungen am TFZ

Am TFZ wurden im Rahmen des Projekts sowohl Messungen an vier marktverfügbaren Pelletöfen ohne Wassertasche als auch an während der Projektzeit von den Projektpartnern Olserg GmbH und BIOS Bioenergiesysteme GmbH entwickelten Prototypen der Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofentechnologie (LEFLEX-PKo) durchgeführt. Die Messungen mit den marktverfügbaren Pelletöfen fanden in Arbeitspaket 2 statt. Zur besseren Darstellung der Brennstoffflexibilität des neu entwickelten LEFLEX-PKo ist eine direkte Gegenüberstellung der Messergebnisse aber sinnvoll, weshalb die Messergebnisse der marktverfügbaren Pelletöfen zusammen mit den Messergebnissen des LEFLEX-PKo in Arbeitspaket 4 gegenübergestellt werden.

Beschreibung der untersuchten Feuerungen

Für die Auswahl der Feuerungen wurde zunächst eine Marktrecherche der gängigen und verfügbaren Technologien im Bereich der Pelleteinzerumfeuerungen (Pelletöfen) ohne Wassertasche durchgeführt. Hierfür wurden auch Besuche auf einschlägigen Messen (Progetto Fuoco 2022 / World of Fireplaces 2023) unternommen, um sich einen besseren Überblick über den Markt zu verschaffen. Die Beschaffung der Pelletöfen gestaltete sich aufgrund des zu dieser Zeit ausgebrochenen Kriegs in der Ukraine und der damit verbundenen extrem hohen Nachfrage nach Einzelraumfeuerstätten als schwierig und langwierig. Trotzdem konnten vier marktverfügbare Geräte beschafft werden.

Die wichtigsten technischen Merkmale der vier marktverfügbaren Geräte und der Prototypen sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Insgesamt wurden vier Öfen mit oberem Abwurf (Ofen 1, 3, 4 und LEFLEX-PKo) und ein Ofen mit Unterschub (Ofen 2) getestet. Dies deckt auch näherungsweise die eher geringe Marktdurchdringung der Unterschubtechnik im Bereich der Pelletöfen ab. Zudem wurde mit Ofen 3 gezielt ein Gerät aus dem Niedrigpreissegment (800 € im Baumarkt) gewählt, um auch diesen in Europa nicht unerheblichen Markt mitzubeleuchten. Bei allen Geräten wurde im Anlieferungszustand und am Ende der Messserie eine Dichtigkeitsmessung durchgeführt. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 15 aufgeführt. Die als raumluftunabhängig deklarierten Geräte (Ofen 1, Ofen 3, Ofen 4 und der Prototyp) hielten die Vorgaben nach EN 16510-1 hinsichtlich der Dichtigkeit für raumluftunabhängige Geräte ein. Ofen 3 und Ofen 4 wiesen besonders niedrige Leckageraten im Bereich von 0,34 – 0,63 Nm³/h bei -15 Pa auf. Dies veränderte sich auch über die Versuchsdauer von insgesamt mindestens 17 Versuchstagen a > 6 h Anlagenbetrieb kaum. Ofen 2 ist nicht als raumluftunabhängig deklariert und muss daher auch keine speziellen Anforderungen an die Dichtigkeit erfüllen. Zudem zieht dieser Ofen die Scheibenspülluft direkt über Luftschlitze an der Ofentür, was eine Messung der Leckarerate bzw. Falschlufabschätzungen nahezu unmöglich macht. Trotzdem wurden Dichtigkeitsprüfungen durchgeführt, die allerdings mit 9,47 bis 13,10 Nm³/h bei -15 Pa sehr hoch ausfielen und nicht wirklich aussagekräftig waren. Alle Öfen wurden mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet, um Druck und Temperatur in der Brennkammer während der Messungen zu erfassen. Einzig bei Ofen 4 war dies nicht

möglich, da der Ofen direkt vom Hersteller zur Verfügung gestellt wurde und ein Anbohren der Ofenhülle untersagt war.

Die Öfen 1, 3 und 4 üben im Betrieb eine automatische Reinigung des Brennertopf aus. Bei Ofen 1 erfolgt dies durch stündliches und bei Ofen 3 durch halbstündliches Erhöhen der Gebläsedrehzahl zum Ausblasen loser Rostasche aus dem Brennertopf. Bei Ofen 4 erfolgt die Reinigung 6 h nach dem Einschalten durch Abkippen des Drehrost und anschließenden Neustart des Ofens.

Tabelle 15: Übersicht der wichtigsten technischen Merkmale der untersuchten Pelletöfen

Feuerung	Ofen 1	Ofen 2	Ofen 3	Ofen 4	LEFLEX-PKo 1 / 2
Nennwärmeleistung in kW	6	8	6	8	6
Feuerungsprinzip	Abwurf, starrer Rost	Unterschub	Abwurf, starrer Rost	Abwurf, Kiprost	Abwurf, Kiprost
Leckage Rate neu bei -15 Pa in Nm ³ /h	2,85	13,10	0,63	0,34	1,82 / 1,16
Leckage Rate nach Messungen bei -15 Pa in Nm ³ /h	1,56	9,47	0,58	0,55	1,78 / 1,21
Besonderheiten	Automatische Regelung der Brennstoffzufuhr (-50 % / +20 %)	Raumluft-abhängig	Baumarktgerät, sehr billig, ca. 800 € Neupreis	Extreme Luftstufung, hohes Glutbett	Extreme Luftstufung, hohes Glutbett, Abgasrezirkulation, automatisch Regelung der Brennstoffzufuhr

Prüfstands-aufbau und Messtechnik

Alle Feuerungsversuche am Feuerungsprüfstand des TFZ sowie die Berechnungen von Leistung und Wirkungsgrad wurden gemäß den Vorgaben der Normen EN 16510-1 [34] sowie EN 16510-2-6 [35] durchgeführt. Für sämtliche Feuerungen wurde der in Abbildung 55 dargestellte Messaufbau verwendet. Bei der Anordnung der Messgeräte wurde die vom Hersteller empfohlene Einlaufstrecke berücksichtigt. Je nach Fragestellung kamen entweder eine einzelne Staubmessungseinrichtung (Nenn- und Teillast) oder zwei Einrichtungen (beReal) zum Einsatz. Die Messungen erfolgten ausschließlich mit Quarz-Planfiltern, da die Filterbelastungen anschließend im Kohlenstoffanalysator (LECO RC 612) analysiert wurden.

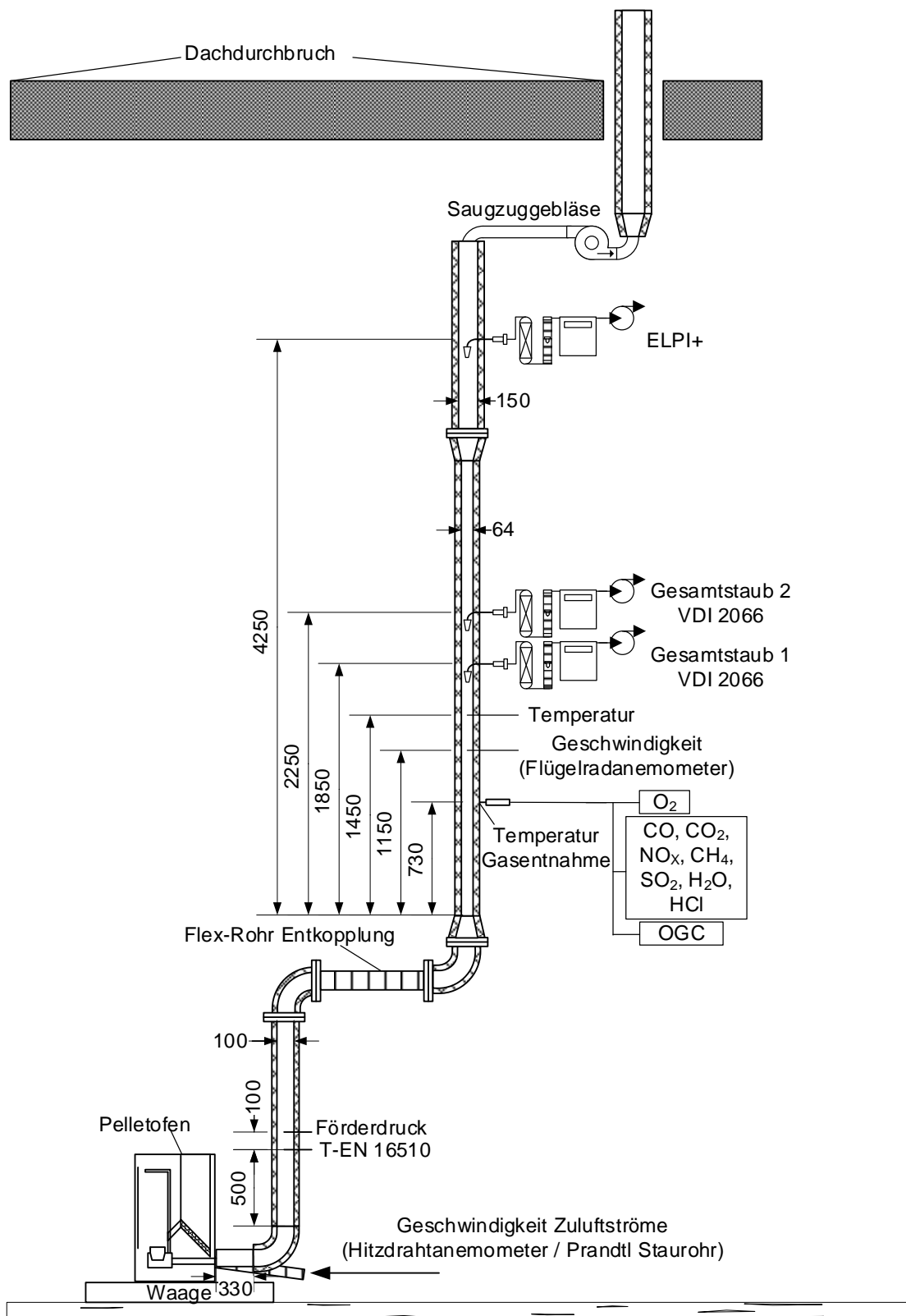


Abbildung 55: Messstrecke und Messaufbau für die Emissions- und Leistungsmessungen von Pelletkaminöfen am Feuerungsprüfstand des TFZ.

Eine Übersicht über die verwendete Messtechnik sowie die angegebenen Messbereiche und Messunsicherheiten ist in Tabelle 16 dargestellt. Alle Messgeräte zur Bestimmung der Gaszusammensetzung wurden vor jedem Versuch mit zertifizierten Kalibriergasen überprüft und bei Bedarf kalibriert. Der Nullpunkt aller Drucksensoren sowie des ELPI+ wurde täglich kontrolliert und gegebenenfalls justiert. Die Staubabsauggeräte wurden monatlich geprüft und kalibriert. Durch diese Maßnahmen wird zu jedem Zeitpunkt der Messungen eine hohe Qualität sowie Rückführbarkeit der Messergebnisse gewährleistet.

Tabelle 16: Übersicht der für die Feuerungsversuche verwendeten Messtechnik.

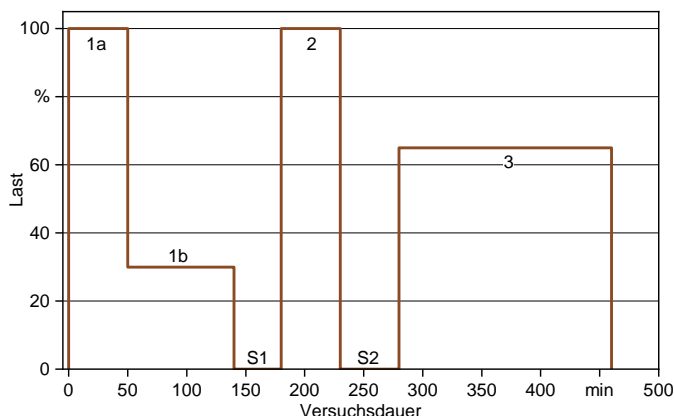
Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ - verfahren	aktiver Messbereich	¹⁾ max. Messunsicherheit (k=2) beim Messbereichsendwert bzw. ²⁾ Fehlergrenze
Umgebungsbedingungen und Betriebsparameter				
Luftdruck	Toss Kombisensor Typ 20500	piezoresistiver Effekt	900 - 1.100hPa	+/- 1 hPa ²⁾
Lufttemperatur	Toss Kombisensor Typ 20500	temperaturabhängige Widerstandsänderung (Pt 1000)	-20 - 50 °C	+/- 0,2 K ²⁾
Luftfeuchte	Toss Kombisensor Typ 20500	Mehrschichtsensor	0 - 100 %	+/- 3 %-Punkte ²⁾
Temperaturen im Abgas und in Luftströmen	Thermoelement (Typ K, Klasse 2)	Thermoelektrizität	0 - 1.000 °C	+/- 2,5 K ²⁾
Abgasgeschwindigkeit	Flügelrad-Strömungssensor FA, Fa. Höntzsch	Drehzahlmessung	0,4 - 20 m/s	1,5 % vom MW + 0,1 m/s ¹⁾
Volumenstrom Gesamtzuluft	Volumenstromsensor Schmidt IL 30.010 MPM	Hitzdrahtanemometer	0,5 - 229 Nm ³ /h	± 3 % vom MW + 0,7 Norm-m ³ /h ¹⁾
Einzelluftströme Zuluft	Prandtl Staurohr, Paul Gothe GmbH	Differenzdruck	-	-
statischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 5000	Membran mit induktivem Abgriff	-200 Pa – 200 Pa	2 Pa ²⁾
dynamischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 9000	Membran mit induktivem Abgriff	0 - 5 Pa	0,05 Pa ²⁾
Abgasbestandteile				
CO ₂	AO 2020 Fa. ABB	Infrarotabsorption	0 – 20 Vol.-%	0,4 Vol.-% ¹⁾
H ₂ O	Gasmeter CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 12,5 Vol.-%	0,4 Vol.-% ¹⁾
			12,5 – 20 Vol.-%	3,3 % vom MW ¹⁾
CO	AO 2020 Fa. ABB	Infrarotabsorption	0 – 100 ppm	2 ppm ¹⁾
			100 – 2.000 ppm	40 ppm ¹⁾

			2.000 – 5.000 ppm	100 ppm ¹⁾
			5.000 – 10.000 ppm	200 ppm ¹⁾
			10.000 – 20.000 ppm	400 ppm ¹⁾
			20.000 – 50.000 ppm	1.000 ppm ¹⁾
NO _x ⁴⁾	CLD 822 Mhr		0 – 50 ppm	2 ppm ¹⁾
	Fa. Eco Physics	Chemiluminiszenz	50 – 2500 ppm	10 ppm ¹⁾
			250 – 1.000 ppm	40 ppm ¹⁾
			1.000 – 5.000 ppm	200 ppm ¹⁾
O ₂	AO 2020 Fa. ABB	Paramagnetismus	0 – 21 Vol.-%	0,2 Vol.-% ¹⁾
Ges.-C ³⁾	Thermo-FID		0 – 100 ppm	4 ppm ¹⁾
	Fa. Mess- &Analyse-technik GmbH	Flammenionisation	100 – 1.000 ppm	40 ppm ¹⁾
			1.000 – 10.000 ppm	400 ppm ¹⁾
			C ₃ H ₈ -Äquivalent	
Partikelanzahl und errechnete PM1 Massenkonzentration	Aerosolgrößenspektrometer ELPI+ Fa. Dekati	elektrisches Niederdruckimpaktorsystem	6 nm – 10 µm	50 #/cm ³ für 10 nm Partikel 20 #/cm ³ für 100 nm Partikel 1.0 #/cm ³ für 1 µm Partikel 0.1 #/cm ³ für 5 µm Partikel
Gesamtstaub gravimetrisch	Staubentnahmesonde mit 45 mm Planfilterhalter; Paul Gothe GmbH + Absaugapparatur mit automatischer isokinetik, Eigenentwicklung TFZ	gravimetrische Messung Filtervorbehandlung 180°C Filternachbehandlung 160°C Wägung bei 22°C und 0 % Luftfeuchtigkeit	-	-
Wärmeleistung und Wirkungsgrad				
Brennstoffverbrauch	Plattformwaage Mettler Toledo KD 600	elektromagnetische Kraftkompensation	0 – 600 kg	37 g ¹⁾
¹⁾ und ²⁾ : siehe Tabellenkopf				
³⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen				
⁴⁾ NO _x = NO + NO ₂				
⁵⁾ Vor- und Rücklaufwassertemperatur, Kühlwassertemperatur, Raumtemperatur				

Ablauf der Messungen

Bei den Messungen im Nenn- und Teillastbetrieb, die in Anlehnung an die Normen EN 16510-1 sowie EN 16510-2-6 durchgeführt wurden, erfolgte zunächst eine Vorprüfung von mindestens einer Stunde, um den stationären Anlagenbetrieb zu erreichen. Anschließend wurden bei allen Feuerungen, mit Ausnahme des Pelletofens 4, Messungen über einen Zeitraum von sechs Stunden durchgeführt. Aufgrund der automatisierten Reinigung nach sechs Stunden konnte bei Pelletofen 4 nur eine Messung über fünf Stunden des stationären Betriebs erfolgen. Insgesamt wurden fünf Staubmessungen à 30 Minuten nach VDI 2066 durchgeführt, die gleichmäßig über die Dauer des stationären Betriebs verteilt wurden. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte stets anhand der Zeiträume der Staubmessungen und wurde anschließend über die fünf Messintervalle gemittelt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Mittelwerte sowie die Minimal- und Maximalwerte über 6 bzw. 5 Stunden Anlagenbetrieb. Die Emissionen sind dabei auf trockenes Abgas bei 0 °C, 1013 hPa und 13 % Restsauerstoff im Abgas bezogen.

Bei den beReal-Messungen wurde von dieser Vorgehensweise abgewichen. Hier erfolgte keine Vorprüfung, da der Ofen ab dem Beginn des Einschaltens im kalten Zustand emissionsseitig vermessen werden soll. Abbildung 56 zeigt den zeitlichen Ablauf des „beReal-Lastzyklus“ sowie die Beschreibung der einzelnen Phasen. Der Zyklus wurde im Rahmen des EU-Projekts „beReal“ entwickelt, um praxisnahe Messungen von Pelletöfen zu ermöglichen. Dabei wurden typische Lastprofile in privaten Haushalten während einer Heizperiode in Feldversuchen erfasst und nach umfangreicher Auswertung der Messdaten abgeleitet. Der dargestellte Zyklus deckt alle in der Praxis beobachteten Zustände ab, wie Kaltstart, Lastwechsel, Standby-Phasen, Warmstarts sowie längere Phasen mittlerer Lastzustände. Der Zyklus wurde so gestaltet, dass er während eines normalen Arbeitstags mit Vor- und Nachbereitung der Messung durchführbar ist. Die Startzeit wird ab dem Moment festgelegt, in dem der Ofen eingeschaltet wird, was anhand eines CO-Werts von 10 ppm im Abgas bestimmt wird. Ab diesem Zeitpunkt wird die erste Staubmessung gestartet. Das Ende der Messung ist erreicht, wenn nach Ablauf der jeweiligen Phase der Ofen ausgeschaltet wird (Phasen 1b, 2, 3) und der Restsauerstoff im Abgas auf 20 % angestiegen ist. Durch die Bezugnahme auf die Abgaswerte der Start- und Endpunkte wird sichergestellt, dass die Messungen unter vergleichbaren Rahmenbedingungen erfolgen. Beim Umschalten von Phase 1a auf 1b erfolgt keine Unterbrechung der Staubmessung; entweder wird die Messung auf demselben Filter fortgesetzt oder es wird ohne Zeitverzug eine zweite Staubmessung begonnen. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt anhand einer speziell entwickelten Vorlage aus dem beReal-Projekt. Dabei werden die Ergebnisse ebenfalls auf trockenes Abgas bei 0 °C, 1013 hPa und 13 % O₂ bezogen. Im Unterschied zu den Messungen im Nenn- oder Teillastbetrieb werden die Emissionen der einzelnen Phasen aufgrund ihrer unterschiedlichen Dauer und Last bei der Mittelwertbildung entweder zeitlich oder anhand des gemessenen Volumenstroms gewichtet. Die Unterschiede zwischen diesen beiden Gewichtungsmethoden sind dabei vernachlässigbar.



Phase	Betriebszustand	Lastzustand	Dauer
1a	Kaltstart	100 %	50 min
1b	Lastwechsel	30 %	90 min
S1	Standby	0 %	40 min
2	Warmstart	100 %	50 min
S3	Standby	0 %	40 min
3	Warmstart	65 %	180 min

Abbildung 56: Zeitlicher Ablauf der beReal Messung mit Beschreibung der einzelnen Phasen.

Vor jeder Messung wurde stets eine vollständige Reinigung des Brennertopfs sowie der Brennkammer des jeweiligen Ofens durchgeführt. Beim Brennstoffwechsel wurde außerdem der Brennstoffbehälter ausgesaugt und verbleibende Reste des vorherigen Brennstoffs aus der Schnecke entfernt. Nach den Testläufen erfolgte die Entnahme der Rostaschen, um den Versinterungszustand mittels Siebanalyse zu bewerten.

Bei den Pelletöfen 2, 3 und 4 besteht die Möglichkeit einer manuellen Anpassung des Brennstoffeintrags sowie der Verbrennungsluftzufuhr, welche über die Gebläsedrehzahl des Abgasgebläses geregelt wird. Für Ofen 4 ist hierfür die Eingabe eines Passworts durch den Kundendienst erforderlich, während die Einstellungen bei den Öfen 2 und 3 frei zugänglich sind. Die Anpassungen erfolgten in Stufen von +3 bis -3 bzw. +5 bis -5 und beziehen sich dabei auf die Schneckendrehzahl bzw. Taktung der Brennstoffzufuhr.

In den jeweiligen Bedienungsanleitungen sind keine detaillierten Anweisungen zur Durchführung dieser Einstellungen oder Hinweise auf die Bezugspunkte (z. B. Flammenhöhe) enthalten, an denen sich der Nutzer

orientieren sollte. Aufgrund fehlender Informationen und mangelnden Bewusstseins seitens der Nutzer ist in der Praxis davon auszugehen, dass diese Einstellungen entweder nicht oder fehlerhaft vorgenommen werden. Daher wurden die Öfen, sofern nicht anders angegeben, in der Werkseinstellung untersucht.

Bei Ofen 1 sowie den Versuchsanlagen erfolgt die Einstellung der Parameter automatisch, sodass eine manuelle Anpassung durch den Nutzer oder den Kundendienst nicht erforderlich ist.

Besonderheiten bei Feuerungsversuchen an den Versuchsanlagen LEFLEX-PKo

Die Versuchsanlage 1 (VA 1) wurde am Prüfstand des TFZ aufgebaut und in Betrieb genommen. Für die Inbetriebnahme waren mehrere Umbauarbeiten an der VA 1 erforderlich:

- Wiederinstandsetzung des Kipprosts durch Austausch und Neueinrichtung der Rostwelle.
- Aufbau einer externen Steuerung des Kipprosts, um eine Wippfunktion sowie Links- und Rechtslauf zu ermöglichen (diese Steuerung wurde später auch für die VA 2 übernommen).
- Wiederaufbau der Luft- und Abgasrezirkulationsleitungen inklusive Kugelhähnen zur Einstellung der Strömungsverhältnisse.
- Austausch der Türdichtung sowie weitere Abdichtungsmaßnahmen.

Es wurde eine Bewertung des Nenn- und Teillastbetriebs ohne aktivierte Brennstoffregelung durchgeführt. Dabei wurden im „manuellen Betrieb“ (ohne automatische Brennstoffanpassung) sehr niedrige Emissionswerte bei Nenn- und Teillast erreicht (siehe Ergebnisse mit ENplus Pellets). Während der Messungen wurden jedoch erhöhte Falschlufteinträge durch Undichtigkeiten, insbesondere im Türbereich, festgestellt. Diese konnten nicht durch einen einfachen Austausch der Türdichtung behoben werden. Daher konnten die im Teillastbetrieb von BIOS gemessenen niedrigen Emissionen am TFZ nicht verifiziert werden. Die Emissionen bei Nennlast lagen jedoch, unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten, nahe an den von BIOS ermittelten Werten. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde im Konsortium beschlossen, keine weiteren Emissionsmessungen mit der VA 1 am TFZ durchzuführen. Stattdessen wurde die Arbeit direkt mit der optimierten VA 2 fortgesetzt. Zusätzlich wurden an der VA 1 Funktionstests zur externen Rostregelung durchgeführt. Dabei konnten sowohl das zyklische Wippen des Rosts als auch ein Reinigungslauf mit Links- und Rechtslauf erfolgreich implementiert und getestet werden.

Es wurden umfangreiche Testreihen mit der Versuchsanlage 2 des neuen LEFLEX-PKo (VA 2) sowohl bei BIOS als auch am TFZ durchgeführt. Eine erste Bewertung des Nenn- und Teillastbetriebs erfolgte ohne aktivierte Brennstoffregelung. Dabei wurden im „manuellen Betrieb“ (ohne automatische Brennstoffanpassung) mit der VA 2 sehr niedrige Emissionswerte bei Nenn- und Teillast erreicht (siehe Ergebnisse im ENplus Pellets). Nach der Implementierung der automatischen Brennstoffregelung (siehe AP3) wurden Messungen bei Nenn- und Teillast mit aktivierter Brennstoffregelung durchgeführt. Anschließend wurde eine Messserie zur Bewertung der Brennstoffflexibilität durchlaufen, bei der alle in AP 2 beschriebenen Versuchspellets im Nennlastbetrieb getestet wurden.

Im Anschluss wurden auf Basis von Simulationsergebnissen des Projektpartners BIOS Optimierungen an der Zündluftmenge, der Scheibenspülluftmenge sowie der Sekundärluftmenge vorgenommen. Nach diesen Optimierungen erfolgte eine erneute Bewertung der Anlage bei Nennlast, Teillast sowie im beReal-Zyklus. Aufgrund der signifikanten Verbesserungen, insbesondere hinsichtlich der Staubemissionen im Nennlastbetrieb, wurden stichprobenartig die wichtigsten Versuchsbrennstoffe erneut in Nennlast-Feuerungsversuchen getestet, um das Potenzial der optimierten Einstellungen hinsichtlich der Brennstoffflexibilität abschätzen zu können.

In den folgenden Beschreibungen der Messergebnisse sind somit Ergebnisse vor und nach der Optimierung sowie im manuellen Betrieb und mit aktivierter Brennstoffregelung der VA 2 dargestellt.

Messungen mit ENplus A1 Pellets

Für die Basisbewertung der untersuchten marktverfügbaren Pelletöfen, sowie der im Projekt entwickelten Versuchsanlagen VA 1 und VA 2 (LEFLEX-PKo im folgenden LFPKO1 und 2) wurde je eine Messung bei Nennlast, Teillast und mittels beReal-Zyklus mit ENplus A1 Pellets der Marke „Power Pellets“ aus dem Projekt FuturePelletSpec 1 durchgeführt (siehe AP 2), um das grundsätzliche Emissionsverhalten der Feuerungen mit marktverfügbarem Brennstoff einzuordnen. Zudem wurde dem TFZ vom Hersteller des Pelletofen 4 ein Prüfbrennstoff mit besonders niedrigem Brennstoffstickstoffgehalt zur Verfügung gestellt. Dieser wird vor allem für die Erreichung der in Italien gültigen Qualitätslabel „5 Stars“ benötigt. Hier gelten für „5 Sterne“ bei Pelletöfen sehr strenge Grenzwerte (CO: 250 mg/Nm³, Staub: 15 mg/Nm³, OGC: 10 mg/Nm³, NO_x: 100 mg/Nm³). Vor allem bei NO_x ist der Grenzwert für „5 Sterne“ nur durch Auswahl eines Prüfbrennstoffs mit besonders niedrigem Stickstoffgehalt zu schaffen. Daher wurde dieser Brennstoff für den emissionsarmen Ofen 4 und den LFPKO2 mit untersucht. Im folgenden Text wird dieser Brennstoff unter der Bezeichnung low NO_x geführt.

Tabelle 17: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Anlagenparameter und Emissionen der Messungen mit ENplus Pellets und dem stickstoffarmen Prüfbrennstoff (lowNO_x) (Mittelwerte der 30-Minuten-Messungen n=5 ± SD; n.b. = nicht bestimmt)

Feuerung	Brennstoff- massenstrom kg/h	Lambda -	T _{Abgas} °C	T _{Brennkammer} °C	Wärmeleistung kW	Wirkungsgrad %	CO mg/Nm ³	OGC mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	Gesamtstaub mg/Nm ³	EC m-%	OC m-%	IC m-%	Salze & Oxide m-%	
Nennlast															
Ofen 1	1,4 ± 0,02	2,1 ± 0,02	138 ± 1	634 ± 3	6,1	91	128 ± 18	2 ± 0	143 ± 1	40 ± 4	20	11	2	67	
Ofen 2	1,5 ± 0,04	2,6 ± 0,17	198 ± 2	657 ± 16	5,9	83	325 ± 80	5 ± 2	141 ± 2	26 ± 1	11	16	1	72	
Ofen 3	1,4 ± 0,07	1,5 ± 0,05	197 ± 4	693 ± 17	6,1	90	49 ± 8	1 ± 0	145 ± 4	33 ± 5	17	6	16	61	
Ofen 4	1,7 ± 0,04	1,8 ± 0,04	186 ± 7	n.b.	7,3	88	18 ± 8	2 ± 1	107 ± 2	7 ± 3	3	10	1	86	
Ofen 4 _{lowNO_x}	1,8 ± 0,06	1,6 ± 0,02	194 ± 7	n.b.	7,5	88	12 ± 7	1 ± 0	81 ± 4	8 ± 4	4	3	1	92	
LFPKO1 _{man}	1,3 ± 0,03	1,6 ± 0,03	97 ± 4	680 ± 8	6	94	12 ± 3	2 ± 0	114 ± 1	8 ± 1	2	9	0	89	
LFPKO2 _{man}	1,3 ± 0,03	1,7 ± 0,04	113 ± 4	689 ± 8	5,9	94	9 ± 2	1 ± 0	119 ± 1	8 ± 1	0	4	0	96	
LFPKO2 _{auto}	1,5 ± 0,17	1,8 ± 0,01	123 ± 3	677 ± 6	6,3	93	12 ± 2	2 ± 1	121 ± 3	10 ± 1	0	2	0	98	
LFPKO2 _{auto opt}	1,3 ± 0,04	1,6 ± 0,04	121 ± 2	681 ± 6	6	94	7 ± 1	1 ± 0	121 ± 1	5 ± 1	0	2	0	98	
LFPKO2 _{auto lowNO_x}	1,3 ± 0,08	1,6 ± 0,04	118 ± 2	678 ± 5	5,6	94	6 ± 2	1 ± 0	103 ± 1	10 ± 2	0	0	1	99	
Teillast															
Ofen 1	0,5 ± 0,07	4,6 ± 0,39	88 ± 1	412 ± 4	2,3	91	901 ± 144	31 ± 10	151 ± 4	38 ± 3	38	7	5	50	
Ofen 2	0,6 ± 0,01	3,6 ± 0,20	112 ± 1	498 ± 21	2,7	88	1020 ± 154	28 ± 14	127 ± 1	27 ± 5	26	13	1	60	
Ofen 3	0,5 ± 0,03	2,7 ± 0,16	107 ± 2	477 ± 12	2,3	92	189 ± 51	3 ± 1	138 ± 2	42 ± 5	57	8	0	35	
Ofen 4	0,8 ± 0,08	3,0 ± 0,18	124 ± 6	n.b.	3,5	88	46 ± 10	3 ± 1	119 ± 3	21 ± 3	10	1	0	89	
LFPKO1 _{man}	0,4 ± 0,02	3,3 ± 0,32	57 ± 1	321 ± 21	1,9	96	174 ± 22	9 ± 1	107 ± 6	17 ± 9	25	12	0	63	
LFPKO2 _{man}	0,4 ± 0,01	3,5 ± 0,10	56 ± 1	324 ± 7	1,8	96	158 ± 20	3 ± 1	91 ± 4	3 ± 2	14	55	1	30	
LFPKO2 _{auto opt}	0,4 ± 0,02	2,3 ± 0,06	52 ± 1	379 ± 7	2	97	80 ± 11	3 ± 0	109 ± 6	3 ± 2	0	24	0	75	
beReal															
Ofen 1	0,7	-	88	463	3,1	92	555	22	146	41	36	12	2	50	
Ofen 2	0,9	-	133	469	3,7	85	1161	113	129	42	32	15	1	52	
Ofen 3	0,9	-	135	543	3,9	91	168	10	146	21	7,5	16	4,5	72	
Ofen 4	1,2	-	128	n.b.	5,5	91	87	7	105	19	13	14	5	68	
LFPKO2 _{auto}	0,9	-	70	514	4,2	96	174	11	121	7	12	15	3	70	
LFPKO2 _{auto opt}	0,9	-	69	515	4,1	97	117	6	117	7	12	15	3	70	

Eine Übersicht über die Mittelwerte der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter und der Emissionen ist in Tabelle 17 dargestellt. Die Nennwärmeleistung und damit auch indirekt der Brennstoffmassenstrom, lag bei Ofen 1 und Ofen 3 und den Versuchsanlagen VA 1 und VA 2 im Bereich des Sollwerts von 6 kW. Ofen 2 verfehlte die angegebene Nennwärmeleistung von 8 kW deutlich (5,9 kW) und Ofen 4 lag mit 7,3 kW ebenfalls unter der angegebenen Nennwärmeleistung von 8 kW. Dies kann bereits ein Indiz für den doch erheblichen Einfluss des Prüfbrennstoffs auf die Nennwärmeleistung bei Anlagen ohne automatische Regelung des Brennstoffmassenstroms sein. Die Nennlast-Wirkungsgrade lagen bei den marktverfügbaren Pelletöfen zwischen 83 (Ofen 2) und 91 % (Ofen 1). Hier konnte bei den Versuchsanlagen mit 93 – 94 % nochmal eine Effizienzsteigerung von 3 % gegenüber dem effizientesten marktverfügbaren Gerät herausgeholt werden. Für die Öfen 1 und 2 stellte sich im Mittel ein eher hohes Luftverhältnis (Lambda) von 2,1 – 2,6 ein, während es sich bei den restlichen Öfen inkl. der Versuchsanlagen bei deutlich niedrigeren Lambdawerten zwischen 1,5 und 1,8 bei Nennlast einpegelte. Die Brennraumtemperaturen lagen (wenn gemessen) mit 634 bis 693 °C in einem engen Band. Die Abgastemperaturen unterschieden sich dagegen mit 97 – 198 °C teilweise doch deutlich. Die Verwendung des low NO_x-Versuchsbrennstoffs des Herstellers von Ofen 4 führte bei Ofen 4 zu einem leichten Anstieg des Brennstoffmassenstroms und der Nennwärmeleistung sowie zu einem leicht verringerten Lambdawert und einer etwas höheren Abgastemperatur, was vermutlich an einer etwas kürzeren Pelletlängenverteilung liegt (siehe Einfluss Pelletlänge). Bei der Versuchsanlage (LFPKO2) fielen diese Änderungen aufgrund der automatischen Brennstoffregelung deutlich niedriger aus, waren aber tendenziell vorhanden.

Bei Teillast lagen die erreichten Wärmeleistungen für die 6 kW Öfen (1, 3, VA 1 und VA 2) zwischen 1,8 und 2,3 kW was 30 – 38 % der Nennwärmeleistung entspricht. Bei den 8 kW Öfen (2 und 4) lag die Teillast-Wärmeleistung bei 2,7 – 3,5 kW bzw. 34 – 44 % der Nennwärmeleistung. In der aktuellen Prüfnorm (EN 16510-2-6) gibt es keine Vorgaben, in welchem Bereich die Teillast dabei liegen muss. Die ermittelten Wirkungsgrade lagen für alle untersuchten Öfen bei Teillast entweder gleich (Ofen 1 und Ofen 4) oder um 2 (VA 1, VA 2 und Ofen 3) bis zu 5 % höher (Ofen 2) als bei Nennwärmeleistung. Bei Teillast lagen die Brennraumtemperaturen erwartungsgemäß mit 321 – 498 °C deutlich niedriger als bei Nennlast, wiesen aber auch gleichzeitig größere Unterschiede zwischen den Öfen auf. Auch bei der Abgastemperatur lag mit 52 – 124 °C eine größere Streuung vor. Die Lambdawerte lagen bei Teillast ebenfalls mit 2,29 bis 4,55 auf einem deutlich höheren Niveau. Interessant ist dabei auch das Verhältnis des Lambdawerts bei Teillast zu dem bei Nennlast, welches bei Ofen 2 (1,3) und der Versuchsanlage 2 im optimierten Zustand (1,4) am niedrigsten lag. Dies bedeutet, dass bei diesen zwei Geräten das Brennstoff-zu-Luft-Verhältnis bei Teillast näher an dem bei Nennlast liegt.

Im beReal-Zyklus lagen die über den gesamten Zyklus gemittelten Brennraumtemperaturen in einem mit dem Teillastbetrieb vergleichbaren Bereich. Lediglich bei den Versuchsanlagen lagen die Brennraumtemperaturen zwischen dem Nennlast- und Teillastbetrieb, die Abgastemperaturen aber relativ nahe am Teillastbetrieb. Die Wirkungsgrade lagen, bedingt durch den hohen Teillastanteil sowie die durch die Start- und Stoppasen niedrigeren Temperaturen, hoch. Die im beReal-Zyklus gemessene Effizienz entspricht dabei einem realistischen Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad, der alle Betriebsphasen abdeckt. Dieser sollte auch wesentlich realitätsnäher sein als der Wert, der nach der EN 16510-1 [34] berechnet wird. Hier werden vom gemessenen Nennlast-Wirkungsgrad lediglich pauschal 10 % abgezogen und anschließend vordefinierte Korrekturfaktoren für bestimmte technische Eigenschaften des Geräts wie z.B. das Vorhandensein einer Raumtemperaturkontrolle (+2 %) addiert. Die Messung nach beReal sollte hier zu einem realistischeren Wert führen, zumal die Wirkungsgrade der Messungen bei allen Geräten höher lagen als die Nennlast Wirkungsgrade. Der nach EN 16510-2-6 geforderte Wert für den Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad von mindestens 79 % [35] scheint auch relativ niedrig gewählt zu sein in Anbetracht der realen Messergebnisse.

Bei den Ergebnissen der Emissionsmessungen gab es zwischen den untersuchten Feuerungen teils deutliche Unterschiede. Abbildung 57 zeigt die CO-Emissionen der untersuchten Feuerungen. Bei Nennlast lag Ofen 2 mit 325 mg/Nm³ oberhalb des Grenzwerts nach Stufe 2 der 1. BImSchV von 250 mg/Nm³ [36]. Ofen 1 lag mit 128 mg/Nm³ verglichen mit Ofen 3 (49 mg/Nm³) und Ofen 4 (18 mg/Nm³) auf einem leicht erhöhten Niveau. Alle Versuchsanlagen erzielten bei Nennlast im Vergleich mit den marktverfügbaren Geräten die niedrigsten CO-Emissionen. Durch die beschriebenen Optimierungmaßnahmen konnten diese von der VA1 mit 12 mg/Nm³ zur VA2 im optimierten Zustand auf 6 mg/Nm³ nochmals halbiert werden. Die Verwendung des low NO_x-Brennstoffs wirkte sich in Anbetracht des niedrigen Niveaus und der Messunsicherheiten bei Ofen 4 und LFPKO2 nicht auf die CO-Emissionen aus.

Im Teillastbetrieb lagen die CO-Emissionen aller untersuchten Öfen, bedingt durch die niedrigere Brennraumtemperatur, auf einem höheren Niveau im Vergleich zur Nennlast. Dennoch überschritten hier nur Ofen 1 (901 mg/Nm³) und Ofen 2 (1020 mg/Nm³) den aktuellen Grenzwert, diesen dafür aber deutlich. Ofen 4 wies mit 46 mg/Nm³ die niedrigsten CO-Emissionen bei Teillast auf, bei den Versuchsanlagen konnte durch Optimierung der Lufteinstellungen sowie der Zündluftmenge eine Verringerung der Teillast-CO-Emissionen von 174 auf 80 mg/Nm³ erreicht werden. Hierzu sollte aber auch erwähnt werden, dass die Teillastwärmeleistung nur beim LFPKO2 bei ca. 33 % der Nennwärmeleistung lag und diese bei Ofen 4 mit ca. 47 % deutlich höher lag. Je niedriger die Teillastwärmeleistung ist, desto kühler wird die Brennkammer und es ist schwieriger noch niedrige Emissionen zu erzielen.

Da im beReal Zyklus sowohl das Zünden als auch der Ausbrand innerhalb der Messzeit stattfinden, ist dieser besonders anspruchsvoll hinsichtlich der CO- und OGC-Emissionen, da in diesen Phasen üblicherweise hohe Peaks an CO zu erwarten sind. Trotzdem lagen hier nur die Öfen 1 (555 mg/Nm³) und 2 (1161 mg/Nm³) über dem Grenzwert. Bei Ofen 1 dürfte dies schlicht an der schlechten Teillast-Performance liegen, während bei Ofen 2 noch eine Besonderheit dazu kommt. Durch die Unterschubtechnik befindet sich bei Ofen 2 relativ viel Brennstoff im System, der beim Abschalten des Ofens komplett abgebrannt wird. Hierbei wird das Abgasgebläse auf eine sehr hohe Drehzahl gestellt. Dies führt dazu, dass einerseits der Brennraum relativ schnell abkühlt und andererseits die brennbaren Gase nur eine kurze Verweilzeit in der Brennkammer haben. Beides ist schlecht für eine Umsetzung von CO zu CO₂. Durch den gleichzeitig großen „Vorrat“ an Pellets in der Schnecke und im Brennertopf braucht Ofen 2 zudem lange, um das Abbruchkriterium für die Messung von 20 % Restsauerstoff zu erreichen. Dies führt in Summe zu den deutlich erhöhten CO-Emissionen im Vergleich zu den anderen Geräten. Hier besteht Optimierungspotenzial seitens der Regelung des Ausbrandvorgangs.

Die CO-Emissionen des günstigen Baumarktgeräts (Ofen 3) sind mit 168 mg/Nm³ selbst im beReal-Zyklus überraschend niedrig. Am besten schnitt hier Ofen 4 ab mit 87 mg/Nm³. Bei der Versuchsanlage 2 konnten die CO-Emissionen vor allem durch Optimierung des Zündvorgangs von 174 mg/Nm³ auf 117 mg/Nm³ gesenkt werden. Durch das hohe Glutbett, das deutliche Vorteile bei den Staubemissionen bietet (siehe unten), hat die Versuchsanlage aber ein ähnliches Problem wie die Unterschubfeuerung. Es dauert lange, bis sich das Glutbett beim Ausschalten des Ofens abbaut, wodurch kurzzeitig hohe CO-Emissionen entstehen. Auch hier besteht weiteres Optimierungspotenzial durch ein gestuftes Abbrennen des Glutbetts, was allerdings nicht mehr innerhalb der Projektlaufzeit getestet werden konnte.

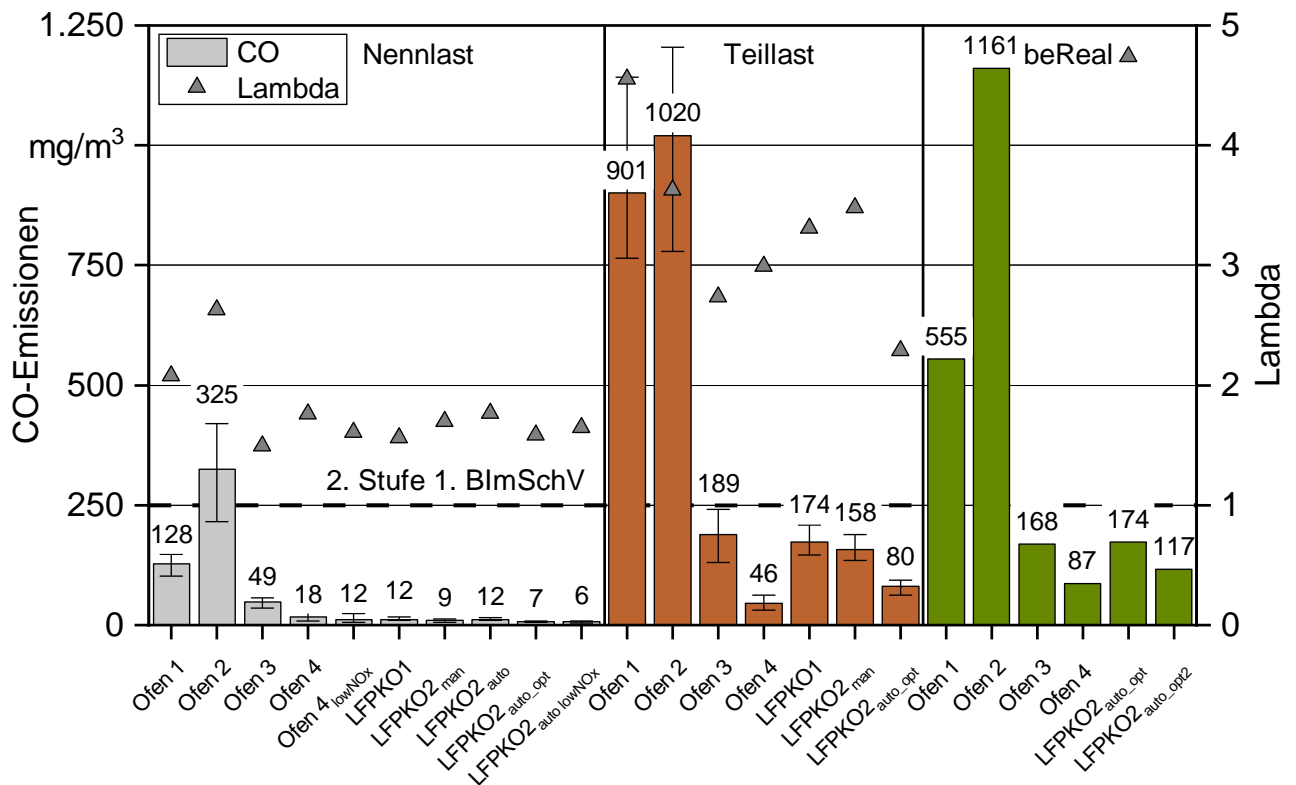


Abbildung 57: CO-Emissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit ENplus Pellets und dem stickstoffarmen Brennstoff (lowNO_x) im Nenn- und Teillastbetrieb sowie im beReal-Zyklus. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Die Emissionen an gasförmigen Kohlenwasserstoffen (OGC) lagen im Nennlastbetrieb mit 1 – 2 mg/Nm³ bei allen untersuchten Öfen nahe an der Nachweisgrenze des verwendeten Analysators (siehe Tabelle 17). Lediglich Ofen 2 wies hier mit 5 mg/Nm³ etwas höhere Werte auf. Im Teillastbetrieb stiegen die OGC-Emissionen bei Ofen 1 und 2 deutlich auf 28 – 31 mg/Nm³ an, während sie bei den anderen untersuchten Öfen mit 3 – 9 mg/Nm³ auf einem niedrigen Niveau blieben. Ein ähnliches Bild ergab sich auch für die OGC-Emissionen im beReal-Zyklus. Hier schnitten Ofen 1 mit 22 mg/Nm³ und vor allem Ofen 2 mit 113 mg/Nm³ deutlich schlechter ab als die restlichen Öfen mit 6 – 10 mg/Nm³. Die Gründe, warum die OGC-Emissionen bei Ofen 2 im beReal-Zyklus so ansteigen, sind dieselben wie bei den CO-Emissionen bereits beschrieben.

Die NO_x-Emissionen (siehe Tabelle 17) hängen maßgeblich vom Brennstoffstickstoff ab und sind daher für die Öfen 1 bis 3 mit 141 – 145 mg/Nm³ auf einem einheitlichen Niveau. Im Vergleich dazu lagen die NO_x-Emissionen der Öfen mit extremer Luftstufung (Ofen 4: 107 mg/Nm³ und LFPKO1 & 2: 114 – 121 mg/Nm³) signifikant niedriger als die herkömmlichen Feuerungen. Grund hierfür ist die langgezogene Vergasungszone, in der hohe CO-Konzentrationen herrschen, die reduzierend auf NO_x wirken. Da die Rostfläche bei Ofen 4

deutlich größer dimensioniert ist als beim LFPKO und damit die Geschwindigkeiten bzw. die Verweildauer des NO_x in der reduzierenden Atmosphäre größer ist, wird dies als Grund für die während aller Messungen niedrigeren NO_x -Emissionen bei Ofen 4 im Vergleich zum LFPKO vermutet. Bei Verwendung des low NO_x -Brennstoffs sanken die NO_x -Emissionen sowohl bei Ofen 4 als auch beim LFPKO2 um ca. 20 mg/Nm^3 ab. Der Unterschied zwischen den beiden Feuerungen blieb damit gleich. Der Grenzwert von 100 mg/Nm^3 für die italienische „5 Sterne“ Bewertung würde mit den gemessenen Werten von Ofen 4 eingehalten, vom LFPKO 2 mit 103 mg/Nm^3 knapp verfehlt. Dies lässt sich durch gezielte Anpassung der Lufeeinstellungen vermutlich beheben. Die NO_x -Emissionen bei Teillast und im beReal-Zyklus variierten nur geringfügig im Vergleich zur Nennlast. Es konnte sowohl ein leichter Anstieg als auch ein leichtes Abfallen bei Änderung des Lastzustands beobachtet werden.

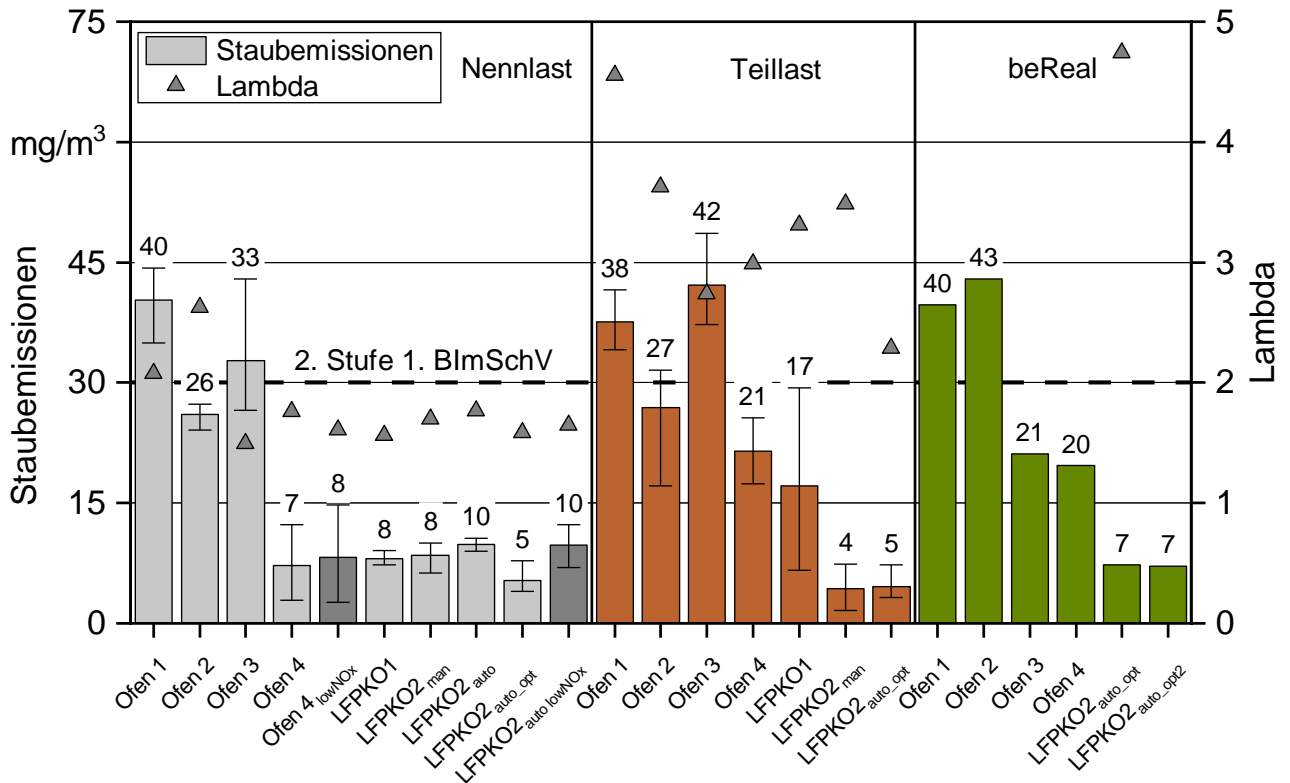


Abbildung 58: Gesamtstaubemissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit ENplus Pellets und dem stickstoffarmen Brennstoff (low NO_x) im Nenn- und Teillastbetrieb sowie im beReal-Zyklus. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Abbildung 58 zeigt die Gesamtstaubemissionen der untersuchten Feuerungen. Bezogen auf den Grenzwert der Stufe 2 nach 1. BImSchV lagen Ofen 1 (40 mg/Nm^3) und 3 (33 mg/Nm^3) bei Nennlast über dem Grenzwert. Ofen 2 lag mit 26 mg/Nm^3 knapp darunter. Die auf dem Vergasungsprinzip mit extremer Luftstufung basierenden Feuerungen (Ofen 4 und LFPKO9 zeigten hier eine klare Überlegenheit bei der Höhe der Staubemissionen gegenüber den Feuerungen mit herkömmlicher Luftstufung. Mit 7 mg/Nm^3 lag Ofen 4 um den Faktor 3,4 – 5,7 niedriger als Ofen 1 bis 3. Die Staubemissionen bei Nennlast lagen bei der Versuchsanlage 1 schon bei lediglich 8 mg/Nm^3 und konnten bei der Versuchsanlage 2 sogar mit automatischer Brennstoffregelung bei optimierten Lufeeinstellungen auf 5 mg/Nm^3 gesenkt werden. Damit lag der LFPKO2 sogar um den Faktor 5,2 bis 8 niedriger als die Ofen 1 bis 3. Die Verwendung des low NO_x -Prüfbrennstoffs hatte keine signifikanten Auswirkungen auf die Staubemissionen.

Im Teillastbetrieb überschritten Ofen 1 (38 mg/Nm^3) und Ofen 3 (42 mg/Nm^3) ebenfalls den Grenzwert. Bei Ofen 2 lagen hier einzelne Messungen über dem Grenzwert, im Mittel wurde dieser jedoch mit 27 mg/Nm^3 wieder knapp unterschritten. Bei Ofen 4 lagen die Staubemissionen im Teillastbetrieb mit 21 mg/Nm^3 dreimal höher als im Nennlastbetrieb. Hier besteht noch Optimierungspotenzial. Mit der Versuchsanlage 1 des LFPKO konnte, wie bereits beschrieben, aufgrund der hohen Undichtigkeiten kein stabiler Teillastbetrieb über 6 h durchgeführt werden. Dies resultierte in einer hohen Streuung der Einzelwerte der Staubmessungen (siehe Fehlerbalken), die mit fortschreitender Messdauer immer weiter anstiegen. Die optimierte Versuchsanlage 2 LFPKO2 hingegen lieferte mit im Mittel 4 mg/Nm^3 im manuellen und 5 mg/Nm^3 im Automatikbetrieb sehr niedrige Werte ab. Diese lagen bei einzelnen Messungen schon in einem mit der herkömmlichen Gravimetrie nur noch schwer messbaren Bereich.

Beim Durchlaufen des beReal-Zyklus überschritten Ofen 1 mit 40 mg/Nm³ und Ofen 2 mit 43 mg/Nm³ den Grenzwert nach Stufe 2 der 1. BImSchV. Ofen 3 und 4 lagen mit 21 und 22 mg/Nm³ relativ nah zusammen. Damit schnitt der günstigste Ofen im realitätsnahen Zyklus gleichwertig mit einem höherpreisigen Gerät mit fortschrittlicher Verbrennungstechnologie ab. Gleichzeitig war er auch deutlich niedriger als bei Nenn- und Teillast. Dies war ein eher überraschendes Ergebnis. Allerdings muss dazu betont werden, dass die Materialstärken der Bleche im Bereich des Feuerraums von Ofen 2 gering sind. Wie dauerhaft der Ofen gute Performance liefert, kann nicht abgeschätzt werden. Der im Projekt entwickelte Prototyp LFPKO2 erreichte auch hier mit 7 mg/Nm³ einen sehr niedrigen Wert, der die aktuellen Grenzwerte um ein Vielfaches unterschreitet.

Insgesamt ist festzustellen, dass die heute am Markt erhältlichen Pelletöfen durchaus in der Lage sind, im realitätsnahen Betrieb niedrige Emissionen zu erreichen. Diese Betriebsweise ist durchaus typisch und wird in der Praxis durch den Automatikbetrieb mit Raumthermostat nahezu in jedem Gerät realisiert. Dabei zeigte sich, dass moderne Feuerungskonzepte durchaus in der Lage sind, die Emissionen nochmals um ein Vielfaches zu reduzieren (Ofen 4 und LFPKO), es aber hinsichtlich der Regelung und Konzeptionierung der Anlage wichtig ist, alle Lastfälle gezielt zu adressieren (siehe Teillast und beReal Ofen 4 vs. LFPKO2).

In Tabelle 17 sind neben den Gesamtstaubemissionen die Anteile an Partikeln aus unvollständiger Verbrennung an den Staubemissionen in m-% dargestellt. Hierbei wurde zwischen Partikeln aus elementarem Kohlenstoff (EC bzw. Ruß) und organischem Kohlenstoff (OC) unterschieden. EC steht dabei auch unter dem Begriff „Black Carbon“ unter dem Verdacht, ein kurzfristig sehr hohes GWP (global warmin potential) zu haben. Die Öfen 1 bis 3 wiesen bei Nennlast hohe EC und OC-Gehalte auf. Dagegen lagen diese bei den Öfen 4 und LFPKO nahe oder bei 0 m-%. Hier lag somit eine nahezu vollständige Verbrennung vor. Bei Teillast lagen die Anteile an Partikeln aus unvollständiger Verbrennung bei den Öfen 1 bis 3 wie erwartet aufgrund der niedrigeren Temperaturen noch höher. Auch Ofen 4 und der LFPKO (vor der Optimierung) wiesen hier nennenswerte Anteile auf. Nach der Optimierung des LFPKO2 wurden allerdings auch bei Teillast kein EC und nur noch geringe Mengen OC unter Berücksichtigung der Höhe der Staubemissionen gemessen. Im beReal-Zyklus lagen die EC-Anteile in den Staubmessungen von Ofen 1 und 2 bei 32 – 36 m-% und bei den restlichen Öfen bei 7,5 – 13 m-%. Aufgrund der mitgemessenen Startvorgänge bei kalten Brennraumtemperaturen lagen die Anteile an OC bei allen Öfen auf einem leicht erhöhten, aber relativ einheitlichen Niveau zwischen 12 und 16 m-%.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass Ofen 4 durch das innovative Brennertopfdesign signifikant niedrigere Schadstoffemissionen aufweist als die restlichen marktverfügbaren Geräte, die sowohl für Nennlast als auch für Teillast und über den beReal-Zyklus deutlich unterhalb der aktuell gültigen Grenzwerte lagen. Dennoch hat auch Ofen 4 bezüglich der Staubemissionen bei Teillast und beReal noch Optimierungsbedarf. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Kaufpreis allein kein Anhaltspunkt für die feuerungstechnische Qualität von Pelletöfen ist. Positiv muss hervorgehoben werden, dass auch heute schon Geräte am Markt verfügbar sind, die bei realitätsnaher Messung nach beReal durgehend unter den Emissionslimits der Stufe 2 nach 1. BImSchV liegen, worunter auch das günstigste Gerät war.

Der neu entwickelte LFPKO in der 2. Version zeigte über alle Messungen mit ENplus Pellets besonders niedrige Emissionen. Bis auf die CO-Emissionen bei beReal lagen diese immer am niedrigsten von allen untersuchten Öfen. Vor allem die Staubemissionen bei niedriger Teillast (30 %) und im beReal-Zyklus bei gleichzeitig niedrigem Anteil von EC („Black Carbon“) sind hier besonders hervorzuheben.

Messungen zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen

Um den Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen verschiedener Pelletöfen mit und ohne automatische Regelung des Brennstoffmassenstroms zu untersuchen, wurden Versuche mit Fichtenpellets mit insgesamt vier verschiedenen Längenverteilungen und Buchenpellets mit drei verschiedenen Längenverteilungen an den vier marktverfügbaren Pelletöfen und dem LFPKO2 durchgeführt. Alle Versuche wurden bei Nennlast nach Erreichen des Beharrungszustands durchgeführt. Zum LFPKO2 ist zu erwähnen, dass dieser mit optimierter Regelung, aber noch vor der letzten Optimierung der Verbrennungsluftströme und Zündluft (siehe oben) untersucht wurde. Dies entspricht dem Entwicklungsstand LFPKO2_{auto} bei den Untersuchungen mit ENplus-Pellets. Es wurde jedoch ein zusätzlicher Versuch mit den Fichtensortimenten mit unterschiedlicher Längenverteilung sowie ein Versuch mit „Buche mittel“ nach der Optimierung durchgeführt, um das Potenzial der Optimierung auch auf die Brennstoffflexibilität abschätzen zu können. Die Ergebnisse werden am Ende dieses Abschnitts diskutiert.

Die Brennstoffparameter der vier untersuchten Fichtensortimente wurden bereits in AP2 beschrieben. Nachfolgend werden nochmals die wichtigsten Längenparameter, die für die Diskussion der Ergebnisse wichtig sind, wiederholt:

- Fichte sehr kurz: Mittlere Pelletlänge = 9,5 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 59,5 m-%; „S“
- Fichte kurz: Mittlere Pelletlänge = 12,0 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 16,5 m-%; „L“
- Fichte mittel: Mittlere Pelletlänge = 16,1 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 8,5 m-% „L“
- Fichte lang: Mittlere Pelletlänge = 21,4 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 3,9 m-% „L“

Die Ergebnisse der wichtigsten feuerungstechnischen Parameter bei der Untersuchung der Fichtensortimente mit vier Längenabstufungen sind in Tabelle 18 und die prozentualen Änderungen bei Brennstoffwechsel gegenüber dem Sortiment „Fichte mittel“ als Referenz in Tabelle 19 für alle untersuchten Öfen dargestellt.

Tabelle 18: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Anlagenparameter und Emissionen der Messungen mit Fichtenpellets in vier Abstufungen der Längenverteilung (Mittelwerte der 30-Minuten-Messungen $n=5 \pm SD$; n.b. = nicht bestimmt)

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom kg/h	Lambda -	T Abgas °C	T Brenn- kammer °C	Wärmeleistung kW	Wirkungsgrad %	CO mg/Nm ³	OGC mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	Gesamtstaub mg/Nm ³	EC m-%	OC m-%	IC m-%	Salze & Oxide m-%
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs														
Fichte sehr kurz	1,4 ± 0,02	1,9 ± 0,02	134 ± 1	642 ± 2	6,4	92	127 ± 14	n.b.	130 ± 1	32 ± 2	22	9	11	58
Fichte kurz	1,4 ± 0,02	2,1 ± 0,02	147 ± 2	640 ± 3	6	90	205 ± 29	3 ± 1	133 ± 1	60 ± 7	38	9	7	46
Fichte mittel	1,5 ± 0,08	1,9 ± 0,03	145 ± 2	640 ± 4	6,3	91	164 ± 24	3 ± 1	138 ± 1	43 ± 4	33	8	11	48
Fichte lang	1,4 ± 0,02	1,9 ± 0,02	150 ± 1	641 ± 3	6,3	90	196 ± 26	3 ± 1	133 ± 1	51 ± 6	40	7	7	46
Ofen 2														
Fichte sehr kurz	1,7 ± 0,05	2,0 ± 0,10	195 ± 1	703 ± 11	7,3	87	181 ± 18	1 ± 1	119 ± 4	50 ± 8	42	7	8	43
Fichte kurz	1,4 ± 0,05	2,6 ± 0,11	191 ± 2	616 ± 14	5,5	82	413 ± 60	3 ± 1	133 ± 1	26 ± 2	10	13	1	76
Fichte mittel	1,4 ± 0,04	2,6 ± 0,11	193 ± 3	603 ± 14	5,4	82	439 ± 64	3 ± 2	134 ± 1	27 ± 2	13	13	1	73
Fichte lang	1,5 ± 0,05	2,3 ± 0,09	199 ± 3	650 ± 14	6,2	84	271 ± 30	2 ± 0	130 ± 1	32 ± 3	27	12	4	57
Ofen 3														
Fichte sehr kurz	1,4 ± 0,07	1,3 ± 0,05	188 ± 0	694 ± 3	6	91	899 ± 372	18 ± 11	116 ± 8	106 ± 39	62	6	1	31
Fichte kurz	1,4 ± 0,03	1,3 ± 0,03	197 ± 1	694 ± 6	6,1	90	96 ± 11	2 ± 0	138 ± 3	34 ± 2	17	12	14	57
Fichte mittel	1,2 ± 0,03	1,5 ± 0,03	189 ± 1	659 ± 2	5,3	89	50 ± 21	1 ± 0	143 ± 3	27 ± 2	7	11	1	81
Fichte lang	1,2 ± 0,03	1,5 ± 0,08	185 ± 3	662 ± 15	5,4	90	46 ± 10	1 ± 0	148 ± 4	28 ± 3	3	8	0	89
Ofen 4														
Fichte sehr kurz	2,1 ± 0,08	1,4 ± 0,03	223 ± 5	n.b.	9	87	187 ± 49	4 ± 1	95 ± 1	39 ± 8	68	4	0	28
Fichte kurz	1,7 ± 0,04	1,8 ± 0,02	188 ± 5	n.b.	7,2	88	9 ± 2	2 ± 0	101 ± 2	7 ± 2	0	7	0	93
Fichte mittel	1,5 ± 0,04	1,9 ± 0,09	173 ± 1	n.b.	6,4	88	19 ± 5	1 ± 0	105 ± 5	14 ± 2	2	10	0	88
Fichte lang	1,5 ± 0,05	1,9 ± 0,12	180 ± 3	n.b.	6,4	88	30 ± 5	1 ± 0	108 ± 6	23 ± 7	0	7	2	91
LFPK02 _{auto} mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufeeinstellungen)														
Fichte sehr kurz	1,5 ± 0,30	1,5 ± 0,01	124 ± 2	718 ± 5	7,1	94	8 ± 1	1 ± 0	112 ± 1	12 ± 2	0	3	0	97
Fichte kurz	1,4 ± 0,04	1,6 ± 0,03	121 ± 4	681 ± 6	6,1	94	15 ± 4	1 ± 0	113 ± 1	14 ± 2	0	2	0	98
Fichte mittel	1,3 ± 0,03	1,7 ± 0,02	122 ± 4	673 ± 7	6	94	21 ± 3	1 ± 0	114 ± 1	14 ± 3	0	2	1	97
Fichte lang	1,4 ± 0,01	1,7 ± 0,03	122 ± 4	673 ± 6	6,2	94	23 ± 3	1 ± 0	114 ± 1	17 ± 3	0	2	0	98

Tabelle 19: Prozentuale Änderung der wichtigsten Emissionen und feuerungstechnischen Parameter beim Brennstoffwechsel gegenüber dem Sortiment „Fichte mittel“

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom	Lambda	CO	OGC	NO _x	Gesamtst aub	EC + OC
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs							
Fichte sehr kurz	-4%	-2%	-22%	n.b.	-6%	-25%	-42%
Fichte kurz	-3%	6%	25%	24%	-4%	39%	37%
Fichte lang	-4%	0%	20%	28%	-3%	19%	25%
Ofen 2							
Fichte sehr kurz	25%	-22%	-59%	-63%	-11%	85%	475%
Fichte kurz	2%	1%	-6%	-12%	-1%	-3%	-23%
Fichte lang	7%	-13%	-38%	-35%	-3%	17%	170%
Ofen 3							
Fichte sehr kurz	15%	-17%	1694%	1902%	-19%	295%	3006%
Fichte kurz	14%	-13%	92%	74%	-4%	27%	387%
Fichte lang	-2%	1%	-7%	-20%	4%	4%	-50%
Ofen 4							
Fichte sehr kurz	42%	-23%	868%	234%	-10%	171%	10549%
Fichte kurz	14%	-6%	-54%	67%	-4%	-55%	-88%
Fichte lang	1%	2%	54%	25%	3%	63%	143%
LFPKO2 _{auto} mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)							
Fichte sehr kurz	13%	-12%	-64%	-26%	-2%	-15%	13%
Fichte kurz	3%	-5%	-31%	-14%	-1%	-1%	10%
Fichte lang	0%	-1%	11%	-14%	0%	18%	3%

Im Wesentlichen wird durch die Änderung der Pelletlänge und dem Anteil an Pellets < 10 mm bei gleicher Schneckendrehzahl der Brennstoffmassenstrom, der in die Brennkammer eingetragen wird, beeinflusst. Dies gilt nicht bzw. nicht in vollem Umfang für Feuerungen mit automatischer Regelung des Brennstoffmassenstroms wie Ofen 1 und den LFPKO2. Lambda, die Brennraum- und Abgastemperatur und die Wärmeleistung des Ofens sind wiederum direkt vom Brennstoffmassenstrom abhängig, d.h. sie werden davon direkt beeinflusst. Dies wird deutlich, wenn man sich die prozentualen Änderungen von Lambda und dem Brennstoffmassenstrom für Ofen 1 und den LFPKO2 im Vergleich mit den anderen Öfen ansieht. Während die Änderungen des Brennstoffmassenstroms bei Ofen 1 nur zwischen -3 und -4 % (nicht signifikant) und beim LFPKO2 zwischen 0 und 13 % (nicht signifikant) lagen, wiesen die Öfen 2 (2 bis 25 %), 3 (-2 bis 15 %) und vor allem 4 (1 bis 42 %) teils große und auch statistisch signifikante Änderungen im Brennstoffmassenstrom auf. Dies schlägt in ähnlicher Größenordnung im Lambdawert und bei der Wärmeleistung durch. Beim LFPKO2 war in dem hier dargestellten Zustand die Brennstoffregelung nach unten hin auch noch auf -10 % vom Standardwert begrenzt, was nach der Optimierung auf -20 % geändert wurde und damit die Änderung des Brennstoffmassenstrom bei sehr kurzen Pellets auf 0 bis 6 % verringerte. Eine automatische Regelung des Brennstoffmassenstroms wirkte sich somit bei sich ändernder Pelletlängenverteilung positiv auf einen stabilen Anlagenbetrieb mit konstanter Leistung und Luft-zu-Brennstoffverhältnis aus, im Gegensatz zu einer Betriebsweise mit starrer Einstellung der Schneckendrehzahl.

Einen Vergleich der CO-Emissionen und Lambdawerte für die Variation der Pelletlängenverteilung bei Fichtenpellets zeigt Abbildung 59. Hier wird eindeutig klar, dass Ofen 1 und der LFPKO2 die mit einer automatischen Regelung des Brennstoffinputs nur geringfügige Schwankungen der CO-Emissionen aufweisen, während bei den Öfen 2 bis 4 ohne diese Regelung teils doch deutliche Unterschiede auftreten. Bei Ofen 2 scheinen die Extrempunkte (sehr kurz und lang) bei den CO-Emissionen eher zu einer Verbesserung zu führen. Gegenüber dem kurzen und mittleren Pelletsortiment, die beide mit 413 bis 439 mg/Nm³ auf einem vergleichbaren Niveau lagen, nahmen die CO-Emissionen für sehr kurze Pellets auf 101 mg/Nm³ (-59 %) und bei den langen auf 271 mg/Nm³ (-38 %) ab. Ähnlich, nur etwas geringer, fielen die Änderungen im Lambdawert aus (-22 und -13 %), was bei diesen Pelletsortimenten zu einem besseren CO-Ausbrand führte. Bei den sehr kurzen Pellets dürfte dies an der erhöhten Brennstoffzufuhr (+25 %) gelegen haben, während bei den langen Pellets vermutlich ein, durch die erhöhte Porosität der Schüttung begünstigter, erhöhter Primärluftanteil den Lambdawert nach unten beeinflusste. Ofen 3 und Ofen 4 reagierten beide stark auf das sehr kurze Pelletsortiment. Bei Ofen 3 stiegen die CO-Emissionen auf 899 mg/Nm³, was ca. dem 17-fachen der mittleren Pellets entspricht. Bei Ofen 4 stiegen die CO-Emissionen zwar nur auf 187 mg/Nm³ an, dies entsprach aber im Vergleich zu dem sehr niedrigen Wert der mittleren Pellets von 19 mg/Nm³ bei den mittleren Pellets einem Anstieg um den Faktor 8,6. Ofen 3, der ohnehin bei niedrigen Lambdawerten betrieben wird, reagierte positiv auf längere Pellets. Hier sanken die CO-Emissionen gegenüber den mittleren Pellets nochmals um 7 %. Dagegen stiegen die CO-Emissionen bei Ofen 4 von den Sortimenten „mittel“ auf „lang“

wieder um ca. 54 %. Dennoch waren die CO-Emissionen bei Ofen 4 auf einem insgesamt unproblematischen Niveau. Der LFPKO2 wies über alle Pelletlängen mit 8 bis 23 mg/Nm³ nahezu keine CO-Emissionen auf. Es ergaben sich zwar prozentuale Unterschiede, diese wren aber im Bezug auf das Gesamtniveau der absoluten Emissionen vernachlässigbar.

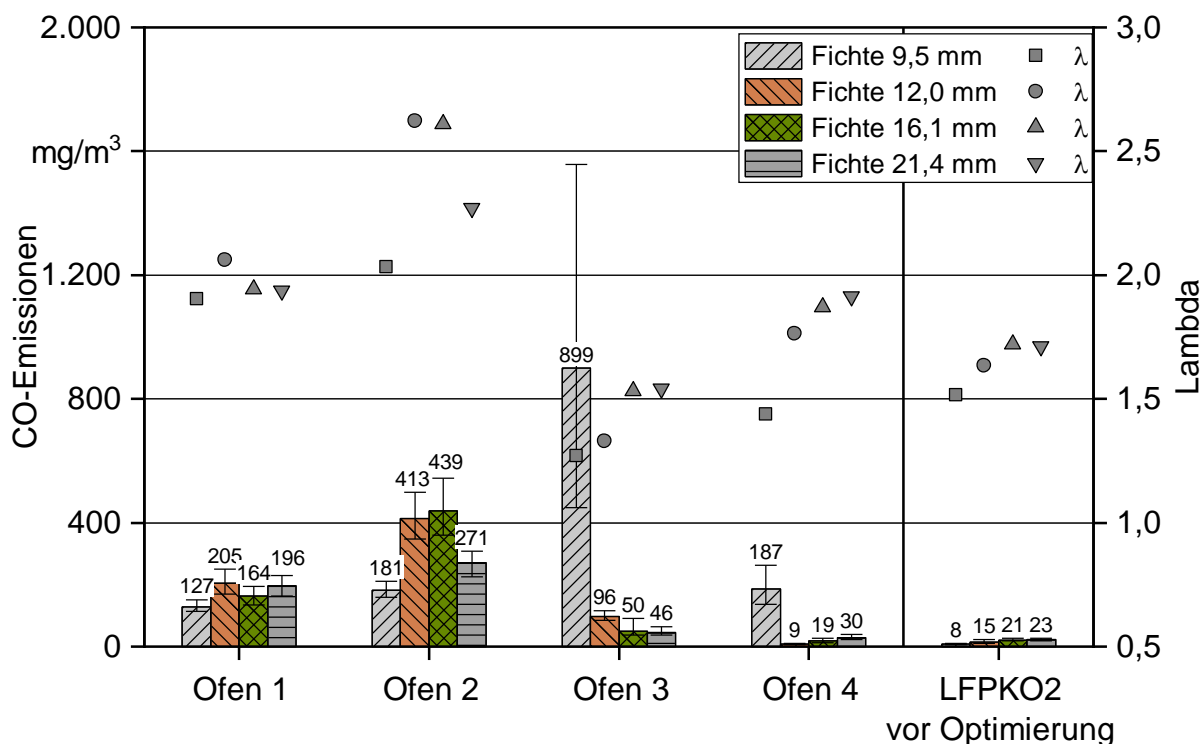


Abbildung 59: CO-Emissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Fichtenpellets mit abgestuften Pelletlängenverteilungen im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Der Zusammenhang zwischen Pelletlänge, Anteil Pellets < 10 mm und den CO-Emissionen, Lambda, sowie dem Brennstoffmassenstrom wird besonders deutlich, wenn man sich die Korrelation der Lambdawerte mit den CO-Emissionen ansieht (siehe Abbildung 60). Die beiden sehr luftdicht ausgeführten Öfen (vgl. Tabelle 15) folgen dabei einer klassischen CO-Lambda-Charakteristik [30], während der undichte Ofen 2 und die beiden Öfen mit automatischer Brennstoffregelung (Ofen 1, LFPKO2) eher einem linearen Trend folgten. Für die unregulierten Öfen 2 bis 4 ergaben sich hohe Bestimmtheitsmaße von 0,99. Bei den geregelten Geräten Ofen 1 und LFPKO2 lässt sich zwar ein linearer Trend erkennen, die einzelnen Punkte der Messungen lagen aber bzgl. der Lambdawerte eng zusammen und auch der Anstieg beim CO war bei Ofen 1 in einem engen Band und beim LFPKO 2 kaum noch messbar. Sehr ähnliche Korrelationen mit vergleichbaren Bestimmtheitsmaßen ergaben sich für die Gegenüberstellung von CO mit dem Brennstoffmassenstrom, der mittleren Pelletlänge und dem Anteil an Pellets < 10 mm (nicht graphisch dargestellt).

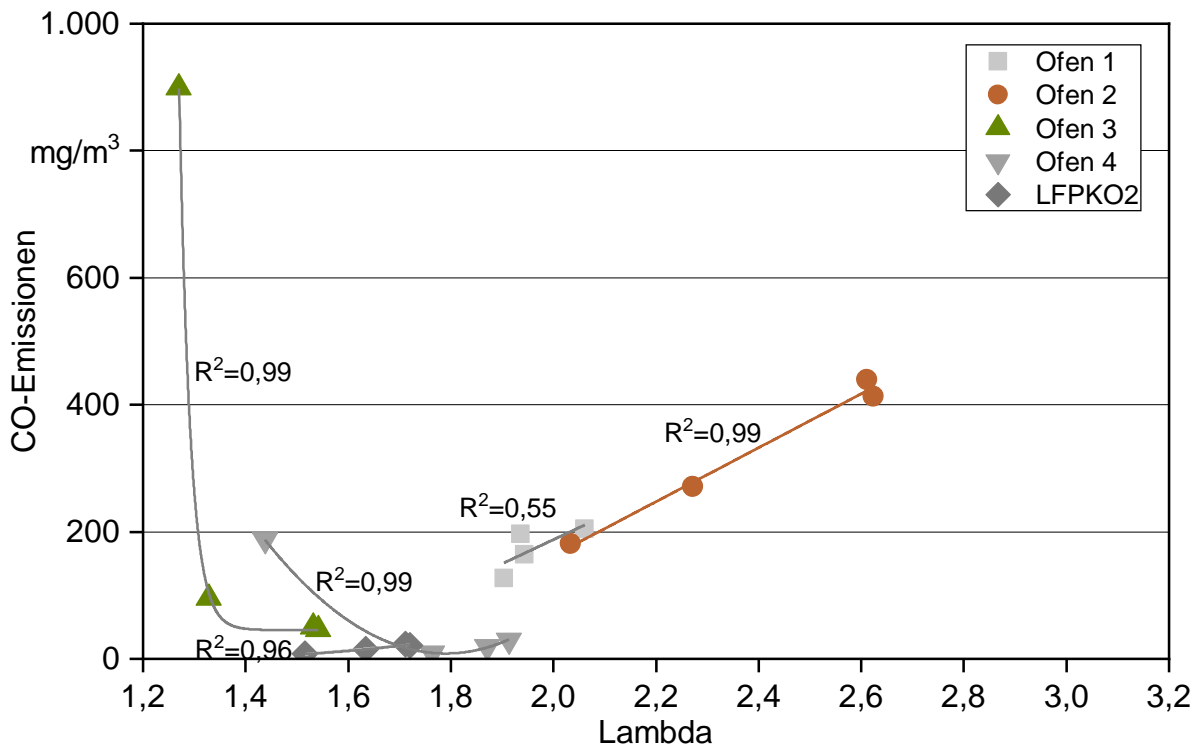


Abbildung 60: Korrelation der CO-Emissionen mit den Lambdawerten bei Variation der Pelletlänge im Nennlastbetrieb mit Fichtenpellets

Die OGC-Emissionen (siehe Tabelle 18) verhielten sich bei Variation der Pelletlänge hinsichtlich der prozentualen Änderungen größtenteils ähnlich zu den CO-Emissionen. Allerdings ist das absolute Niveau bis auf eine Ausnahme immer in einem absolut unproblematischen Bereich zwischen 1 und 4 mg/Nm³. Nur bei Ofen 3 stiegen diese beim sehr kurzen Sortiment auf 18 mg/Nm³ und damit um Faktor 19 gegenüber den mittleren Pellets an.

NO_x-Emissionen (Tabelle 18) sind im Wesentlichen vom Brennstoffstickstoff abhängig. Im geringen Maße werden diese auch von der Höhe der CO-Emissionen beeinflusst, da CO in diesem Fall als Reduktionsmittel wirkt. Dies führte in den hier gezeigten Versuchen aber nur zu geringen Änderungen von +4 bis -19 % gegenüber dem mittleren Sortiment. Am stärksten zeigte sich dieser Effekt bei Ofen 3 für die sehr kurzen Pellets (-19 %), bei denen auch die höchsten NO_x-Emissionen gemessen wurden. Wie auch schon bei den Messungen mit den ENplus Pellets lagen die NO_x-Emissionen für Ofen 4 am niedrigsten (95 bis 108 mg/Nm³), gefolgt vom LFPKO2 (112 bis 114 mg/Nm³). Bei den anderen Öfen mit herkömmlicher Luftstufung lagen die NO_x-Emissionen mit 116 bis 148 mg/Nm³ auf einem vergleichbaren Niveau über der Variation der Pelletlängen.

Abbildung 61 zeigt die Gesamtstaubemissionen der untersuchten Öfen für die Variation der Pelletlänge mit Fichtenpellets. Bei Ofen 1 wurde eine Verdopplung der Staubemissionen zwischen „Fichte sehr kurz“ und „Fichte kurz“ beobachtet. Gleichzeitig lag der Lambdawert für das kurze Fichtensortiment deutlich höher als für die längen Pellets. Bei diesem Ofen wurden während der Versuchsdurchführung immer wieder Undichtigkeiten im Bereich der Aschelade beobachtet. Hierdurch kann es zu Falschlufteinträgen im Bereich der Rostluft gekommen sein, die dann durch Nachziehen des Verschlusses der Klappe an der Aschelade wieder minimiert wurden. Dies könnte den Ausreißer der Staubemissionen bei den kurzen Pellets erklären, der in etwa eine Erhöhung der Staubemissionen von 39 % gegenüber den mittleren Fichtenpellets verursachte. Blendet man das Sortiment „Fichte kurz“ aus, ergab sich ein kontinuierlicher Anstieg der Staubemissionen und auch der Lambdawerte von sehr kurzen zu den langen Pellets. Dies deckt sich mit den Herstellerangaben, nach denen bei der Regelung des Brennstoffmassenstroms maximal + 20 % Erhöhung aber -50 % Absenkung zugelassen werden. Bei den mittleren und langen Pellets dürfte dieser Wert bereits ausgereizt sein und damit ein etwas zu hoher Luftüberschuss zu den erhöhten Staubemissionen geführt haben. Gleichzeitig dürfte auch der Anteil der Primärluft bei längeren Pellets aufgrund eines niedrigeren Druckverlusts über das Glutbett aufgrund der höheren Bettporosität höher sein. Beides führte bei den langen Pellets zu einer Zunahme der Staubemissionen von 19 % und einer Abnahme um -25 % bei kurzen Pellets verglichen mit den mittleren Pellets. Dennoch fielen die Änderungen, verglichen mit den unregelmäßigen Öfen 2 bis 4, immer noch gering aus. Bei den Öfen 2 bis 4 führten die sehr kurzen Pellets in allen Fällen zu einem deutlichen Anstieg der Staubemissionen. Bei Ofen 2 um +85 %, bei Ofen 4 auf das 1,7-fache und bei Ofen 3 sogar das 3-fache im Vergleich mit den mittleren Pellets. Ofen 2 und 3 reagieren dagegen nur geringfügig auf längere Pellets +4 bis 17 %, während dies bei Ofen 4 mit +63 % auch einen deutlichen Effekt hatte. Das Optimum der Staubemissionen lag bei den Öfen auf unterschiedlichen Pelletlängen. Das ist naheliegend, da der Hersteller den Prüfbrennstoff für die Typenprüfung

typischerweise selbst mitbringt und anzunehmen ist, dass die Standardeinstellungen für den Brennstoffeinschub bei den unregulierten Geräten basierend auf diesem Brennstoff eingestellt wurden. Bei Ofen 4 war dies am ausgeprägtesten. Dieser Ofen wies mit den kurzen Pellets sehr niedrige Staubemissionen von 7 mg/Nm^3 auf, was ca. dem Ergebnis der Messungen mit den ENplus-Pellets entspricht, und -55 % gegenüber den mittleren Fichtenpellets. Beim LFPKO2 lagen die Staubemissionen zwischen 12 und 17 mg/Nm^3 vor Optimierung der Luftpfeinstellungen und Zündluftmenge. Dies entsprach lediglich einer Abweichung von -15 bis + 18% gegenüber den mittleren Fichtenpellets auf einem niedrigen Niveau der absoluten Emissionen. Damit war die Varianz der Staubemissionen bei Variation der Pelletlänge mit der optimierten Regelung des LFPKO2 deutlich niedriger als bei den marktverfügbaren Geräten.

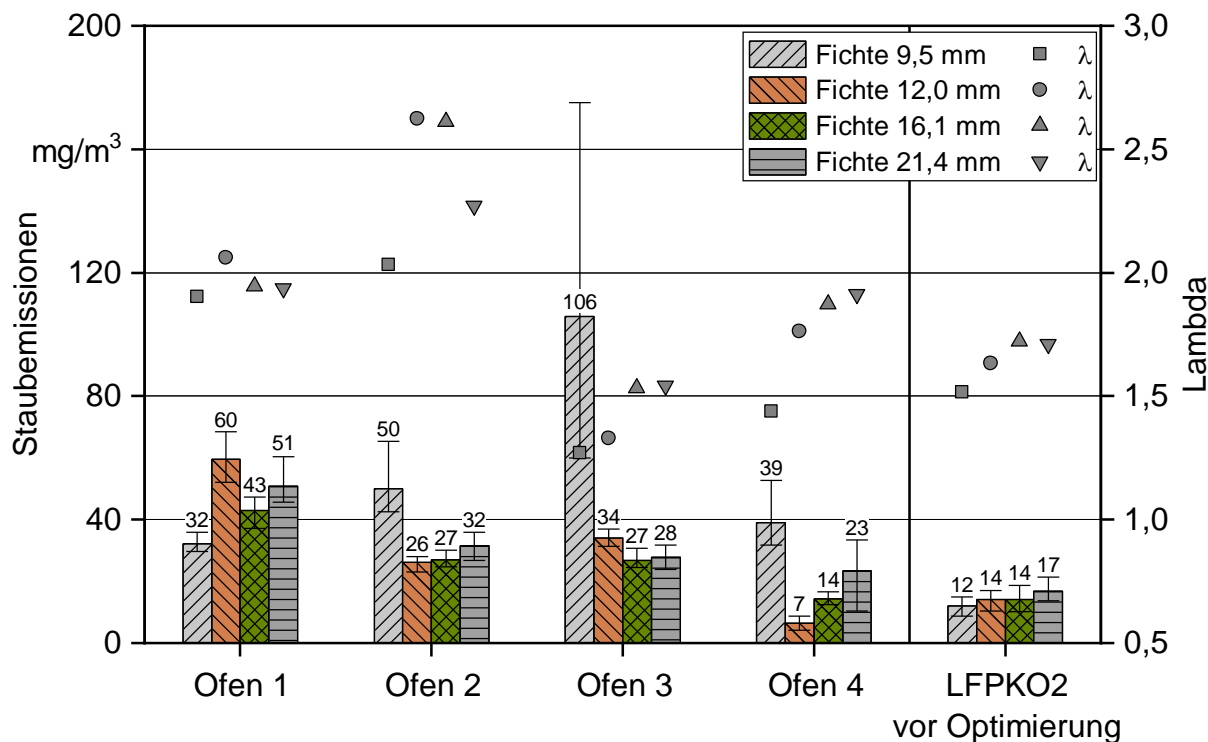


Abbildung 61: Gesamtstaubemissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Fichtenpellets mit abgestuften Pelletlängenverteilungen im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Im Wesentlichen scheint der Anstieg der Staubemissionen durch Änderungen im Bereich der Partikel aus unvollständiger Verbrennung (EC und OC, vgl. Tabelle 18) zustande zu kommen. Hierfür ist vermutlich ein lokaler Luftmangel durch Brennstoffüberschuss im Vergleich zu angebotener Verbrennungsluft verantwortlich. Wie bereits bei den CO-Emissionen ergab sich auch für den Anteil der EC- und OC-Emissionen eine ausgeprägte Korrelation mit den Lambda-Werten für die unregulierten Geräte (siehe Abbildung 62). Für die dicht ausgeführten Geäte führte dies zu einem exponentiellen Anstieg in Form einer CO-Lambda Kurve. Für Ofen 2 war dieser aufgrund der hohen Falschlufteinträge eher linear. Bei Ofen 1 rühren die Unterschiede wahrscheinlich, wie bereits erwähnt, von unregelmäßig auftretenden Falschlufteinträgen im Bereich der Aschelade her. Der LFPKO2 zeigte durchgehend keine EC- und nur sehr geringe OC-Emissionen im Bereich der Nachweisgrenze, unabhängig von der Pelletlänge.

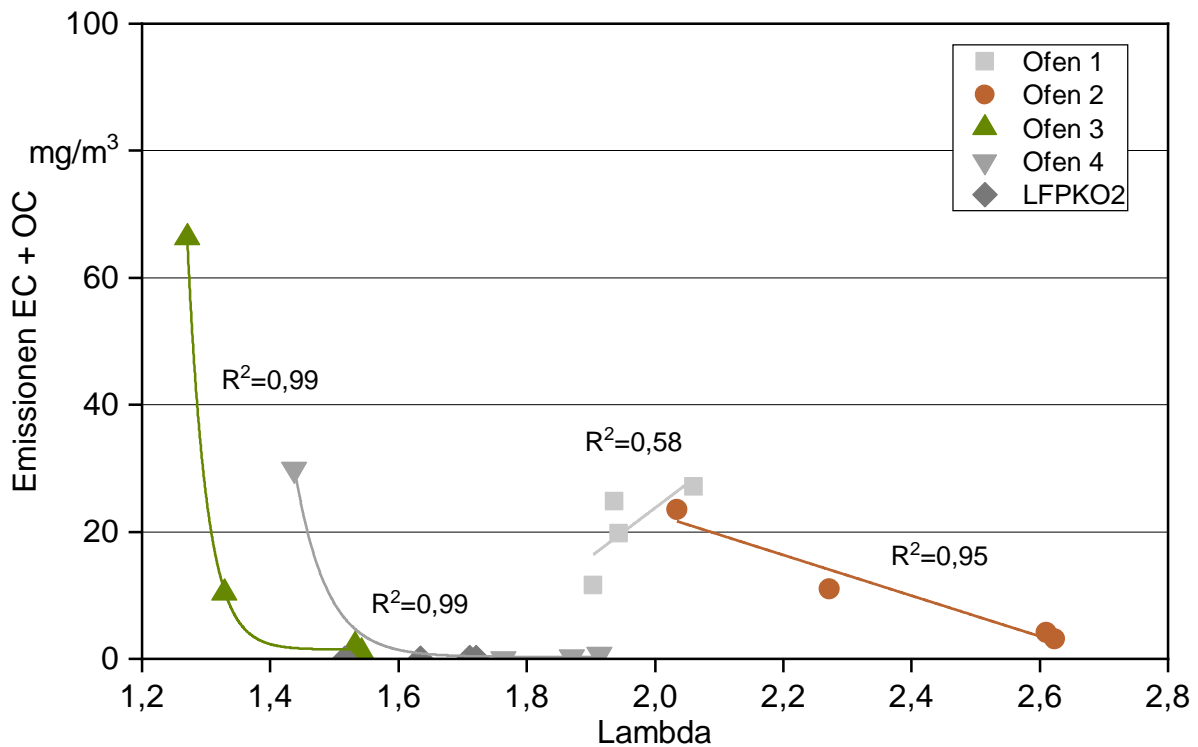


Abbildung 62: Korrelation der Emissionen von EC und OC mit den Lambdawerten der Messungen bei Variation der Pelletlänge mit Fichtenpellets im Nennlastbetrieb

Die Ergebnisse zeigen deutliche Vorteile einer automatischen Brennstoffregelung auf. Um dies auch für die marktverfügbaren, unregelmäßig gerätetypen, wurden die beiden stark auf das sehr kurze Sortiment reagierenden Öfen 3 und 4 nochmals mit diesem Sortiment gemessen, wobei allerdings die Brennstoffzufuhr über das Technikmenü so angepasst wurde, dass die Geräte die vom Hersteller angegebene Nennwärmeleistung erreichten. In Abbildung 63 sind die CO-Emissionen (links) und die Staubemissionen (rechts) der Messung mit den sehr kurzen Fichtenpellets mit Standardeinstellung und angepasster Einstellung der Brennstoffzufuhr dargestellt. Die Anpassung der Brennstoffzufuhr führte dabei zu einem deutlichen Rückgang der CO-Emissionen von 89 % bei Ofen 3 und 95 % bei Ofen 4. Im Fall der Staubemissionen ergab sich ein Rückgang von 68 % bei Ofen 3 und 87 % bei Ofen 4. Bei Ofen 4 lagen die Staubemissionen mit angepasster Brennstoffzufuhr bei 5 mg/Nm³ und damit sogar niedriger als mit den ENplus-Pellets. Der Grund dafür dürfte sein, dass der Ofen mit den im Projekt verwendeten ENplus-Pellets ohne Anpassung der Brennstoffzufuhr nur eine Wärmeleistung von 7,3 kW erreichte, während diese bei den sehr kurzen Fichtenpellets mit angepasster Brennstoffzufuhr bei 7,9 kW und damit näher an der angegebenen Wärmeleistung im optimalen Auslegungspunkt lag.

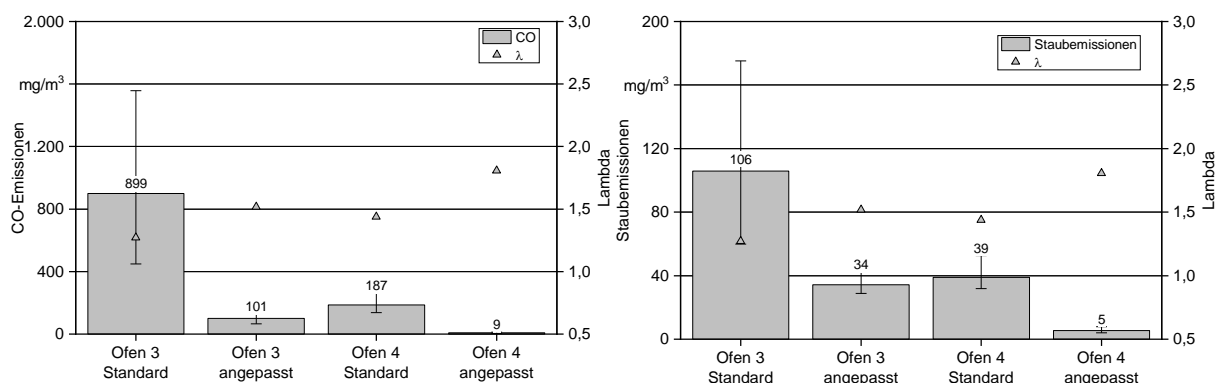


Abbildung 63: CO-Emissionen (links) und Gesamtstaubemissionen (rechts) für die Öfen 3 und 4 unter Verwendung des Pelletsortiments „Fichte sehr kurz“, jeweils betrieben mit Standardeinstellung und angepasster Einstellung der Brennstoffzufuhr. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Die Ergebnisse belegen, dass die hier untersuchten, aktuell am Markt erhältlichen, unregelmäßig gerätetypen, von einer Anpassung der Brennstoffzufuhr auf den jeweiligen Brennstoff maßgeblich profitieren würden. Die Einstellung erfolgte mittels präziser Erfassung des Brennstoffverbrauchs und ist somit vom Endnutzer nicht mit zumutbarem Aufwand umsetzbar.

Zusätzliche zu den Messungen mit Fichtenpellets mit abgestufter Längenverteilung wurden Versuche mit drei Buchensortimenten mit abgestufter Längenverteilung durchgeführt. Die Brennstoffparameter dieser Sortimente ist in AP2 ausführlich beschrieben (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6). Nachfolgend werden nochmals die wichtigsten Längenparameter, die für die Diskussion der Ergebnisse wichtig sind, wiederholt:

- Buche kurz: Mittlere Pelletlänge = 14,2 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 7,9 m-% „L“
- Fichte mittel: Mittlere Pelletlänge = 17,4 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 4,1 m-% „L“
- Fichte lang: Mittlere Pelletlänge = 23,5 mm, Anteil Pellets < 10 mm = 1,2 m-% „L“

Insgesamt waren die Buchenpellets bei gleicher Einstellung der Pelletieranlage etwas länger und der Anteil der Pellets < 10 mm fiel geringer aus als bei den Fichtenpellets. Zusätzlich sollte berücksichtigt werden, dass im Vergleich zur Fichte (465 mg/kg) bei der Buche (1460 mg/kg) ein ca. dreimal so hoher Kaliumgehalt vorlag, weshalb hier naturgemäß mit höheren Staubemissionen zu rechnen ist.

Tabelle 21 zeigt die wichtigsten Ergebnisse der Messungen mit den Buchenpellets in tabellarischer Form und Tabelle 20 die prozentualen Änderungen, bezogen auf die Messung mit dem Sortiment „Buche mittel“. Insgesamt war bei allen marktverfügbaren Geräten ein Rückgang des Brennstoffmassenstroms und der Temperaturen mit steigender Pelletlänge bzw. ein Anstieg bei kürzeren Pellets zu beobachten. Die Lambdawerte sanken mit kürzeren bzw. steigen mit längeren Pellets. Bei Ofen 1 wurde dies durch die automatische Anpassung des Brennstoffmassenstroms deutlich abgemildert, jedoch nicht vollständig kompensiert. Im Gegensatz zur Fichte waren die Änderungen des Brennstoffmassenstroms bei Ofen 1 trotz der automatischen Regelung des Brennstoffmassenstroms signifikant. Auch Ofen 2 scheint aufgrund der Unterschubtechnik weniger anfällig für Änderungen in diesem Längenbereich. Dies deckt sich mit den Ergebnissen für Fichte, wenn man die sehr kurzen Pellets außen vorlässt. Ofen 3 und 4 reagierten wieder relativ stark auf die Änderung der Pelletlänge. Gegenüber der mittleren Buche reagierte Ofen 3 beim Brennstoffmassenstrom mit +13 % (kurz) und -21 % (lang) und Ofen 4 mit +30 % (kurz) und -26 % (lang) am deutlichsten. Beim LFPKO2 scheinen die Änderungen in der Pelletlänge von der optimierten Regelung mit -5 % (kurz) und -5 % (lang) nahezu vollständig kompensiert worden zu sein. Die Änderungen des Brennstoffmassenstroms waren hier statistisch nicht signifikant.

Tabelle 20: Prozentuale Änderung der wichtigsten Emissionen und feuerungstechnischen Parameter beim Brennstoffwechsel gegenüber dem Sortiment „Buche mittel“

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom	Lambda	CO	OGC	NO _x	Gesamtstaub	EC + OC
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs							
Buche kurz	13%	-24%	54%	58%	-6%	19%	-24%
Buche lang	-8%	-2%	-45%	-56%	14%	-7%	-59%
Ofen 2							
Buche kurz	14%	-14%	-27%	-72%	-7%	8%	48%
Buche lang	-5%	6%	16%	29%	1%	0%	13%
Ofen 3							
Buche kurz	13%	-12%	187%	362%	-10%	33%	202%
Buche lang	-21%	35%	-64%	-43%	23%	2%	-61%
Ofen 4							
Buche kurz	30%	-23%	845%	487%	-11%	24%	189%
Buche lang	-26%	31%	38%	106%	7%	-14%	-18%
LFPKO2 _{auto} mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)							
Buche kurz	-5%	5%	37%	83%	-8%	69%	2310%
Buche lang	-6%	9%	56%	37%	2%	15%	83%

Die Nennwärmeleistung wurde nur bei Ofen 1 mit dem kurzen Buchensortiment und für den LFPKO2 für „Buche mittel“ erreicht. Allerdings lag die Wärmeleistung beim LFPKO2 für alle Buchensortimente nahezu bei Nennwärmeleistung (-0,2 bis 0,3 kW), während die anderen Öfen teilweise um bis zu 50 % (Ofen 4, „Buche lang“) weniger Leistung aufwiesen. Hinsichtlich des Wirkungsgrads wurden Änderungen um maximal 1 bis 2 % beobachtet.

Tabelle 21: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Anlagenparameter und Emissionen der Messungen mit Buchenpellets in drei Abstufungen der Längenverteilung (Mittelwerte der 30-Minuten-Messungen $n=5 \pm SD$; n.b. = nicht bestimmt)

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom kg/h	Lambda -	T Abgas °C	T Brenn- kammer °C	Wärmeleistung kW	Wirkungsgrad %	CO mg/Nm ³	OGC mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	Gesamtstaub mg/Nm ³	EC m-%	OC m-%	IC m-%	Salze & Oxide m-%
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs														
Buche kurz	1,4 ± 0,03	1,9 ± 0,05	136 ± 2	636 ± 5	5,9	90	1144 ± 220	24 ± 6	148 ± 4	85 ± 3	1	12	14	73
Buche mittel	1,2 ± 0,12	2,5 ± 0,99	128 ± 3	586 ± 21	5,2	90	743 ± 203	15 ± 5	157 ± 10	72 ± 6	10	15	13	62
Buche lang	1,1 ± 0,03	2,5 ± 0,08	129 ± 5	582 ± 10	4,8	90	406 ± 35	7 ± 1	180 ± 3	67 ± 3	0	12	10	78
Ofen 2														
Buche kurz	1,4 ± 0,02	2,5 ± 0,1	192 ± 2	622 ± 9	5,9	83	765 ± 114	4 ± 1	171 ± 3	75 ± 3	0	9	12	79
Buche mittel	1,3 ± 0,03	2,9 ± 0,18	184 ± 4	567 ± 21	5	81	1049 ± 206	16 ± 15	183 ± 4	69 ± 3	0	7	9	84
Buche lang	1,2 ± 0,03	3,1 ± 0,16	180 ± 3	542 ± 19	4,8	81	1220 ± 221	20 ± 19	185 ± 4	69 ± 1	1	10	9	80
Ofen 3														
Buche kurz	1,3 ± 0,06	1,3 ± 0,11	165 ± 5	635 ± 11	5,4	91	1304 ± 962	27 ± 25	148 ± 19	79 ± 15	30	14	5	51
Buche mittel	1,1 ± 0,03	1,5 ± 0,06	154 ± 5	590 ± 8	4,8	91	454 ± 394	6 ± 5	165 ± 11	59 ± 10	6	8	9	77
Buche lang	0,9 ± 0,04	2 ± 0,04	154 ± 3	545 ± 7	3,7	89	165 ± 37	3 ± 1	204 ± 1	61 ± 1	0	4	6	90
Ofen 4														
Buche kurz	1,7 ± 0,03	1,7 ± 0,03	185 ± 3	n.b.	7,3	88	639 ± 79	9 ± 1	125 ± 2	67 ± 4	0	6	13	81
Buche mittel	1,3 ± 0,03	2,2 ± 0,05	166 ± 3	n.b.	5,6	87	68 ± 5	1 ± 0	141 ± 3	54 ± 3	0	6	6	88
Buche lang	1 ± 0,05	2,9 ± 0,19	141 ± 3	n.b.	4,1	87	93 ± 17	3 ± 0	151 ± 2	46 ± 8	0	11	5	84
LFPKO 2 _{auto} mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)														
Buche kurz	1,3 ± 0,06	1,8 ± 0,04	116 ± 1	676 ± 7	5,7	94	44 ± 14	2 ± 1	139 ± 2	49 ± 7	0	4	5	91
Buche mittel	1,4 ± 0,05	1,7 ± 0,03	117 ± 6	670 ± 9	6,1	94	33 ± 15	1 ± 0	151 ± 3	29 ± 3	0	2	0	98
Buche lang	1,3 ± 0,03	1,8 ± 0,03	119 ± 4	644 ± 9	5,8	93	51 ± 19	1 ± 0	154 ± 2	34 ± 4	0	2	0	98

Die CO-Emissionen für die Buchenpellets (siehe Abbildung 64) lagen insgesamt für alle untersuchten Öfen auf einem deutlich höheren Niveau verglichen mit den Fichtenpellets. Dies ist vermutlich durch die andere Verteilung von Cellulose und Hemizellulose und damit einer bei Buche beschleunigten Freisetzung flüchtiger Bestandteile zu erklären [37]. Hinzu kommt durch die andere chemische Zusammensetzung des Brennstoffs ein anderer Aufbau des Aschebetts und damit Veränderungen in der Primärluftzufuhr. Mit Werten bis 1304 mg/Nm³ und Einzelmessungen deutlich darüber (Ofen 3) lagen die CO-Emissionen bei Ofen 1 bis 3 für fast alle untersuchten Buchensortimente (außer Ofen 3, „Buche lang“) über dem aktuellen Grenzwert von 250 mg/Nm³. Während die Abwurffeuerungen (Ofen 1, 3 und 4) bei einer Erhöhung der Pelletlänge und damit auch des Lambdawerts mit sinkendem CO reagieren, scheint dies bei der Unterschubfeuerung (Ofen 2) genau den entgegengesetzten Effekt zu haben. Bei Ofen 1 fielen die Änderungen aufgrund der automatischen Regelung des Brennstoffmassenstroms mit +54 % (Buche kurz) und -45 % (Buche lang) gegenüber dem mittleren Buchensortiment noch moderat aus verglichen mit den anderen marktverfügbaren Pelletöfen mit Abwurffeuerung. Man erkennt wie bereits bei den Fichtenpellets, dass die Regelung des Brennstoffmassenstroms nach oben mit +20 % bei den hier untersuchten Längevariationen deutlich an ihre Grenzen stößt. Die Unterschubfeuerung (Ofen 2) reagierte mit -27 % (Buche kurz) und +16 % im Vergleich mit „Buche mittel“ am moderatesten. Ofen 3 und Ofen 4 reagierten am stärksten von allen Öfen, vor allem auf das kurze Buchensortiment mit dem 1,9-fachen (Ofen 3) bis 8,5-fachen (Ofen 4) der CO-Emissionen verglichen mit „Buche mittel“. Ofen 4 wies für alle Buchensortimente die niedrigsten CO-Emissionen aller marktverfügbaren Geräte auf. Für „Buche mittel“ (68 mg/Nm³) und „Buche lang“ (93 mg/Nm³) lagen diese auch unter 250 mg/Nm³. Die CO-Emissionen des LFPKO2 vor Optimierung lagen mit 44 bis 51 mg/Nm³ auf einem sehr niedrigen Niveau verglichen mit den marktverfügbaren Feuerungen. Auch die prozentualen Änderungen verglichen mit „Buche mittel“ lagen mit 37 bis 54 % und, bezogen auf das absolute Niveau, sehr niedrig. Es ergaben sich vergleichbare Korrelationen zwischen CO und Lambda wie bei den Fichtenpellets (nicht dargestellt).

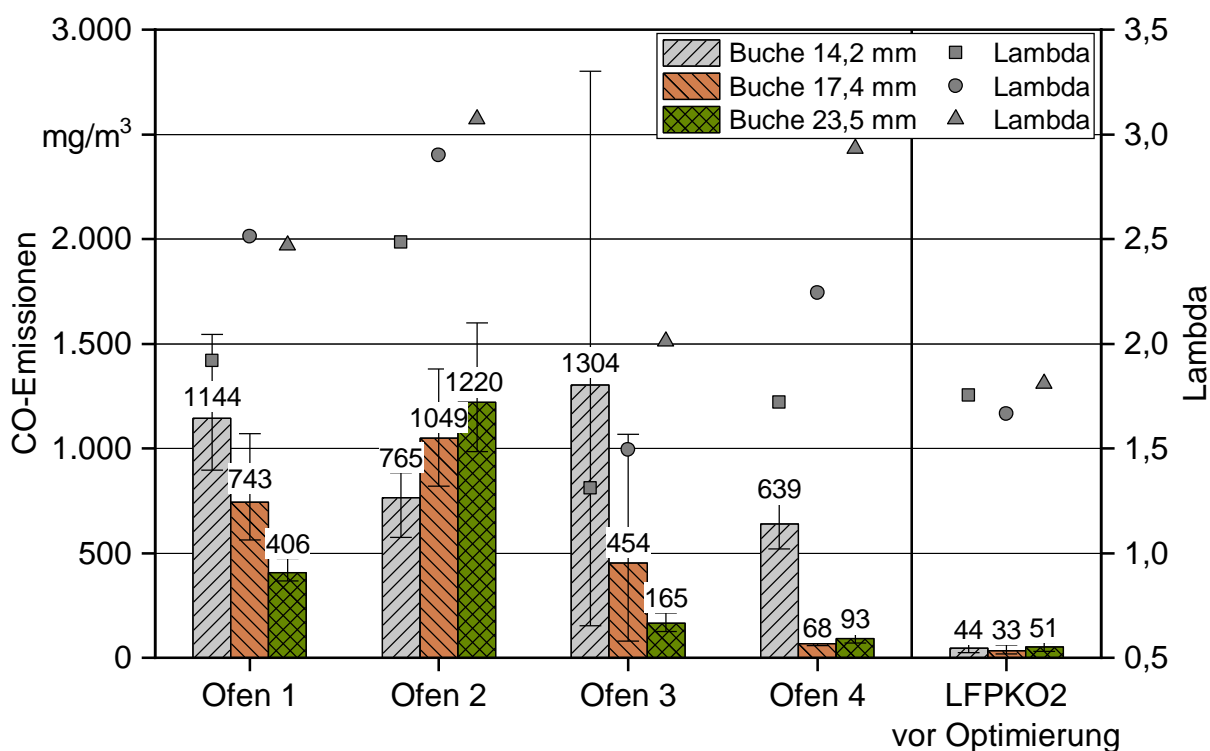


Abbildung 64: CO-Emissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Buchenpellets mit abgestuften Pelletlängenverteilungen im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Auch die OGC-Emissionen (Tabelle 21) fielen für die marktverfügbaren Öfen mit bis zu 27 mg/Nm³ (Ofen 3, „Buche kurz“) deutlich höher aus als mit den Fichtenpellets. Die Trends und prozentualen Änderungen verhielten sich dabei ähnlich zu denen der CO-Emissionen. Beim LFPKO2 unterschieden sie sich mit 1 bis 2 mg/Nm³ kaum von denen der untersuchten Fichtenpellets und wiesen zudem keine wirklich messbaren Unterschiede auf.

Bedingt durch den etwas höheren Brennstoffstickstoffgehalt der Buche (vgl. Tabelle 6) lagen auch die NO_x-Emissionen der untersuchten Buchenpellets entsprechend höher (Tabelle 21). Auch lässt sich der Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen und CO-Emissionen für Ofen 1, 3 und 4 gut erkennen. Interessanterweise zeigte sich der Unterschied zwischen Ofen 4 und dem LFPKO hinsichtlich der NO_x-Emissionen, der mit den Fichtenpellets beobachtet wurde, für die Buchenpellets nicht. Diese lagen eher auf

einem vergleichbaren Niveau. Es scheint, als würde Ofen 4 hier seine Vorteile bei höheren Brennstoffstickstoffgehalten verlieren.

Bei den Staubemissionen (Abbildung 65) ist zunächst festzustellen, dass diese bedingt durch den etwa dreimal so hohen Kaliumgehalt verglichen mit den Fichtenpellets auch in etwa um Faktor 2,5 bis 3 höher lagen als bei den Fichtenpellets. Für die marktverfügbaren Geräte lagen diese zwischen 46 und 85 mg/Nm³. Zudem reagierten alle der untersuchten marktverfügbaren Feuerungen mit einem Anstieg der Staubemissionen von mittleren zu kurzen Pellets um 8 % (Ofen 2) bis 33 % (Ofen 3). Bei Ofen 1 (-7 %) und Ofen 4 (-14 %) fielen die Staubemissionen von den mittleren zu den langen Buchenpellets leicht ab, während diese bei Ofen 2 und 3 im Mittel unverändert blieben. Bei Ofen 3 ist zudem zu erkennen, dass der Betrieb mit zunehmender Länge der Pellets stabiler wird (siehe Fehlerbalken). Dies spricht dafür, dass die Brennstoffzufuhr in der Standarteinstellung zu hoch bzw. der Restsauerstoffgehalt zu niedrig eingestellt ist. Prinzipiell würde von keinem der hier untersuchten marktverfügbaren Öfen der aktuelle Grenzwert nach 2. Stufe der 1. BImSchV von 30 mg/Nm³ eingehalten werden. Dazu muss allerdings auch betont werden, dass die Brennstoffe mit einem mittleren Aschegehalt von 1,0 m-% über dem Grenzwert für ENplus A1 Pellets lagen und damit keine zulässigen Brennstoffe waren.

Bei den Messungen mit dem LFPKO2 wurden mit 29 bis 49 mg/Nm³ die niedrigsten Staubemissionen mit den Buchenpellets gemessen. Dazu ist zu sagen, dass der Brennstoff „Buche kurz“ bei den Messungen zur Optimierung des LFPKO 2 sowie zum Einstellen der Regelungsparameter vollständig verbraucht wurde und die Einstellungen hinsichtlich der Primärluft und Abgasrezirkulation nicht identisch zu denen bei „Buche mittel“ und „Buche lang“ waren. Außerdem wurden nach der Messung mit „Buche kurz“ noch Anpassungen an der Regelung vorgenommen. Daher ist davon auszugehen, dass die 49 mg/Nm³ für die kurzen Buchenpellets bei gleicher Einstellung auch in dem Bereich von 29 bis 34 mg/Nm³ liegen dürften. In dem dargestellten Vergleich wäre die Zunahme der Staubemissionen von „Buche mittel“ zu „Buche kurz“ 69 % und von „Buche mittel“ zu „Buche lang“ 15 %. Damit hätte der LFPKO2 den Stufe 2 Grenzwert für das mittlere Buchensortiment erreicht.

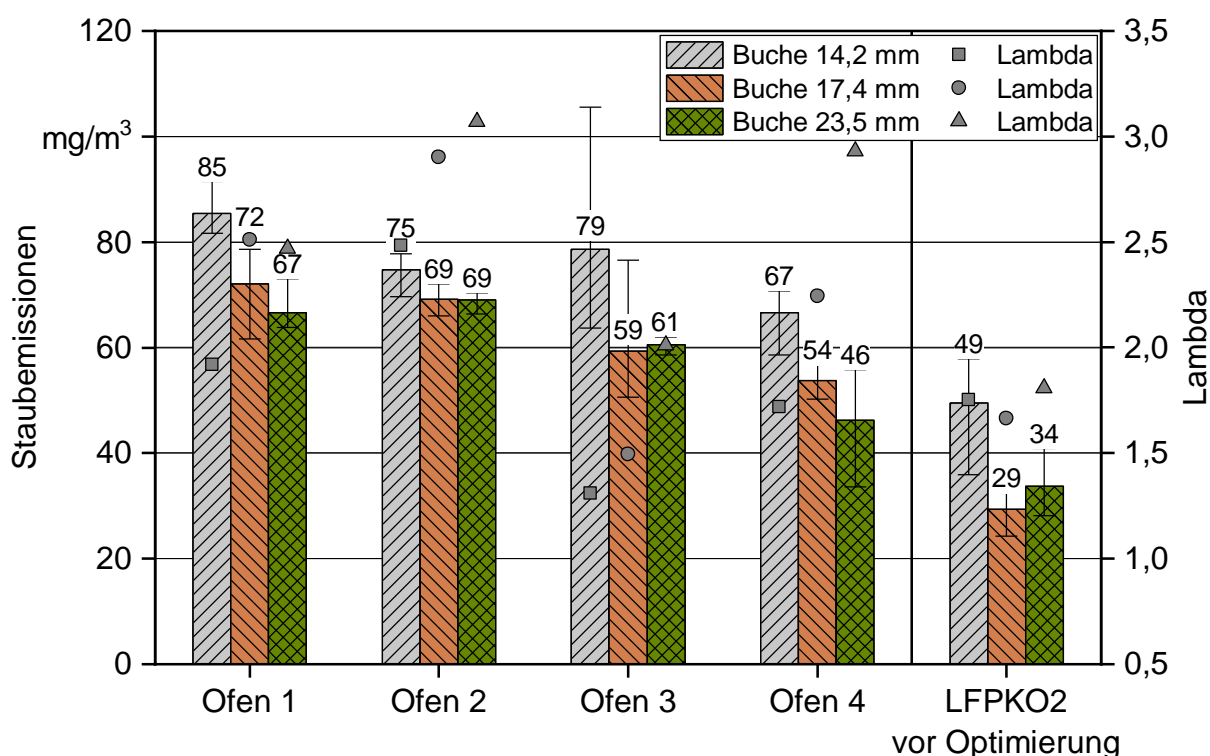


Abbildung 65: Gesamtstaubemissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Buchenpellets mit abgestuften Pelletlängenverteilungen im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Abbildung 66 zeigt die Korrelation des Anteils von EC und OC an den gemessenen Staubemissionen, aufgetragen über die jeweiligen Lambdawerte, als Maß für den Anteil der Staubemissionen, der durch unvollständige Verbrennung entsteht. Die dargestellten Trends verhalten sich ähnlich zu denen mit Fichtenpellets, nur das aufgrund der längeren Buchenpellets ohne das sehr kurze Sortiment die Lambdawerte nicht so stark in den niedrigen Bereich fallen und damit der exponentielle Anstieg (Ofen 3 und 4) bei niedrigen Lambdawerten nicht in demselben Maße stattfindet. Die beiden Öfen mit Regelung wiesen keine Korrelation zwischen Lambda und EC + OC auf. Beim LFPKO2 waren ohnehin keine EC und nur Spuren von OC (2 bis 4 %) messbar (vgl. Tabelle 21). Bei den marktverfügbaren Pelletöfen lagen teils erhebliche Anteile an EC bis zu 30 % (Ofen 3, „Buche kurz“) und OC bis zu 15 % (Ofen 1, „Buche mittel“) vor.

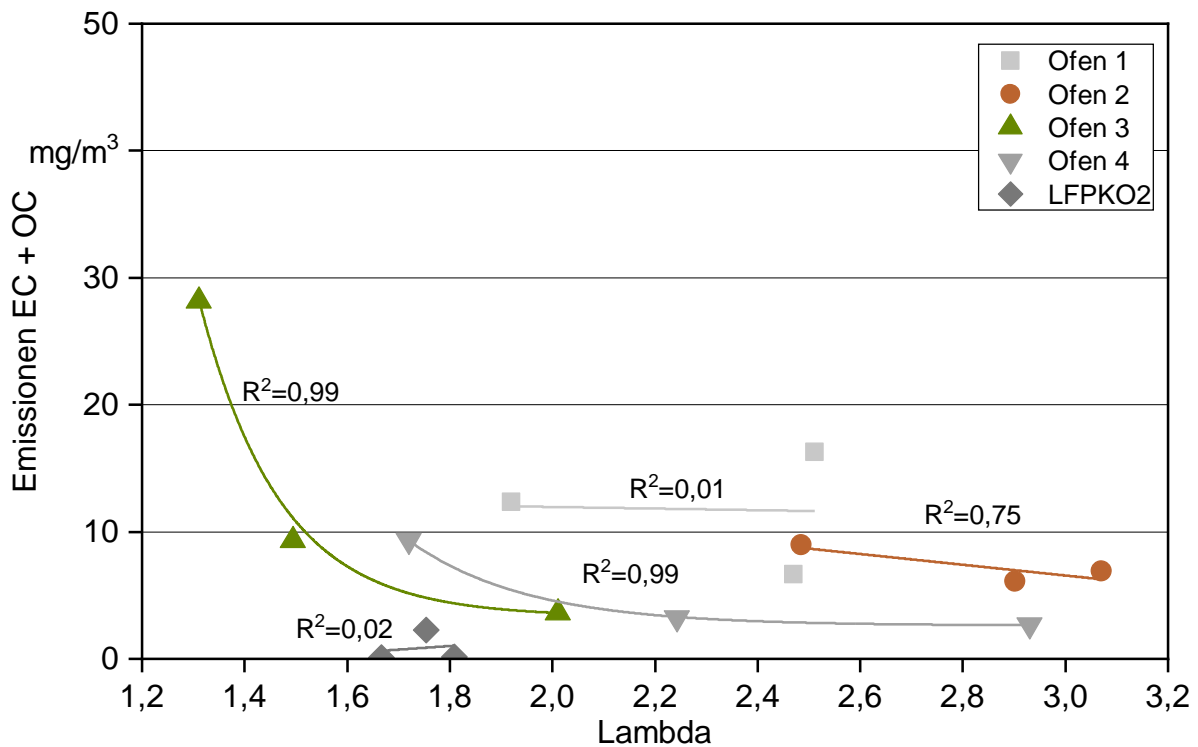


Abbildung 66: Korrelation der Emissionen von EC und OC mit den Lambdawerten der Messungen bei Variation der Pelletlänge mit Buchenpellets im Nennlastbetrieb

Wie bereits erwähnt, wurden nach den Messungen zur Brennstoffflexibilität beim LFPKO2 die Zündluftmenge verringert und die Einstellungen der Verteilung der Verbrennungsluftmengen sowie der Abgasrezirkulation nochmal optimiert (siehe auch Ergebnisse ENplus-Pellets). Für die Bewertung der Auswirkungen dieser Optimierungsmaßnahmen auf die Brennstoffflexibilität wurden Nennlastmessungen mit „Fichte sehr kurz“, „Fichte kurz“, „Fichte mittel“ und „Fichte lang“ sowie „Buche mittel“ mit den optimierten Einstellungen wiederholt. Die wesentlichen Erfolge dieser Optimierungen sind in Tabelle 22 dargestellt. Dabei sind die Werte nach der Optimierung mit dem tiefgestellten λ_{opt} markiert. Wie zu sehen ist, konnte der Restsauerstoffgehalt im Abgas durch die Verringerung der Zündluft und Scheibenspülluft nochmals gesenkt werden. Hierdurch verringerte sich der Lambdawert um 0,1 bis 0,3 bzw. 7 bis 19 %. Dies führte bei den meißten Sortimenten (außer „Fichte sehr kurz“ und „Buche mittel“) zu einer Verringerung der CO-Emissionen um ca. 45 bis 70 %. Bei „Fichte sehr kurz“ und „Buche mittel“ blieben die CO-Emissionen unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten konstant. Die Staubemissionen konnten für alle Sortimente durch die Optimierung deutlich gesenkt werden. Die prozentuale Änderung der Staubemissionen lag zwischen 23 (Buche mittel) und 67 % (Fichte lang). Im Mittel über alle Wiederholungsmessungen lag die Reduzierung der Staubemissionen im optimierten Zustand bei 44 %. Dieser Wert sollte näherungsweise auf die restlichen Messungen, die vor der Optimierung stattgefunden haben, übertragbar sein. Beim Wirkungsgrad ergab sich im Wesentlichen durch die Absenkung des Restsauerstoffgehalts eine Steigerung um 1 bis 2 Prozentpunkte. Insgesamt lagen die Emissionen nach der Optimierung auf einem sehr niedrigen Niveau, das sonst nur durch den Einsatz von Staubabscheidern erreicht wird. Auch bei den Buchenpellets lagen die Werte nach der Optimierung mit 23 mg/Nm^3 deutlich unterhalb des Stufe-2-Grenzwerts der 1. BImSchV, obwohl der Brennstoff beim Aschegehalt über der ENplus A1 Anforderung liegt.

Tabelle 22: Wesentlichen Änderungen durch die Optimierung (λ_{opt}) des LFPKO2

Pellet-sortiment	λ	λ_{opt}	Δ	CO	CO $_{opt}$	Δ	Staub	Staub $_{opt}$	Δ	Eta	Eta $_{opt}$	Δ
-	-	-	%	mg/Nm 3	mg/Nm 3	%	mg/Nm 3	mg/Nm 3	%	%	%	%
Fichte sehr kurz	1,5	1,4	-7	8 ± 1	8 ± 1	2	12 ± 2	7 ± 1	-43	94	95	1
Fichte kurz	1,6	1,5	-11	15 ± 4	8 ± 2	-46	14 ± 2	6 ± 1	-59	94	95	1
Fichte mittel	1,7	1,4	-19	21 ± 3	12 ± 3	-44	14 ± 3	10 ± 1	-30	94	96	2
Fichte lang	1,7	1,4	-19	23 ± 3	7 ± 1	-70	17 ± 3	6 ± 1	-67	94	96	2
Buche mittel	1,7	1,5	-11	33 ± 15	34 ± 9	4	29 ± 3	23 ± 4	-23	94	95	1

Zusammenfassend konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass die Pelletlängenverteilung vor allem bei Pelletöfen ohne Regelung einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen hat. Dies ordnet die Erkenntnisse aus FuturePelletSpec 1, bei denen der Einfluss der Pelletlängenverteilung aufgrund der untersuchten Feuerungen (die teilweise über eine Regelung verfügten) als eher gering eingeschätzt wurde, neu ein. Durch die Versuche mit den Öfen 3 und 4, bei denen die Brennstoffmenge angepasst wurde, konnte zudem demonstriert werden, welches Potenzial eine automatische Regelung der Brennstoffzufuhr bei Pelletöfen nach aktuellem Stand der Technik hat. Dies sollte zum Standard zukünftiger Pelletöfen werden. Zudem wäre es sinnvoll, den Nutzern von aktuell im Bestand befindlichen Pelletöfen die Möglichkeit zu geben, ihre Geräte richtig auf den verfügbaren Brennstoff einzustellen. Ein denkbarer Lösungsansatz wäre die Verwendung der Längensklassen „S“, „M“ und „L“ aus der ENplus-Zertifizierung in Verbindung mit einem Hinweis der zu wählenden Einstellung für die Brennstoffzufuhr bei unregulierten Öfen in der Bedienungsanleitung. Allerdings sind die Klassen aktuell noch nicht richtig für diesen Zweck definiert. Bei den untersuchten Fichtenpellets fielen bis auf das sehr kurze Sortiment („S“) alle anderen Sortimente in die Klasse „L“. Eine feinere Abstimmung der Klassengrenzen wäre hier notwendig, um die Geräte z.B. entsprechend einem Aufdruck auf der Sackware einstellen zu können.

Der LFPKO2 (sowie teilweise auch Ofen 1) konnte demonstrieren, dass eine ausgereifte Regelung, basierend auf der Feuerraumtemperatur, in der Lage ist, die hier untersuchten Schwankungen in der Pelletlänge zufriedenstellend zu kompensieren. Außerdem wies der Ofen nach der Optimierung der Zündluft und Lufteinstellungen extrem niedrige Emissionen und dabei vor allem Staubemissionen auf, die sonst nur mit Staubabscheidern in der Praxis und am Prüfstand erreicht werden können.

Messungen mit additivierten Pellets zum Einfluss des Ca/K-Verhältnisses und Si/K-Verhältnisses auf die Emissionen

Zur Untersuchung des Einflusses des Ca/K- und Si/K-Verhältnis auf die Emissionen wurden insgesamt drei Pelletsortimente mit Additiven gezielt auf zwei vordefinierte Ca/K- und ein Si/K Verhältnis eingestellt (siehe AP2, Abschnitt a). Diese Pelletsortimente wurde wieder in den vier marktverfügbaren Pelletöfen und dem LFPKO2 im stationären Nennlastbetrieb hinsichtlich der Emissionen untersucht und mit reinen Fichtenpellets (Fichte mittel) verglichen. Die Einflüsse auf das Versinterungsverhalten wurden bereits in AP2 (Abschnitt c) bei den Ergebnissen zur PASSA-Methode und dem Rapid Slag Test bewertet. Im Folgenden wird nun auf den Einfluss auf die Emissionen und die feuerungstechnisch relevanten Parameter eingegangen, die in Tabelle 23 dargestellt sind. Die prozentualen Änderungen im Vergleich zu reinen Fichtenpellets sind in Tabelle 24 wiedergegeben.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt zum Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen eindeutig dargestellt wurde, ist ein Einfluss unterschiedlicher Längenverteilungen auf die Emissionen nicht zu vernachlässigen. Es wurde daher versucht, die Pelletlänge bei den additivierten Brennstoffen durch gleiche Einstellung der Pelletieranlage und gleiche Konditionierung des Rohmaterials möglichst ähnlich zu halten. Dies war aber aufgrund nicht beeinflussbarer Faktoren wie klimatische Bedingungen bei der Pelletierung im Außenbereich und die durch die Additive geänderte chemische Zusammensetzung nicht vollständig realisierbar. Die drei additivierten Sortimente lagen daher bei der mittleren Pelletlänge zwischen 15,7 (Ca/K1) und 19,6 mm (Si/K1) während die reinen Fichtenpellets bei 16,1 mm („Fichte mittel“) lagen (vgl. AP2, Tabelle 5). Der Anteil von Pellets < 10 mm lag zwischen 3,6 (Si/K1) und 12,3 m-% (Ca/K1) während reine Fichtenpellets bei 8,5 m-% lagen. Daher ist ein gewisser Quereinfluss der Pelletlänge auf die Ergebnisse nicht auszuschließen und wird bei der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt. Nachfolgend werden die wesentlichen inhaltstofflichen Parameter der vier Sortimente kurz wiedergegeben (vgl. AP 2, Tabelle 6).

Fichte:	Ca/K = 1,7 mol/mol; Si/K = 0,5 mol/mol; Ca = 795 mg/kg; K = 465 mg/kg; Si = 150 mg/kg
Fichte Ca/K1:	Ca/K = 2,9 mol/mol; Si/K = 0,7 mol/mol; Ca = 1450 mg/kg; K = 490 mg/kg; Si = 230 mg/kg
Fichte Ca/K2:	Ca/K = 0,7 mol/mol; Si/K = 0,1 mol/mol; Ca = 1100 mg/kg; K = 1450 mg/kg; Si = 150 mg/kg
Fichte Si/K1:	Ca/K = 1,7 mol/mol; Si/K = 1,8 mol/mol; Ca = 1150 mg/kg; K = 1070 mg/kg; Si = 840 mg/kg

Tabelle 23: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Anlagenparameter und Emissionen der Messungen mit additvierten Fichtenpellets in vier Abstufungen (Mittelwerte der 30-Minuten-Messungen $n=5 \pm SD$; n.b. = nicht bestimmt)

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom kg/h	Lambda -	T Abgas °C	T		Wirkungsgrad %	CO mg/Nm ³	OGC mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	Gesamtstaub mg/Nm ³	EC m-%	OC m-%	IC m-%	Salze & Oxide m-%
				Brennkammer °C	Wärmeleistung kW									
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs														
Fichte	1,5 ± 0,08	1,9 ± 0,03	145 ± 2	640 ± 4	6,3	91	164 ± 24	3 ± 1	138 ± 1	43 ± 4	33	8	11	48
Fichte Ca/K1	1,4 ± 0,04	2,1 ± 0,05	145 ± 2	635 ± 4	6,1	91	123 ± 19	n.b.	138 ± 1	28 ± 2	12	6	17	65
Fichte Ca/K2	1,4 ± 0,06	1,9 ± 0,09	142 ± 1	639 ± 2	6,3	91	1191 ± 559	n.b.	119 ± 9	81 ± 2	2	10	23	65
Fichte Si/K1	1,3 ± 0,03	2,0 ± 0,03	145 ± 1	641 ± 2	5,8	91	126 ± 25	2 ± 0	132 ± 1	36 ± 5	40	7	8	45
Ofen 2														
Fichte	1,4 ± 0,04	2,6 ± 0,11	193 ± 3	603 ± 14	5,4	82	439 ± 64	3 ± 2	134 ± 1	27 ± 2	13	13	1	73
Fichte Ca/K1	1,5 ± 0,03	2,5 ± 0,06	185 ± 1	653 ± 6	6,3	86	254 ± 26	1 ± 1	131 ± 2	33 ± 3	19	14	11	56
Fichte Ca/K2	1,4 ± 0,06	2,4 ± 0,04	176 ± 3	631 ± 16	6,0	86	701 ± 57	3 ± 1	118 ± 3	70 ± 6	1	12	15	72
Fichte Si/K1	1,3 ± 0,02	2,7 ± 0,12	178 ± 1	618 ± 22	5,5	85	307 ± 106	1 ± 2	123 ± 2	27 ± 2	19	12	4	65
Ofen 3														
Fichte	1,2 ± 0,03	1,5 ± 0,03	189 ± 1	659 ± 2	5,3	89	50 ± 21	1 ± 0	143 ± 3	27 ± 2	7	11	1	81
Fichte Ca/K1	1 ± 0,05	1,8 ± 0,12	163 ± 5	604 ± 20	4,7	91	66 ± 24	1 ± 0	143 ± 4	29 ± 4	18	9	11	62
Fichte Ca/K2	1 ± 0,01	1,7 ± 0,04	153 ± 4	603 ± 6	4,7	91	825 ± 514	9 ± 6	118 ± 10	71 ± 10	2	10	30	58
Fichte Si/K1	1 ± 0,02	2,1 ± 0,03	165 ± 1	584 ± 3	4,2	89	104 ± 29	1 ± 0	133 ± 4	22 ± 3	22	16	2	60
Ofen 4														
Fichte	1,5 ± 0,04	1,9 ± 0,09	173 ± 1	n.b.	6,4	88	19 ± 5	1 ± 0	105 ± 5	14 ± 2	2	10	0	88
Fichte Ca/K1	1,6 ± 0,06	1,9 ± 0,04	190 ± 5	n.b.	6,7	87	11 ± 12	1 ± 0	112 ± 3	17 ± 8	0	3	1	97
Fichte Ca/K2	1,6 ± 0,07	1,8 ± 0,05	188 ± 13	n.b.	6,8	88	72 ± 39	2 ± 0	109 ± 6	33 ± 14	1	12	14	73
Fichte Si/K1	1,4 ± 0,05	1,9 ± 0,08	171 ± 8	n.b.	5,9	89	3 ± 2	1 ± 0	89 ± 5	5 ± 1	0	1	0	99
LFPKO ₂ auto mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)														
Fichte	1,3 ± 0,03	1,7 ± 0,02	122 ± 4	673 ± 7	6,0	94	21 ± 3	1 ± 0	114 ± 1	14 ± 3	0	2	1	97
Fichte Ca/K1	1,4 ± 0,03	1,7 ± 0,02	119 ± 3	679 ± 6	6,2	94	18 ± 6	1 ± 0	116 ± 4	18 ± 4	0	3	0	97
Fichte Ca/K2	1,3 ± 0,04	1,6 ± 0,06	117 ± 3	678 ± 7	6,1	94	44 ± 24	1 ± 0	99 ± 1	36 ± 8	0	5	7	88
Fichte Si/K1	1,3 ± 0,04	1,7 ± 0,04	123 ± 4	668 ± 9	6,0	94	9 ± 1	1 ± 0	119 ± 2	6 ± 1	0	2	1	98

Der Einfluss der leicht unterschiedlichen Pelletlängen äußerte sich bei den untersuchten Pelletöfen in einem leicht schwankenden Brennstoffmassenstrom. Im Vergleich zu den reinen Fichtenpellets lag die Abweichung zwischen +9 und -23 %, wobei nur Ofen 3 mit -16 bis 23 % Abweichungen über 10 % aufwies. Dies könnte daran liegen, dass bei diesem Gerät ein defekt an der Platine während der Messreihe auftrat, die auf Garantie vom Hersteller getauscht wurde. Eventuell hatte dies einen Einfluss auf die Drehzahl der Austragsschnecke. Allerdings war Ofen 3 auch schon vor diesem Defekt bei den Messungen zum Einfluss der Pelletlänge am anfälligsten. Bei Ofen 3 waren daher auch die Schwankungen bei Lambda und den Temperaturen deutlich höher (Lambda 8 bis 34 %) als bei den anderen untersuchten Öfen (-7 bis 5 %). Der LFPKO 2 wies aufgrund der optimierten Regelung bei der Brennstoffzufuhr (-2 bis 0 %) und den Lambdawerten (-1 bis -4 %) die niedrigsten Schwankungen im Vergleich zur reinen Fichte auf. Die Nennwärmeleistung wurde für Ofen 1 (außer Si/K1) und den LFPKO2 für alle Sortiment erreicht.

Bei den Öfen 2 bis 3 wurde die Nennwärmeleistung mit teilweise über 2 kW Abweichung (Ofen 2 und 4) wieder deutlich verfehlt. Schwankungen im Wirkungsgrad von 1 bis 2 % (Ofen 3 und 4) bzw. 1 bis 4 %-Punkte (Ofen 2) gab es nur bei den Geräten ohne automatische Regelung des Brennstoffmassenstroms. Daher ist davon auszugehen, dass dies durch die leicht variierende Pelletlängenverteilung beeinflusst wurde.

Tabelle 24: Prozentuale Änderung der wichtigsten Emissionen und feuerungstechnischen Parameter beim Brennstoffwechsel gegenüber dem Sortiment Fichte

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom	Lambda	CO	OGC	NO _x	Gesamtstaub	EC + OC
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs							
Fichte Ca/K1	-6%	7%	-25%	n.b.	0%	-36%	-60%
Fichte Ca/K2	-4%	-3%	627%	n.b.	-14%	89%	2%
Fichte Si/K1	-10%	5%	-23%	-28%	-4%	-15%	0%
Ofen 2							
Fichte Ca/K1	9%	-5%	-42%	-80%	-2%	21%	312%
Fichte Ca/K2	3%	-7%	60%	-11%	-12%	159%	161%
Fichte Si/K1	-3%	5%	-30%	-58%	-8%	-2%	52%
Ofen 3							
Fichte Ca/K1	-16%	17%	32%	-32%	0%	9%	363%
Fichte Ca/K2	-17%	8%	1547%	887%	-17%	166%	500%
Fichte Si/K1	-23%	34%	107%	-25%	-7%	-19%	192%
Ofen 4							
Fichte Ca/K1	6%	0%	-41%	10%	6%	15%	-90%
Fichte Ca/K2	7%	-4%	273%	65%	4%	126%	2554%
Fichte Si/K1	-9%	-1%	-86%	-47%	-15%	-64%	-101%
LFPKO2 _{auto} mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)							
Fichte Ca/K1	0%	-3%	-13%	-22%	2%	27%	70%
Fichte Ca/K2	-1%	-4%	108%	-6%	-13%	152%	405%
Fichte Si/K1	-2%	-1%	-57%	-15%	5%	-55%	-51%

Die CO-Emissionen für die Messungen mit den additivierten Brennstoffen sind in Abbildung 67 dargestellt. Signifikante Unterschiede zur reinen Fichte waren für alle untersuchten Feuerungen nur für den Brennstoff Ca/K2 zu beobachten. Der wie in AP2 bereits beschrieben inhaltsstofflich mit Buche vergleichbare Brennstoff führte zu einem teils massiven Anstieg der CO-Emissionen bei den marktverfügbaren Öfen von 60 % (Ofen 2) bis zum 15-fachen (Ofen 3) gegenüber der reinen Fichte. Die Größenordnungen der CO-Emissionen für diesen Brennstoff deckten sich auch näherungsweise mit den bei den Buchenpellets beobachteten CO-Emissionen. Bei den anderen Brennstoffen reagieren die Feuerungen unterschiedlich. Der calciumreiche Brennstoff Ca/K1 zeigte bei den Öfen 1, 3 und 4 keinen signifikanten Effekt. Bei der Unterschubfeuerung sanken die CO-Emissionen dagegen um 42 % verglichen mit der reinen Fichte, jedoch nicht statistisch signifikant. Der siliziumreiche Brennstoff Si/K1 führte bei Ofen 1 und 2 zu einem Rückgang der mittleren CO-Emissionen gegenüber reiner Fichte um -23 bis -30 %, der jedoch nicht signifikant war. Bei Ofen 3 ergab sich ein Anstieg der mittleren CO-Emissionen um 107 % gegenüber der reinen Fichte, jedoch ebenfalls nicht signifikant. Absolut erreichten sowohl Ofen 4 als auch der LFPKO2 sehr niedrige CO-Emissionen zwischen 3 und 72 mg/Nm³. Die CO-Emissionen der Variante Si/K1 deckten sich für Ofen 1 und LFPKO2 näherungsweise mit denen der Kiefernpellets (siehe nächster Abschnitt), da hier die bei den Kiefernpellets wesentlich kürzere Pelletlängenverteilung keinen so großen Einfluss auf die CO-Emissionen hatte. Die niedrigste Schwankungsbreite um die reinen Fichtenpellets erreichte der LFPKO2, jedoch führte auch hier die Variante Ca/K2 zu einem signifikanten Anstieg um 108 %, wenn auch nur auf eine absolute Höhe von 44 mg/Nm³.

Die OGC-Emissionen lagen über alle vier Sortimente auf einem sehr niedrigen Niveau zwischen 1 und 3 mg/Nm³. Lediglich bei Ofen 3 ergab sich für die Variante Ca/K2 eine signifikante Steigerung auf 9 mg/Nm³, was ca. dem 9-fachen der OGC-Emissionen bei reiner Fichte entspricht.

Bei den NO_x-Emissionen ergaben sich nur kleinere Unterschiede, die vor allem für die Variante Ca/K2 auf die dort erhöhten CO-Emissionen zurückzuführen sind. Wie auch schon bei den vorherigen Messungen, zeigten Ofen 4 und LFPKO 2 aufgrund der extremen Luftstufung signifikant niedrigere NO_x-Emissionen als Ofen 1 bis 3. Bei den Versuchen mit den additivierten Brennstoffen lagen die NO_x-Emissionen von Ofen 4 für Fichte und Si/K1 signifikant niedriger liegen als beim LFPKO2, bei den Varianten Ca/K1 und Ca/K2 lag allerdings der LFPKO2 niedriger, wenn auch nicht signifikant.

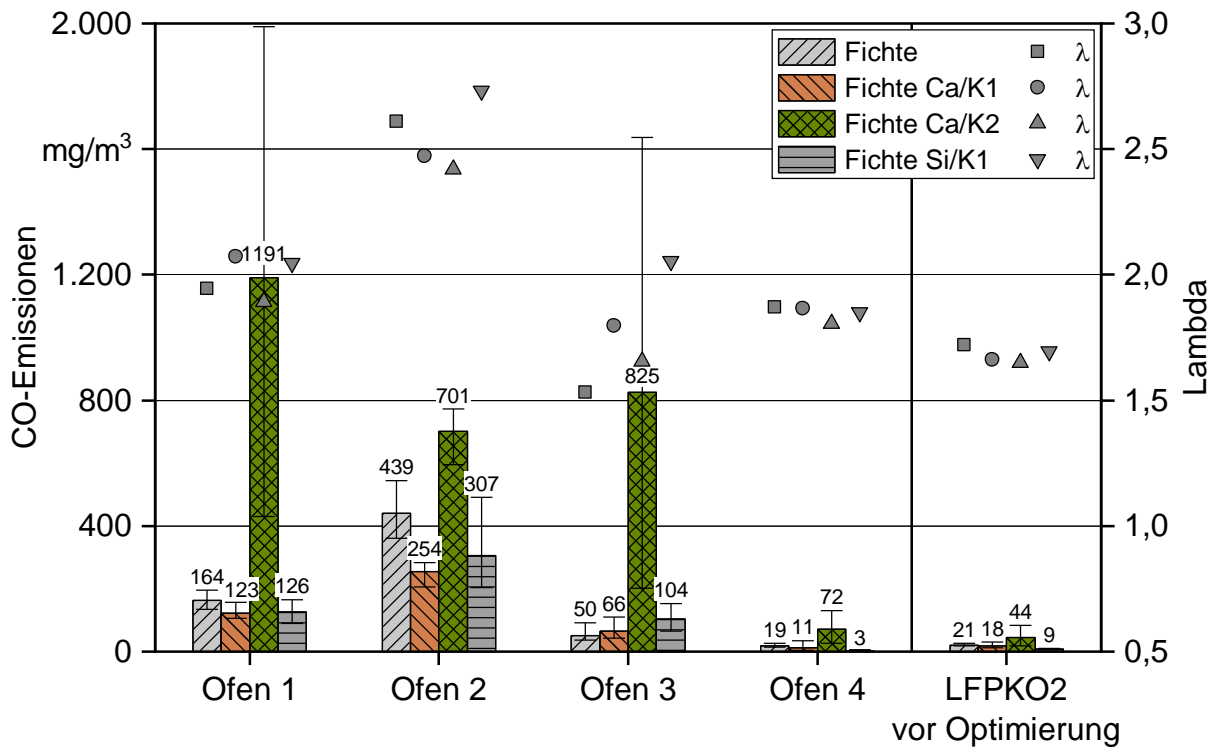


Abbildung 67: CO-Emissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Fichtenpellets, teilweise additiviert zur Abstufung der Ca/K- und Si/K-Verhältnisse, im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Die Gesamtstaubemissionen der Messungen mit den additivierten Brennstoffen sind in Abbildung 68 dargestellt. Wie auch bei den CO-Emissionen stehen die Staubemissionen der Variante Ca/K2 mit signifikant erhöhten Werten im Vergleich zu den anderen Sortimenten hervor. Bei den Öfen mit normaler Luftstufung (Ofen 1 bis 3) lagen die Staubemissionen im Mittel bei 70 bis 81 mg/Nm³. Bei den beiden Öfen mit extremer Luftstufung (Ofen 4 und LFPKO2) lagen die Staubemissionen mit 33 bis 36 mg/Nm³ signifikant niedriger. Bei allen Geräten ergibt sich eine deutliche Steigerung der Staubemissionen im Vergleich zu reiner Fichte von 89 bis 166 %. Wie auch bei den CO-Emissionen lagen die Staubemissionen der Variante Ca/K2 in einem mit den Buchenpellets vergleichbarem Bereich. Der Brennstoff Si/K1 ist, wie bereits in AP2 beschrieben, inhaltsstofflich am ehesten mit den Kiefernpellets vergleichbar, die allerdings gleichzeitig eine sehr geringe Pelletlänge aufwiesen. Daher wichen die Staubemissionen der Kiefernpellets für die Öfen ohne Regelung stark von denen der Variante Si/K1 ab. Bei Ofen 1 und dem LFPKO2 lagen diese aber durchaus in einer vergleichbaren Größenordnung (siehe nächster Abschnitt). Die Variante Ca/K1 führte nur bei Ofen 1 zu signifikant niedrigeren Staubemissionen von -36 % verglichen mit reiner Fichte und auch verglichen mit der Variante Si/K1. Bei den Öfen 2 und 3 lagen reine Fichte, Ca/K1 und Si/K1 auf einem statistisch vergleichbaren Niveau. Ofen 4 zeigte keinen Einfluss der Variante Ca/K1 aber einen deutlichen Rückgang der Staubemissionen für die siliziumreiche Variante Si/K1 durch Einbindung des Kaliums in der Asche von -64 %. Allerdings war dieser Rückgang der Staubemissionen aufgrund der großen Streuung der Einzelwerte nicht signifikant. Beim LFPKO2 lagen ebenfalls Ca/K1 und reine Fichte auf einem statistisch vergleichbaren Niveau, während hier die Variante Si/K1 zu einem signifikanten Rückgang der Staubemissionen von -55 % führte. Im direkten Vergleich zeigten Ofen 4 und der LFPKO2 im nicht optimierten Zustand statistisch vergleichbare Staubemissionen bei allen untersuchten Varianten der additivierten Pellets. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die Staubemissionen des LFPKO2 im optimierten Zustand nochmal um ca. 44 % niedriger liegen (vgl. Messungen zur Pelletlänge).

Hinsichtlich der Zusammensetzung der Staubemissionen ist zu beobachten, dass die marktverfügbaren Geräte mit herkömmlicher Luftstufung deutliche Anteile an Partikeln aus unvollständiger Verbrennung aufweisen (EC: 1 bis 40 %; OC: 6 bis 16 %). Dahingegen lag dieser Anteil bei den Öfen mit extremer Luftstufung (Ofen 4 und LFPKO2) auf einem sehr niedrigem Niveau (EC: 0 bis 2 %; OC: 1 bis 12 %), vor allem, was den elementaren Kohlenstoff (EC) bzw. „Black Carbon“ angeht. Bei allen Öfen außer Ofen 1 führte die Variante Ca/K2 zu einem starken Anstieg von Partikeln aus unvollständiger Verbrennung „EC+OC“ von dem 1,6-fachen (Ofen 2) bis 25-fachen (Ofen 4) des Wertes von reiner Fichte. Die Variante Si/K1 führte bei den Öfen 2 und 3 zu einer Zunahme von EC+OC während dieser Wert bei Ofen 4 und dem LFPKO2 zurückging im Vergleich zur reinen Fichte. Dies dürfte auch der Grund sein, warum bei diesen Öfen die Staubemissionen bei der Variante Si/K1 nicht gesunken sind und kann im direkten Zusammenhang mit der starken Versinterung der Asche bei diesem Brennstoff liegen (siehe AP2). Bei Ofen 1 nahmen die Anteile für EC+OC für die Variante Ca/K1 ab und blieben für Ca/K2 und Si/K1 nahezu identisch. In Tabelle 23 ist neben Anteilen an EC und OC an den Staubemissionen in diesem Fall auch noch der Anteil an IC (anorganischer Kohlenstoff) aufgeführt. Dieser Wert steht im Wesentlichen für den Anteil an Aschepartikeln in der Staubbiladung des Filters, der Karbonate enthält. Bei den anderen Versuchen war dieser Parameter meist vernachlässigbar, hier ist er jedoch relevant, da der Effekt der Karbonatbildung und der dadurch bedingten Karbonatschmelzen mit untersucht werden sollte. Auffällig ist, dass bei allen untersuchten Öfen der höchste IC-Anteil für die Variante Ca/K2 (viel Kalium) gemessen wurde. Für die Öfen mit herkömmlicher Luftstufung wurden auch für die Variante Ca/K1 höhere Anteile gefunden, bei den beiden Geräten mit extremer Luftstufung dagegen nicht. Es scheint also vor allem durch erhöhte Kaliumwerte eine verstärkte Karbonatbildung stattzufinden, bei den Öfen ohne extreme Luftstufung auch bei erhöhten Calciumwerten. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Aschesiebung (vgl. AP2).

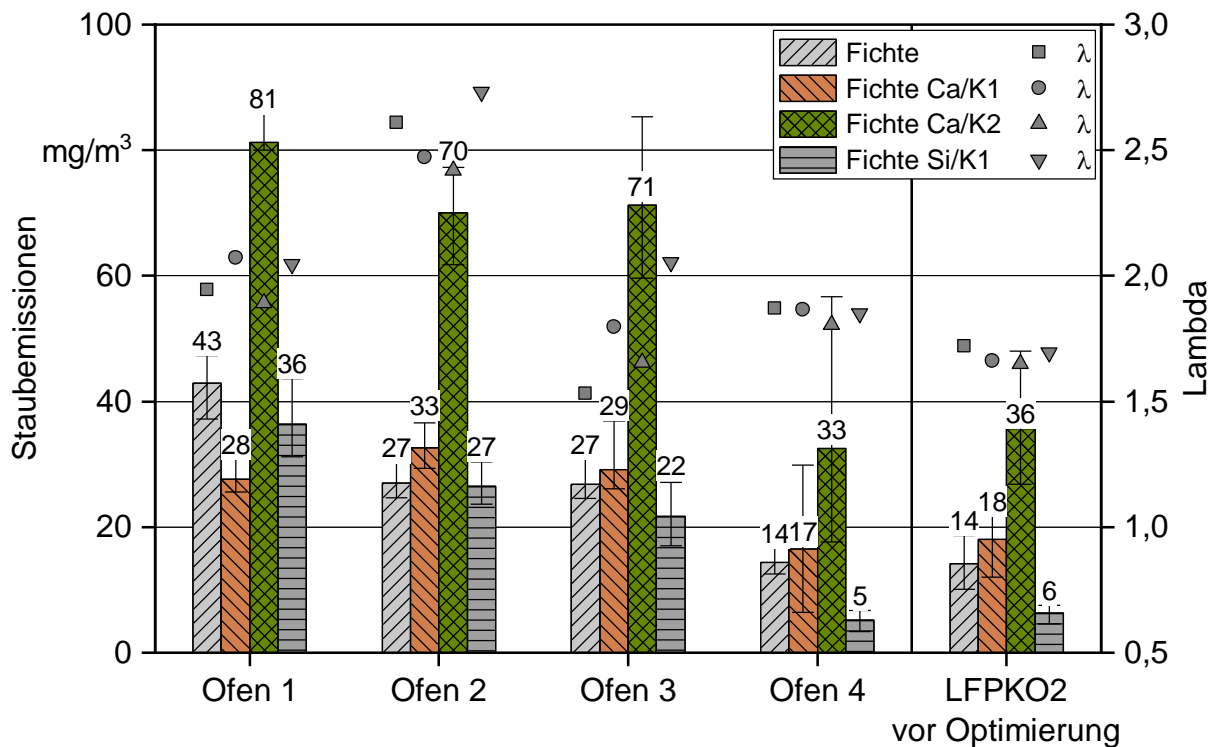


Abbildung 68: Gesamtstaubemissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Fichtenpellets, teilweise additiviert zur Abstufung der Ca/K- und Si/K-Verhältnisse, im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Eine ausgeprägte Korrelation der Staubemissionen mit dem Ca/K-Verhältnis (Abbildung 69) scheint es nur für Ofen 1 ($R^2 = 0,79$) zu geben. Bei den Öfen 2 und 3 ist diese mit einem R^2 von 0,44 bis 0,47 nur noch schwach ausgeprägt und für die Öfen mit extremer Luftstufung gab es keinen erkennbaren Effekt.

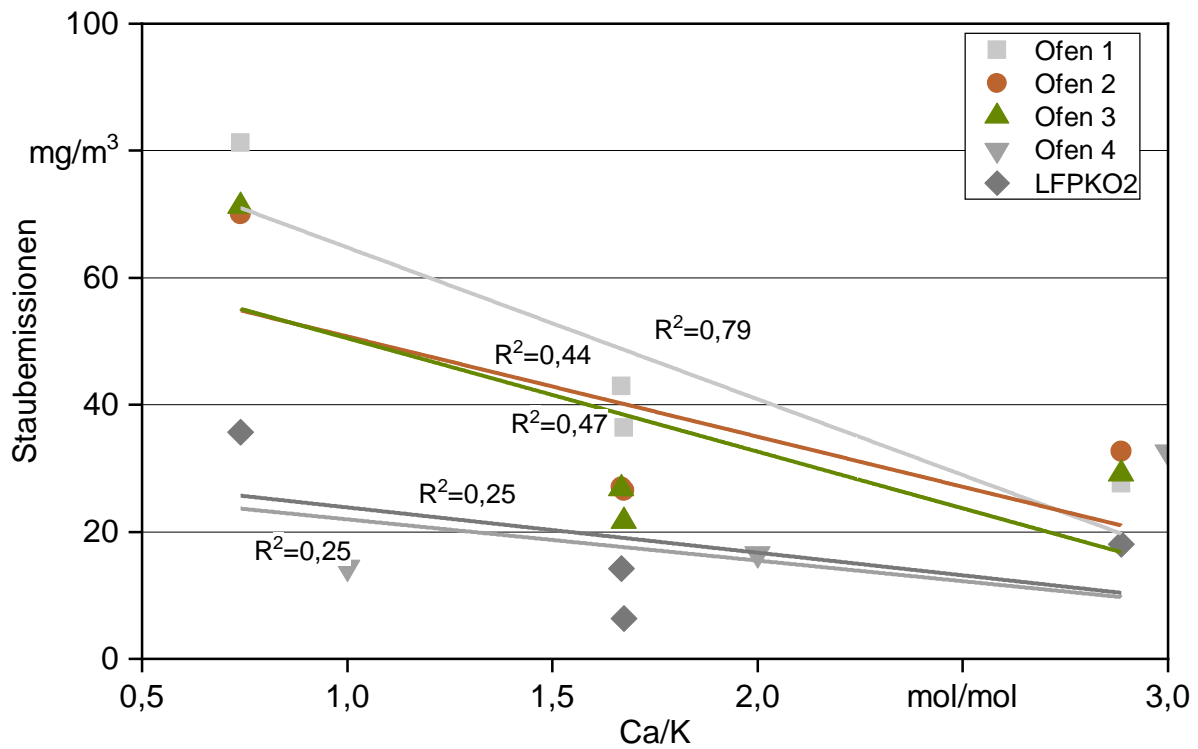


Abbildung 69: Korrelation der Staubemissionen mit dem Ca/K-Verhältnis für die Messungen mit den additivierten Fichtenpellets.

Aus den Staubemissionen und den Anteilen an EC, OC und IC lässt sich zudem noch der Anteil an Salze & Oxide in den Staubemissionen berechnen, was schlicht dem Rest der gravimetrisch bestimmten Masse entspricht. Dies entspricht dann näherungsweise auch dem Anteil der Staubemissionen, der durch den Übergang aerosolbildender Elemente (K, Na, Pb, Zn) in die Gasphase entsteht. In Abbildung 70 sind diese Emissionen an Salzen & Oxiden über das Si/K Verhältnis aufgetragen. Für Ofen 3, den LFPKO2, Ofen 4 und Ofen 2 ergeben sich näherungsweise lineare Korrelationen mit in der genannten Reihenfolge absteigendem Bestimmtheitsmaßen. Bei Ofen 1 ist der Zusammenhang dagegen nur noch sehr schwach.

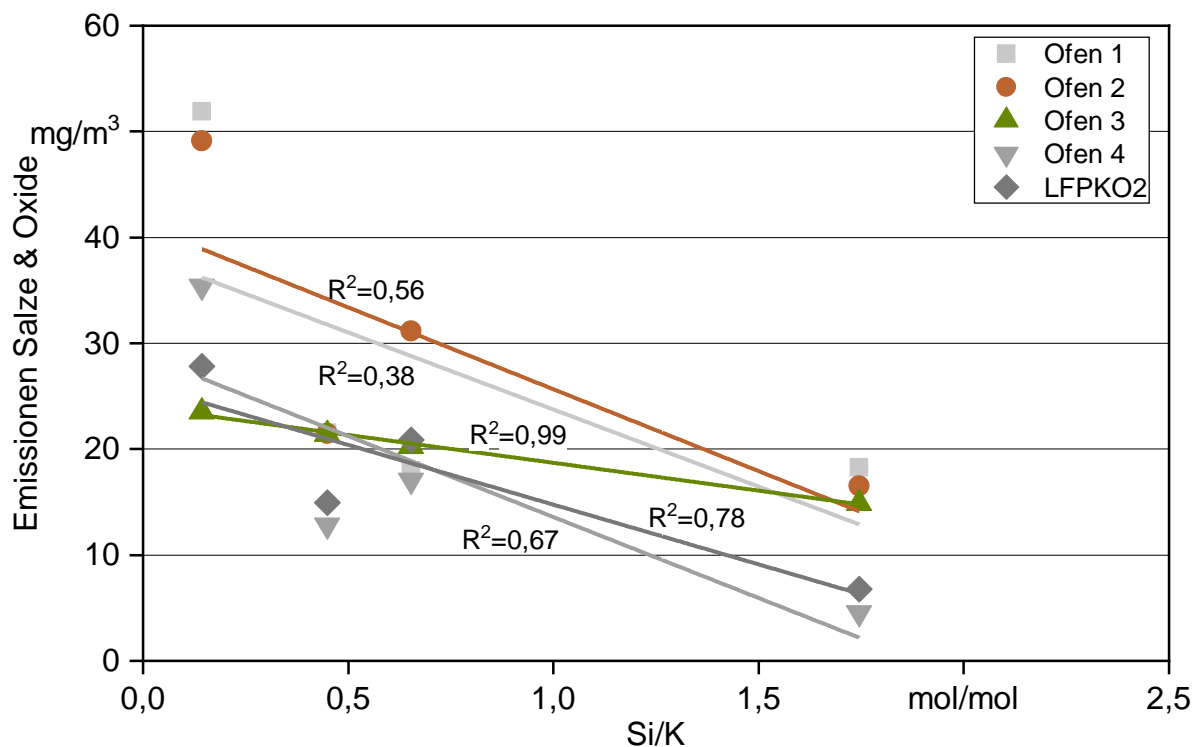


Abbildung 70: Korrelation der Emissionen an Salzen und Oxiden mit dem Si/K-Verhältnis für die Messungen mit den additivierten Fichtenpellets.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass sich vor allem hohe Kaliumgehalte negativ auf die Emissionen auswirken, während hohe Calciumgehalte keinen nennenswerten Effekt auf die Emissionen hatten. Hohe Gehalte an Silizium reduzieren die Freisetzung von Kalium und senkten die Staubemissionen, zumindest bei Feuerungen mit extremer Luftstufung. Bei den Feuerungen mit herkömmlicher Luftstufung wurde dieser Effekt durch einen Anstieg der Partikel aus unvollständiger Verbrennung (EC + OC) kompensiert, sodass sich die Staubemissionen insgesamt nicht signifikant änderten. Sowohl das Ca/K- als auch das Si/K-Verhältnis zeigten einen stark vom Feuerungsprinzip abhängigen Effekt auf das Versinterungsverhalten der Rostaschen (vgl. AP2), wobei die Variante mit hohem Siliziumanteil (Si/K1) zu den größten Anteilen an Versinterungen bei allen Feuerungen führte. Die Emissionen der additivierten Brennstoffe waren für die beiden Geräte mit extremer Luftstufung signifikant niedriger als für die herkömmlichen Öfen. Es konnte gezeigt werden, dass die Emissionen der Varianten Ca/K2 und Si/K1 mit den inhaltstofflich ähnlichen Brennstoffen Buche und Kiefer näherungsweise übereinstimmen, solange durch eine automatische Brennstoffregelung der Einfluss der Pelletlänge kompensiert wird.

Messungen zum Einfluss der Baumart auf die Emissionen

Um den Einfluss der Baumart auf die Emissionen zu untersuchen, wurden Nennlastversuchen mit Pellets aus den Baumarten Fichte, Kiefer, Buche, Birke und Erle sowie einer Mischung aus 65 % Fichte und 35 % Buche durchgeführt. Die Brennstoffparameter wurden bereits in AP2 diskutiert. In Tabelle 25 sind die zur Diskussion der Ergebnisse der Feuerungsversuche relevanten Brennstoffparameter nochmals aufgeführt. Dabei ist vor allem zu erwähnen, dass, obwohl ein besonderer Fokus daraufgelegt wurde, möglichst vergleichbare Pelletsortimente herzustellen, die Pelletlänge und der Anteil an Pellets < 10 mm doch teilweise stark variierten. Hier stehen vor allem die Kiefer und Birke mit vergleichsweise sehr kurzen Pelletlängen und hohem Anteil an Pellets < 10 mm heraus. Es wurde u. a. versucht, die Pelletlänge durch Einstellen verschiedener Wassergehalte im Rohmaterial sowie durch Auswahl verschiedener Matrizen zu beeinflussen. Bei Birke und Kiefer war dies allerdings aufgrund der Eigenschaften des Rohmaterials nicht möglich, bzw. waren die benötigten Matrizentypen nicht verfügbar. Daher fiel die Kiefer in die Längenklasse „M“ und die Birke in „S“ während alle anderen Sortimente in die Längenklasse „L“ fielen. Der Einfluss der Pelletlänge auf die Emissionen wurde bereits ausführlich beschrieben und muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Neben den Pelletlängenverteilungen unterschieden sich die untersuchten Baumarten vor allem hinsichtlich des Kaliumgehalts, der Summe der aerosolbildenden Elemente (hauptsächlich Kalium) und des Siliziumgehalts bzw. Si/K-Verhältnis. Fichte und Kiefer lagen bei den aerosolbildenden Elementen auf einem vergleichbaren und niedrigen Niveau. Die Mischung aus Fichte und Buche sowie die Baumarten Birke und Erle waren auf einem vergleichbaren, mittleren Niveau und reine Buchenpellets auf einem hohen Niveau. Beim Si/K-Verhältnis lag die Kiefer mit 1,5 vergleichsweise hoch. Hier kann damit gerechnet werden, dass Kalium in die Asche eingebunden und weniger in die Gasphase freigesetzt wird. Die restlichen Brennstoffe

lagen mit 0,1 bis 0,4 niedrig, wobei besonders die Erle mit 0,1 auffiel. Bei diesen Brennstoffen (vor allem bei Erle) ist daher mit einer hohen Kaliumfreisetzung bei der Verbrennung zu rechnen.

Tabelle 25: Wiederholung der wichtigsten, zur Diskussion relevanten Brennstoffparameter aus AP2 (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6)

Baumart	Mittelwert Länge mm	Massenanteil < 10 mm m-%	Längenklasse ENplus -	Σ (K, Na, Pb, Zn) mg/kg	Si/K mol/mol
Fichte	16,1	8,5	L	489	0,4
Kiefer	11,7	28,0	M	336	1,5
Fichte/Buche	13,8	12,5	L	844	0,4
Buche	17,4	4,1	L	1503	0,4
Birke	7,5	77,1	S	636	0,3
Erle	16,9	7,2	L	740	0,1

Die bereits angesprochenen Unterschiede in den Pelletlängen und dem Anteil an Pellets < 10 mm führten bei den Feuerungsversuchen vor allem bei den Öfen 2 bis 4 (ohne Brennstoffregelung) zu teilweise erheblichen Unterschieden im Brennstoffmassenstrom und damit auch zu unterschiedlichen Lambdawerten und den Temperaturen im Abgas und der Brennkammer (vgl. Tabelle 26). Besonders bei den Pelletsortimenten Kiefer und Birke wurden bis zu 34 bis 38 % (Ofen 4) höhere Brennstoffmassenströme als bei den Fichtenpellets aufgrund der kürzeren Pellets gemessen. Bei Ofen 3 konnte die Birke aufgrund des besonders hohen Anteils an Pellets < 10 mm sogar gar nicht untersucht werden, da hier bereits nach 30 Minuten Betrieb der Brennertopf überfüllte. Für die Buchenpellets lagen die Brennstoffmassenströme aufgrund der etwas längeren Pellets im Vergleich zur Fichte um -9 bis -12 % niedriger.

Tabelle 26: Übersicht der wichtigsten feuerungstechnischen Anlagenparameter und Emissionen der Messungen mit Pellets aus fünf unterschiedlichen Holzarten und einer Holzartmischung (Mittelwerte der 30-Minuten-Messungen $n=5 \pm SD$; n.b. = nicht bestimmt)

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom kg/h	Lambda -	T Abgas °C	T			Wirkungsgrad %	CO mg/Nm ³	OGC mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	Gesamtstaub mg/Nm ³	EC m-%	OC m-%	IC m-%	Salze & Oxide m-%
				Brennkammer °C	Wärmeleistung kW										
Ofen 1 mit automatischer Regelung der Brennstoffs															
Fichte	1,5 ± 0,08	1,9 ± 0,03	145 ± 2	640 ± 4	6,3	91	164 ± 24	3 ± 1	138 ± 1	43 ± 4	33	8	11	48	
Kiefer	1,4 ± 0,01	2,1 ± 0,04	148 ± 1	637 ± 2	5,9	90	97 ± 19	n.b.	162 ± 3	27 ± 4	21	13	4	62	
Fichte/Buche	1,4 ± 0,03	2,1 ± 0,02	146 ± 1	636 ± 4	6,1	91	194 ± 18	n.b.	199 ± 2	50 ± 1	0	9	5	86	
Buche	1,2 ± 0,12	2,5 ± 0,99	128 ± 3	586 ± 21	5,2	90	743 ± 203	15 ± 5	157 ± 10	72 ± 6	10	15	13	62	
Birke	1,4 ± 0,03	2,1 ± 0,05	147 ± 2	635 ± 5	5,5	89	163 ± 10	n.b.	167 ± 2	33 ± 1	44	9	4	43	
Erle	1,3 ± 0,03	1,9 ± 0,02	129 ± 1	635 ± 4	5,9	91	348 ± 63	7 ± 3	238 ± 4	83 ± 7	37	13	4	46	
Ofen 2															
Fichte	1,4 ± 0,04	2,6 ± 0,11	193 ± 3	603 ± 14	5,4	82	439 ± 64	3 ± 2	134 ± 1	27 ± 2	13	13	1	73	
Kiefer	1,7 ± 0,03	2,1 ± 0,06	191 ± 1	699 ± 8	6,7	87	128 ± 4	1 ± 0	143 ± 3	51 ± 7	54	6	4	36	
Fichte/Buche	1,4 ± 0,06	2,7 ± 0,17	180 ± 3	621 ± 26	5,6	85	562 ± 135	2 ± 2	199 ± 5	48 ± 2	0	15	6	79	
Buche	1,3 ± 0,03	2,9 ± 0,18	184 ± 4	567 ± 21	5	81	1049 ± 206	16 ± 15	183 ± 4	69 ± 3	0	7	9	84	
Birke	1,7 ± 0,05	2,2 ± 0,15	198 ± 2	696 ± 22	6,2	84	288 ± 43	2 ± 1	139 ± 7	56 ± 3	19	11	15	55	
Erle	1,5 ± 0,03	2,6 ± 0,11	187 ± 2	659 ± 11	5,9	85	349 ± 81	2 ± 1	251 ± 4	37 ± 2	2	14	3	81	
Ofen 3															
Fichte	1,2 ± 0,03	1,5 ± 0,03	189 ± 1	659 ± 2	5,3	89	50 ± 21	1 ± 0	143 ± 3	27 ± 2	7	11	1	81	
Kiefer	1,4 ± 0,05	1,3 ± 0,08	186 ± 2	694 ± 10	6,1	91	1658 ± 1298	39 ± 40	128 ± 12	214 ± 108	71	5	1	23	
Fichte/Buche	1,3 ± 0,06	1,5 ± 0,08	167 ± 5	649 ± 9	5,5	91	318 ± 245	5 ± 5	183 ± 11	54 ± 8	1	14	6	79	
Buche	1,1 ± 0,03	1,5 ± 0,06	154 ± 5	590 ± 8	4,8	91	454 ± 394	6 ± 5	165 ± 11	59 ± 10	6	8	9	77	
Birke	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Erle	1,2 ± 0,04	1,6 ± 0,07	181 ± 2	653 ± 10	5,3	90	150 ± 68	2 ± 1	244 ± 14	47 ± 5	8	13	11	68	
Ofen 4															
Fichte	1,5 ± 0,04	1,9 ± 0,09	173 ± 1	n.b.	6,4	88	19 ± 5	1 ± 0	105 ± 5	14 ± 2	2	10	0	88	
Kiefer	2,0 ± 0,05	1,5 ± 0,03	213 ± 6	n.b.	8,5	88	282 ± 80	6 ± 2	124 ± 4	55 ± 11	77	4	1	18	
Fichte/Buche	1,6 ± 0,05	1,7 ± 0,03	186 ± 5	n.b.	7	88	61 ± 34	1 ± 0	146 ± 4	29 ± 11	0	4	0	96	
Buche	1,3 ± 0,03	2,2 ± 0,05	166 ± 3	n.b.	5,6	87	68 ± 5	1 ± 0	141 ± 3	54 ± 3	0	6	6	88	
Birke	2,1 ± 0,06	1,4 ± 0,04	203 ± 7	n.b.	8,8	89	657 ± 463	9 ± 5	107 ± 2	26 ± 13	15	11	11	63	
Erle	1,6 ± 0,04	1,9 ± 0,07	186 ± 6	n.b.	6,8	87	47 ± 24	2 ± 1	165 ± 6	32 ± 10	0	3	0	97	
LFPKO ₂ auto mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)															
Fichte	1,3 ± 0,03	1,7 ± 0,02	122 ± 4	673 ± 7	6	94	21 ± 3	1 ± 0	114 ± 1	14 ± 3	0	2	1	97	
Kiefer	1,4 ± 0,15	1,7 ± 0,03	125 ± 2	696 ± 2	6,8	94	10 ± 3	1 ± 0	135 ± 2	13 ± 1	0	2	0	98	
Fichte/Buche	1,4 ± 0,02	1,7 ± 0,04	126 ± 3	680 ± 6	6,1	94	25 ± 7	1 ± 0	170 ± 3	28 ± 7	0	2	0	98	
Buche	1,4 ± 0,05	1,7 ± 0,03	117 ± 6	670 ± 9	6,1	94	33 ± 15	1 ± 0	151 ± 3	29 ± 3	0	2	0	98	
Birke	1,4 ± 0,03	1,7 ± 0,03	121 ± 3	702 ± 8	6,3	94	20 ± 4	1 ± 0	137 ± 2	22 ± 2	0	3	0	97	
Erle	1,4 ± 0,86	1,7 ± 0,02	123 ± 4	684 ± 3	6,6	94	21 ± 2	1 ± 0	213 ± 3	23 ± 3	0	1	0	99	

Bei Ofen 1 wurden diese Unterschiede durch die automatische Brennstoffregelung bereits deutlich reduziert. Dennoch unterschieden sich die Pelletsortimente hinsichtlich des Brennstoffmassenstroms teilweise signifikant. Im Vergleich zur Fichte wurden hier durch die Regelung alle Pelletsortimente im Brennstoffmassenstrom um -3 % (Birke) bis -16 % (Buche) leicht reduziert. Erneut fällt auf, dass die Begrenzung der Regelung den Brennstoffmassenstrom nur um 10 % gegenüber der Werkseinstellung anheben zu können, im Fall der Buchenpellets nicht ausreicht. Beim LFPKO2 mit einer optimierten Brennstoffregelung lagen mit nur 0 bis 7 % Abweichung gegenüber den Fichtenpellets die niedrigsten Abweichungen beim Brennstoffmassenstrom und mit -1 bis -4 % auch die niedrigsten Abweichungen beim Lambdawert vor, was für eine sehr gleichmäßige Brennstoffbeschickung über alle untersuchten Brennstoffe spricht. Die Unterschiede waren zudem weder beim Brennstoffmassenstrom noch beim Lambda statistisch signifikant. Im Vergleich dazu lagen die Unterschiede im Lambda für Ofen 2 bis 4 relativ ähnlich bei bis zu 20 bis -23 % (Ofen 4).

Auch Ofen 1 zeigte bei den Buchenpellets trotz automatischer Brennstoffregelung eine Abweichung von +29 % zur Fichte aufgrund der bereits beschriebenen, vom Hersteller vorgegebenen Regelgrenzen. Die Nennwärmeleistung wurde bei Ofen 1 für drei Brennstoffe, bei Ofen 2 für keinen Brennstoff, bei Ofen 3 für einen Brennstoff und Ofen 4 für zwei Brennstoffe erreicht, wobei dies bei den unregulierten Öfen die Pellets mit der kurzen Längenverteilung waren. Die Öfen scheinen daher unter Einbeziehung der anderen Messergebnisse in der Praxis vom Hersteller eher auf eine zu niedrige Wärmeleistung eingestellt, oder in der Typenprüfung oft mit eher kurzen Pellets getestet zu werden.

Der LFPKO2 erreichte mit allen untersuchten Brennstoffen aufgrund der optimierten Brennstoffregelung die Nennwärmeleistung und überschritt diese mit den kurzen Pellets auch nur um maximal 0,8 kW bzw. 13 %. Die Wirkungsgrade schwankten bei Ofen 1, 3 und 4 mit lediglich ± 1 %. Bei Ofen 2 kam es zu größeren Schwankungen um bis zu ± 3 % und beim LFPKO2 wurde mit allen Brennstoffen der höchste und auch konstante Wirkungsgrad von 94 % erzielt.

Tabelle 27: Prozentuale Änderung der wichtigsten Emissionen und feuerungstechnischen Parameter beim Brennstoffwechsel der Baumart gegenüber dem Sortiment Fichte

Brennstoff	Brennstoff- massenstrom	Lambda	CO	OGC	NO _x	Gesamtstaub	EC + OC
Ofen 1 mit automatischer Regelung des Brennstoffs							
Kiefer	-5%	7%	-41%	n.b.	18%	-38%	-60%
Fichte/Buche	-3%	6%	19%	n.b.	45%	16%	-87%
Buche	-16%	29%	354%	451%	14%	68%	-18%
Birke	-3%	10%	0%	n.b.	21%	-24%	91%
Erle	-12%	-1%	113%	157%	73%	92%	83%
Ofen 2							
Kiefer	20%	-18%	-71%	-66%	7%	89%	644%
Fichte/Buche	3%	3%	28%	-31%	48%	76%	-33%
Buche	-9%	11%	139%	354%	36%	156%	49%
Birke	23%	-16%	-35%	-46%	4%	109%	191%
Erle	7%	-2%	-21%	-57%	87%	36%	-54%
Ofen 3							
Kiefer	14%	-18%	3210%	4312%	-10%	699%	5173%
Fichte/Buche	2%	-1%	535%	469%	28%	102%	66%
Buche	-9%	-2%	805%	551%	16%	122%	337%
Birke	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Erle	-1%	5%	200%	81%	71%	75%	336%
Ofen 4							
Kiefer	34%	-20%	1357%	492%	18%	284%	16897%
Fichte/Buche	10%	-7%	213%	1%	39%	102%	35%
Buche	-12%	20%	250%	41%	34%	274%	1052%
Birke	38%	-23%	3295%	801%	2%	78%	3752%
Erle	8%	-1%	145%	88%	57%	121%	-74%
LFPKO2 _{auto} mit automatischer Regelung des Brennstoffs (vor Optimierung der Lufteinstellungen)							
Kiefer	7%	-3%	-54%	-8%	19%	-8%	-9%
Fichte/Buche	2%	-1%	20%	31%	50%	98%	89%
Buche	3%	-3%	54%	-8%	33%	107%	68%
Birke	6%	-4%	-7%	-6%	21%	54%	85%
Erle	0%	-1%	-2%	4%	87%	61%	-24%

Abbildung 71 zeigt mittleren CO-Emissionen der Feuerungsversuche zum Einfluss der Baumart. Wie zu erwarten, fallen aufgrund der besonders kurzen Pelletlängenverteilung die Kiefer- und Birkenpellets bei den unregulierten Öfen 3 und 4 mit Abwurfheizung deutlich auf. Im Anbetracht der gleichzeitig sehr niedrigen Lambdawerte ist hier von signifikant erhöhten CO-Emissionen durch Luftmangel auszugehen. Die Unterschubheizung (Ofen 2) zeigte zwar für diese Brennstoffe auch niedrigere Lambdawerte, profitierte aber mit im Vergleich zur Fichte um -35 % (Birke) bis -71 % (Kiefer) niedrigeren CO-Emissionen eher von den kürzeren Pellets. Dies hat vermutlich auch damit zu tun, dass Ofen 2 prinzipiell hohe Lambdawerte aufzeigte und auch mit den Pellets normaler Längenverteilung fast 3 kW unter der vom Hersteller angegebenen Brennstoffwärmeleistung lag. Bei den Öfen mit automatischer Brennstoffregelung zeigte sich, wie auch schon bei den additivierten Brennstoffen, für die Kiefer mit einem hohen Si/K-Verhältnis eher eine Reduktion der CO-Emissionen gegenüber der Fichte um -41 bis -54 % und bei der Birke vergleichbare CO-Emissionen. Wie bereits bei den Messungen zum Einfluss der Pelletlänge ergaben sich für die Buchenpellets durchweg für alle Öfen erhöhte CO-Emissionen, die bis zum 8-fachen (Ofen 3) der CO-Emissionen mit Fichte lagen. Für die beiden Öfen mit extremer Luftstufung lagen die CO-Emissionen absolut betrachtet jedoch trotzdem auf einem sehr niedrigen Niveau mit deutlich unter 100 mg/Nm³. Die Mischung aus Fichte und Buche führt bei allen Öfen zu einem Anstieg der CO-Emissionen die jedoch immer teils deutlich (Ofen 1 und 2) unter den CO-Emissionen von reiner Buche lagen. Die Erlenpellets führten bei Ofen 1, 3 und 4 zu einem tendenziellen Anstieg der CO-Emissionen gegenüber Fichte, dieser war allerdings aufgrund der hohen Streuungen der Einzelwerte nicht signifikant. Die CO-Emissionen des LFPKO2 lagen mit 10 bis 33 mg/Nm³ über alle Sortimente hinweg am niedrigsten und wiesen die geringste Streuung über die verwendeten Baumarten auf.

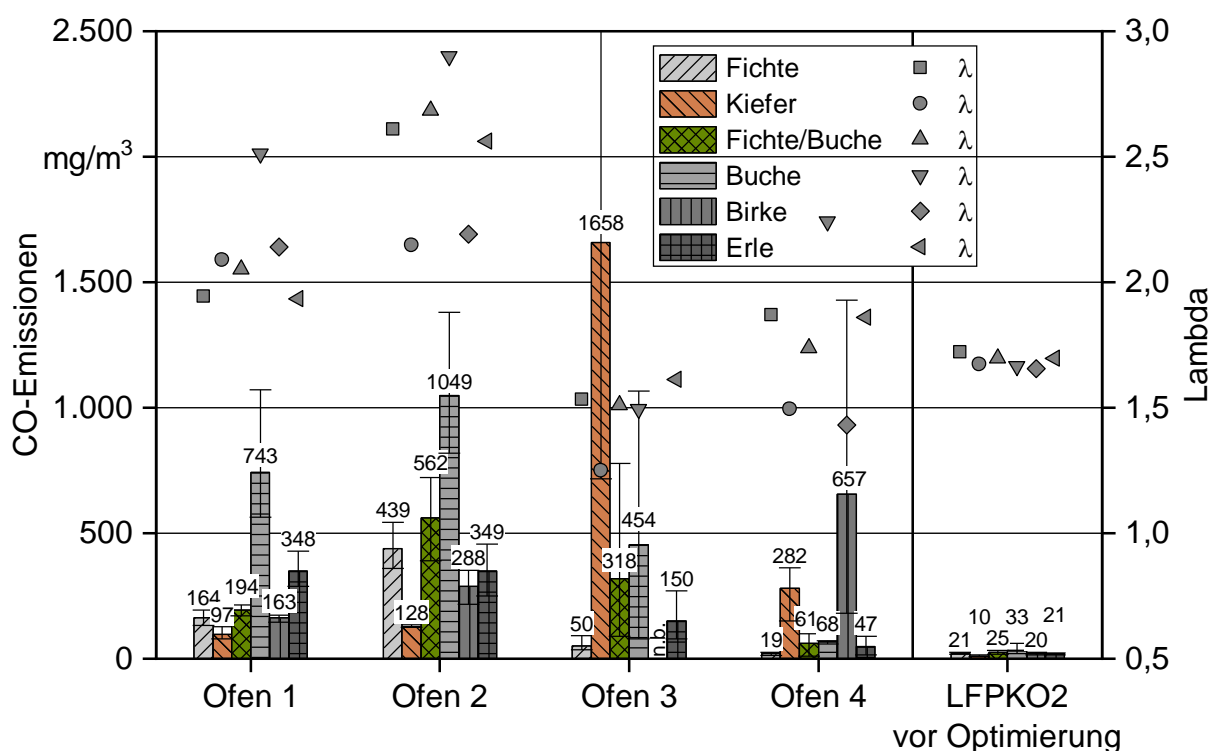


Abbildung 71: CO-Emissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Pellets aus unterschiedlichen Baumarten im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

Die OGC-Emissionen lagen für die meisten Baumarten und Öfen auf einem niedrigen, einstelligen Niveau. Höhere OGC-Emissionen wurden nur für Buche (Ofen 1 und 2) sowie Kiefer in Ofen 3 gemessen. Beim LFPKO2 lagen die OGC-Emissionen für alle Sortimente bei ca. 1 mg/Nm³ (vgl. Tabelle 26).

Bei den NO_x-Emissionen gab es zwischen den untersuchten Baumarten größere Unterschiede. Für die Feuerungen ohne extreme Luftstufung lagen die NO_x-Emissionen zwischen 128 (Kiefer, Ofen 3) und 251 mg/Nm³ (Erle, Ofen 2). Bei Ofen 4 (105 bis 165 mg/Nm³) und dem LFPKO2 (114 bis 2013 mg/Nm³) lagen die NO_x-Emissionen dagegen aufgrund der extremen Luftstufung wieder signifikant niedriger als bei den herkömmlichen Feuerungen. Für Erle, Fichte/Buche und Birke liegen zudem die NO_x-Emissionen von Ofen 4 nochmals signifikant niedriger als beim LFPKO2. Die NO_x-Emissionen korrelierten relativ stark mit dem Brennstoffstickstoffgehalt (siehe Abbildung 72). Diesem Effekt wirkten teilweise die CO-Emissionen bei manchen Öfen und Brennstoffen dämpfend entgegen.

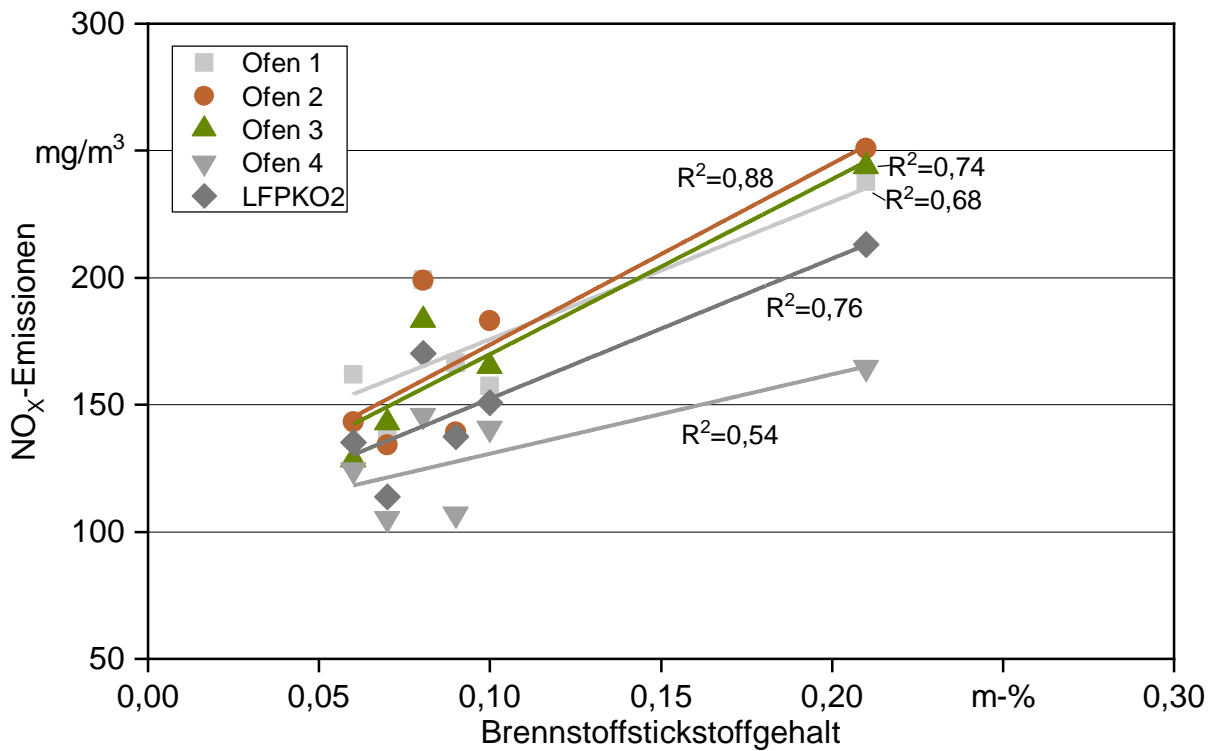


Abbildung 72: Korrelation der NO_x -Emissionen mit dem Brennstoffstickstoffgehalt für die Nennlastversuche mit Pellets aus unterschiedlichen Baumarten

Abbildung 73 zeigt die Gesamtstaubemissionen der untersuchten Brennstoffe für die jeweiligen Öfen. Die Staubemissionen lagen bei Ofen 1 für alle Sortimenten außer Kiefer, für Ofen 2 und 3 für alle außer Fichte, und bei Ofen 4 für Kiefer, Buche und knapp für Erle über dem Grenzwert der 1. BImSchV. Der LFPKO2 unterschreitet bereits vor der Optimierung mit allen Baumarten den Grenzwert von 30 mg/Nm^3 . Ofen 3 zeigte wieder einen sehr hohen Ausschlag von 214 mg/Nm^3 bei der Kiefer, der, wie auch bei den CO-Emissionen, auf die kurze Pelletlängenverteilung zurückzuführen sein sollte. Dies spiegelt sich auch in dem sehr hohen Anteil an EC an den Gesamtstaubemissionen von 71 % wider, was für eine unvollständige Verbrennung durch Sauerstoffmangel spricht. Der gleiche Effekt kann auch für Ofen 4 mit 77 % EC nur auf einem niedrigeren Gesamtniveau der Staubemissionen von 55 mg/Nm^3 beobachtet werden. Bei Ofen 2 lagen die Staubemissionen für die Kiefer mit 51 mg/Nm^3 vergleichbar mit Ofen 4. Bei Ofen 1 lagen sie dagegen mit 27 mg/Nm^3 um ca. 38 % niedriger als mit Fichte. Dies spricht auch im Hinblick auf die Zusammensetzung des Staubs auf eine Einbindung des Kaliums in die Asche. Die Buche führte bei allen Feuerungen aufgrund des deutlich höheren Kaliumgehalts zu signifikant höheren Staubemissionen. Die Mischung aus 65 % Fichte und 35 % Buche reiht sich bei allen Feuerungen zwischen reiner Fichte und reiner Buche ein und bewirkte hier einen Anstieg der Staubemissionen gegenüber Fichte von 16 % (Ofen 1) bis ca. 100 % (Ofen 3 und 4). Die Pellets aus Birke bewirkten bei Ofen 2 und Ofen 4 aufgrund der sehr kurzen Pelletlängenverteilung einen deutlichen Anstieg der Gesamtstaubemissionen von 78 % (Ofen 4) bis 100 % (Ofen 2). Bei Ofen 1 und dem LFPKO2 mit automatischer Regelung der Brennstoffzufuhr war dies nicht der Fall. Bei Ofen 1 war ein tendenzieller Rückgang (-24 %) und LFPKO2 eine leichte Steigerung (+54 %) zu erkennen, allerdings hier ausgehend von einem absolut niedrigen Niveau. Insgesamt lagen die Staubemissionen von Ofen 4 aufgrund der extremen Luftstufung (außer bei Kiefer) signifikant niedriger als die der anderen marktverfügbaren Öfen. Der LFPKO2 konnte bei Kiefer, Buche, Birke und Erle allerdings nochmal niedrigere Emissionen aufweisen und hatte mit einer absoluten Streuung der Staubemissionen von 14 bis 29 mg/Nm^3 auch die konstantesten Staubemissionen über alle untersuchten Baumarten hinweg. Berechnet man aus den Filteranalysen und den Staubemissionen (vgl. Tabelle 26) die Emissionen an Salzen und Oxiden (vor allem Kaliumsalze), so ergibt sich für die meisten Öfen eine gute Korrelation (siehe Abbildung 74). Diese wird aufgrund der in Summe deutlich erhöhten Messunsicherheiten auf der einen Seite, sowie den Quereinfluss der Pelletlänge teilweise abgeschwächt. Anhand der unterschiedlichen Steigungen lässt sich trotzdem erkennen, dass die untersuchten Feuerungen vermutlich aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen im Glutbett auch unterschiedliche Kaliumfreisetzungsraten aufweisen. Der Quereinfluss der Pelletlänge lässt sich näherungsweise gut durch den Anstieg von EC+OC (vgl. Tabelle 27) bei den Öfen 2, 3 und 4 ohne automatische Brennstoffregelung erkennen.

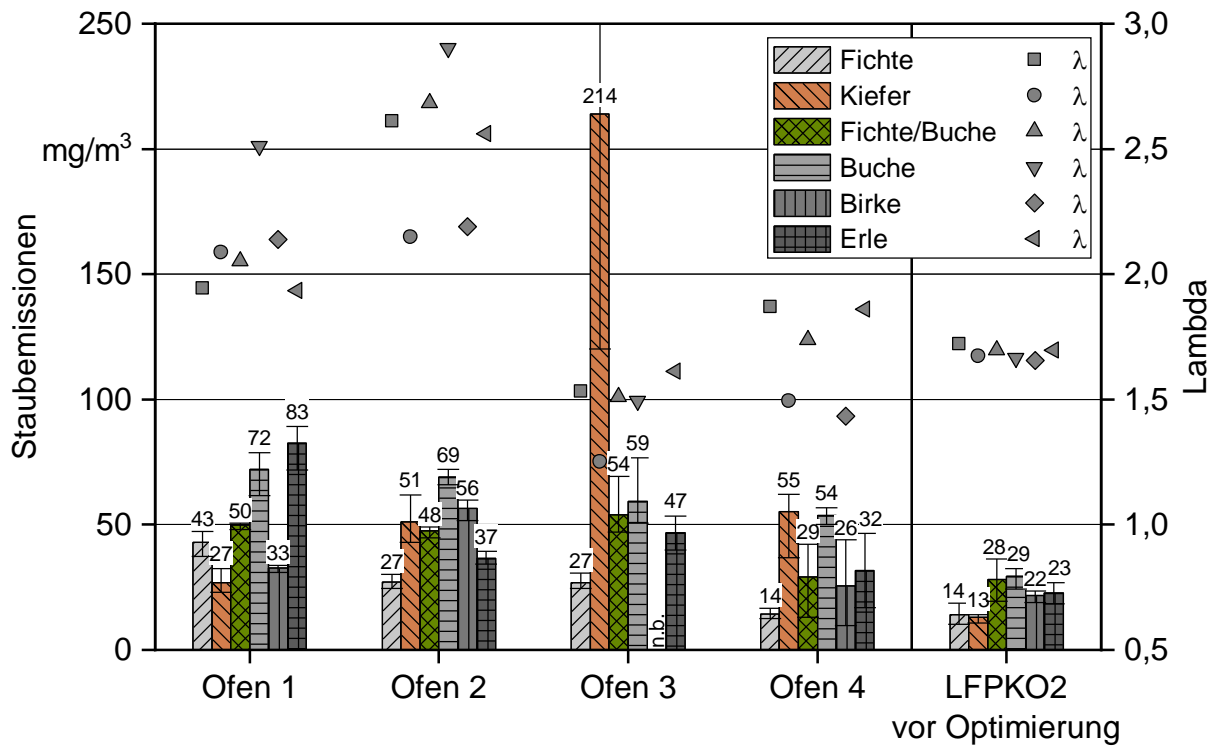


Abbildung 73: Gesamtstaubemissionen der untersuchten Feuerungen bei den Messungen mit Pellets aus unterschiedlichen Baumarten im Nennlastbetrieb. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte der Einzelmessungen.

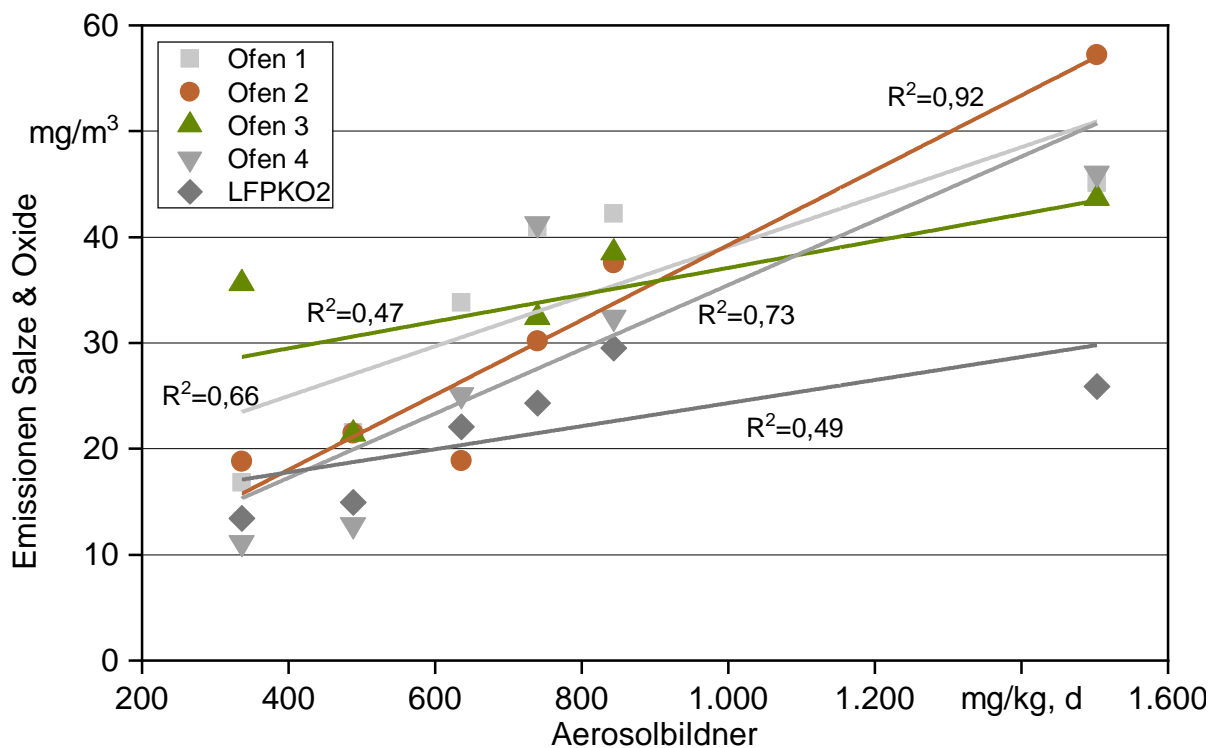


Abbildung 74: Korrelation der Emissionen an Salzen & Oxiden mit den aerosolbildenden Elementen (K, Na, Pb, Zn) bei den Nennlastmessungen mit unterschiedlichen Baumarten.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass sich bei den Baumarten neben dem ungewollten Effekt der Pelletlängenverteilung vor allem der Kaliumgehalt (insbesondere bei Buche) sowie das Si/K-Verhältnis (Kiefer bei geregelten Öfen) auf die Höhe der Staubemissionen auswirkt. Außerdem wurde der ohnehin bereits bekannte Zusammenhang zwischen Brennstoffstickstoffgehalt und NO_x-Emissionen bestätigt [30]. Baumartbedingt konnten NO_x-Emissionen bis 250 mg/Nm³ gemessen werden, was ca. dem Doppelten der durchschnittlichen NO_x-Emissionen bei Fichte entspricht. Sollten zukünftig stickstoffhaltigere Baumarten wie z.B. Erle einen höheren Anteil am Ausgangsmaterial für die Pelletproduktion einnehmen, könnten die NO_x-Emissionen aus Pelletfeuerungen signifikant zunehmen. Werte wie für das „5 Sterne“-Label für Pelletöfen in

Italien sind in der Folge mit einer breiten Auswahl von Pelletaushangsmaterial nicht realisierbar, da diese aktuell schon nur mit Auswahl spezieller Pellets mit sehr niedrigem Stickstoffgehalt erreicht werden können, ohne unverhältnismäßige Sekundärmaßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen einzusetzen. Aktuelle marktverfügbare Pelletöfen weisen bei wechselnden Baumarten im Pelletaushangsmaterial häufig Staub- und teilweise CO-Emissionen oberhalb der aktuellen Grenzwerte nach 1. BImSchV auf. Eine Reduzierung des Aschegehalts auf < 0,5 m-% und eine Einschränkung der zulässigen Pelletlängenverteilung bzw. des Anteils an Pellets < 10 mm für Pelletöfen könnten dazu beitragen, die Emissionen der aktuell im Bestand befindlichen Geräte zu senken.

Neu entwickelte Öfen sollten mit einer adequaten Regelung des Brennstoffmassenstroms auf die zur Feuerung passende Wärmeleistung ausgestattet sein. Die extreme Luftstufung auf Basis der Festbettvergasung in Verbindung mit einer Abgasrezirkulation und mit einer solchen Regelung, wie der hier gezeigte LFPKO2, sind in der Lage, mit einer breiten Auswahl an Pellets unterschiedlicher Längenverteilungen und chemischer Zusammensetzungen durchweg sehr niedrige Emissionen deutlich unter den aktuellen Grenzwerten zu gewährleisten.

Statistische Gesamtbewertung der Feuerungsversuche

Für die statistische Gesamtbewertung der Ergebnisse wurden Pearson-Korrelationen zwischen ausgewählten Brennstoffparametern und den gemessenen Emissionen sowie ausgewählten Anlagenparametern durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Einzelmessungen als auch die Mittelwerte der Feuerungsversuche herangezogen. In der Bewertung der Korrelationen hat sich die Verwendung der Mittelwerte bei den Emissionsmessungen als aussagekräftiger herausgestellt. Zudem wurden die Korrelationen für alle Feuerungen einzeln sowie in Gruppierungen und für alle Feuerungen gemeinsam durchgeführt, um den Einfluss der Feuerung mitzubeleuchten. Zusätzlich wurde mit drei Standard-Signifikanzniveaus gearbeitet: $p \leq 0,05$ (*) für eine eher schwache Signifikanz bzw. einen Trend, $p \leq 0,01$ (**) für eine signifikante Korrelation und $p \leq 0,001$ (***) für eine stark signifikante Korrelation. Die im Folgenden gezeigten Korrelationsmatrizen geben den Pearson-Koeffizienten in farblichen Abstufungen zwischen -1 (dunkelblau) und 1 (dunkelrot) an und das Signifikanzniveau in Form von einem bis drei Sternchen (* bis ***) wieder. Ein negativer Pearson-Korrelationskoeffizient bedeutet, dass die Erhöhung des jeweiligen Brennstoffparameter den entsprechenden Parameter der Feuerung (Emission oder Anlagenparameter) senkt, während ein positiver Wert eine erhöhende Wirkung anzeigt. Diese Korrelation muss nicht zwangsläufig einen sinnvollen oder kausalen Zusammenhang haben. Darauf wird in der folgenden Diskussion, soweit möglich, eingegangen

Abbildung 75 zeigt die Pearson-Korrelationsmatrix der ausgewählten Emissions- und Anlagenparameter aller fünf untersuchten Pelletöfen mit der Auswahl an als relevant erachteten Brennstoffparametern. Über alle Feuerungen hinweg ergab sich eine starke Abhängigkeit und eine signifikante Korrelation ($p \leq 0,001$) des Brennstoffmassenstroms von der Pelletlänge, dem Massenanteil an Pellets < 10 mm sowie, leicht abgeschwächt, für die wiederum davon abhängigen Parameter Schüttdichte und Energiedichte. Dies deckt sich eindeutig mit den Beobachtungen aus den Untersuchungen zum Einfluss der Pelletlänge. Die starken Signifikanzen beim Aschegehalt, Feinanteil und der Summe der aerosolbildenden Elemente sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass bei den Brennstoffen, die hier hohe Werte aufweisen, gleichzeitig die Pelletlänge tendenziell kürzer und somit auch die Schüttdichte höher war. Auch die Richtung der jeweiligen Parameter erscheint sinnvoll: Bei den Lambdawerten sind es im Wesentlichen dieselben Brennstoffparameter (Pelletlänge, Schüttdichte und Energiedichte), die hier mit $p \leq 0,01$ immer noch stark beeinflussen. Die Wirkrichtung ist im Vergleich zum Brennstoffmassenstrom dabei umgekehrt.

Bezüglich der CO-Emissionen ergaben sich feuerungsübergreifend nur signifikante Korrelationen ($p \leq 0,01$) mit der Summe der aerosolbildenden Elemente bzw. stellvertretend der Holzart (hauptsächlich Buche). Im Trend ($p \leq 0,05$) scheint der Aschegehalt ebenfalls noch einen Einfluss auf die CO-Emissionen zu haben, sowohl mit als auch ohne Karbonate. Bei OGC ergaben sich keine signifikanten Korrelationen. Lediglich im Trend mit der Summe der aerosolbildenden Elemente zeigten sich Effekte, was vermutlich wieder auf den Einfluss der Buche zurückzuführen ist. Bei den NO_x-Emissionen zeigte sich der bereits bekannte Zusammenhang mit dem Brennstoffstickstoffgehalt ($p \leq 0,001$). Außerdem scheinen hohe Ca/K-Verhältnisse sowie hohe Schütt- und Energiedichten positiv zu wirken. Dies könnte jedoch auch mit gleichzeitig höheren CO-Emissionen bei solchen Brennstoffen zusammenhängen.

Beim Gesamtstaub ergab sich nur eine Korrelation mit schwacher Signifikanz ($p \leq 0,05$) für die Summe der aerosolbildenden Elemente. Dies dürfte vor allem auf überlagernde Effekte bei Partikeln aus unvollständiger Verbrennung zurückzuführen sein, wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben. Wenn man die Staubemissionen jedoch nach Salzen & Oxiden sowie Partikeln aus unvollständiger Verbrennung (EC + OC) aufteilt, lassen sich deutlichere Abhängigkeiten ableiten. Der Aschegehalt und die Summe der aerosolbildenden Elemente wirken sich hoch signifikant negativ auf die Emissionen an Salzen und Oxiden aus, während hohe Si/K- und Ca/K-Verhältnisse ebenfalls mit $p \leq 0,001$ dämpfend wirken. Ebenso scheinen eine höhere Energiedichte bzw. Heizwert ebenfalls dämpfend zu wirken ($p \leq 0,01$). Im Trend ist eine dämpfende Wirkung des TIC sowie der mittleren Pelletlänge und eine negative Wirkung des Massenanteils an Pellets < 10 mm erkennbar. Bei den Partikeln aus unvollständiger Verbrennung (EC + OC) hat ein zu hoher

Energieeintrag in die Brennkammer einen signifikant negativen Einfluss ($p \leq 0,01$ bis $0,001$). Der Einfluss der Pelletlänge und des Anteils an Pellets < 10 mm geht beim Überblick über alle Anlagen jedoch nur noch mit geringer Signifikanz hervor ($p \leq 0,05$).

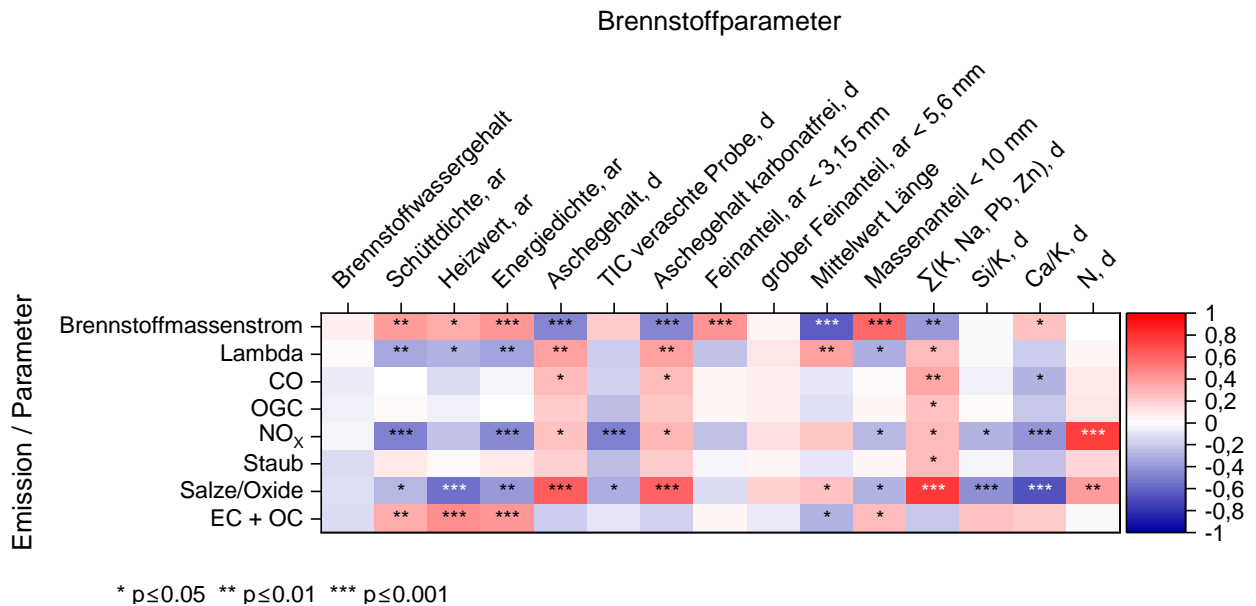


Abbildung 75: Pearson-Korrelationsmatrix der Mittelwerte der Emissionsmessungen und der untersuchten Brennstoffparameter über alle fünf untersuchten Feuerungen. d: = trocken „dry“, ar = im Anlieferungszustand „as received“

Die einzelnen Feuerungen unterschieden sich bei den Korrelationen teils deutlich. Dennoch wurden Überschneidungen bei den Öfen ohne Regelung (2, 3 und 4) sowie bei den Öfen mit Regelung des Brennstoffmassenstroms (Ofen 1 und LFPKO2) festgestellt. Abbildung 76 zeigt die Pearson-Korrelationsmatrix für die Feuerungen ohne Regelung des Brennstoffmassenstroms. Abbildung 77 zeigt die Korrelationsmatrix für die Feuerungen mit Regelung des Brennstoffmassenstroms.

Im direkten Vergleich fällt auf, dass bei den Feuerungen ohne Regelung des Brennstoffmassenstroms der Effekt der Pelletlänge und des Anteils an Pellets < 10 mm stärker ausgeprägt ist. Dennoch sind diese Effekte bei den Feuerungen mit Regelung immer noch signifikant vorhanden.

Bei den Feuerungen mit Regelung wirkt sich die Energiedichte stärker aus, da diese sich indirekt auf die Flammtemperatur auswirkt und dies meist als Regelgröße der Steuerung verwendet wird.

Die deutlichsten Unterschiede ergeben sich im Vergleich bei den Staubemissionen, vor allem beim Anteil aus unvollständiger Verbrennung (EC + OC). Während bei den Feuerungen ohne Regelung des Brennstoffmassenstroms ein starker und signifikanter Effekt der Energiedichte, der Pelletlänge und des Massenanteils an Pellets < 10 mm auf den Anteil an EC und OC in den Staubemissionen besteht, ist dieser bei den Feuerungen mit aktiver Regelung des Brennstoffmassenstroms nicht vorhanden. Dies verdeutlicht nochmals die Effektivität einer solchen Regelung.

Beim Anteil der Staubemissionen an Salzen und Oxiden scheint die Regelung des Brennstoffmassenstroms die Effekte der einzelnen Brennstoffparameter im Vergleich zu den unregulierten Geräten nur leicht abzumildern. Die Richtung der Effekte bleibt im Wesentlichen gleich.

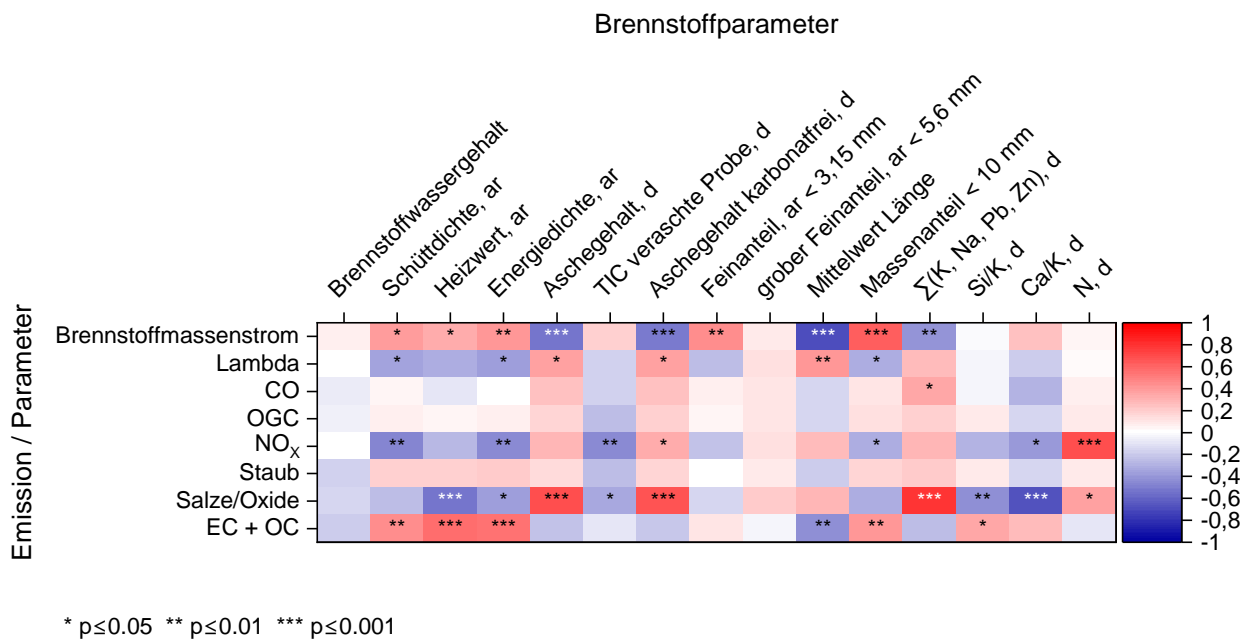


Abbildung 76: Pearson-Korrelationsmatrix der Mittelwerte der Emissionsmessungen und der untersuchten Brennstoffparameter über alle Feuerungen ohne Regelung des Brennstoffmassenstroms. . d: = trocken „dry“, ar = im Anlieferungszustand „as received“

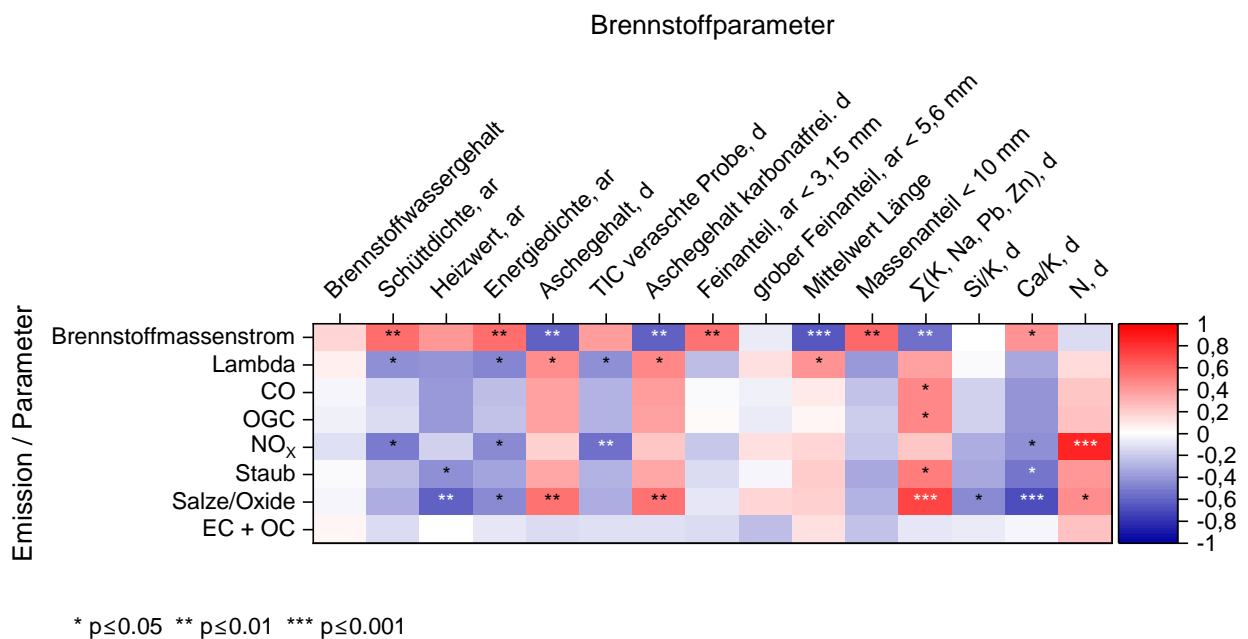


Abbildung 77: Pearson-Korrelationsmatrix der Mittelwerte der Emissionsmessungen und der untersuchten Brennstoffparameter über alle Feuerungen mit Regelung des Brennstoffmassenstroms. . d: = trocken „dry“, ar = im Anlieferungszustand „as received“

Außer den hier beschriebenen Unterschieden gab es nur noch nennenswerte Abweichungen bei der Unterschubfeuerung (Ofen 2). Hier zeigten sich aufgrund des insgesamt höheren Emissionsniveaus bei den gasförmigen Emissionen auch Abhängigkeiten bei CO und OGC mit der Energiedichte, dem Aschegehalt und der Summe der aerosolbildenden Elemente. Diese liegen jedoch sehr wahrscheinlich eher an hohen Falschlufmengen und den insgesamt hohen Undichtigkeiten bei Ofen 2.

Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse in der Gesamtauswertung nochmals die Beobachtungen der einzelnen Brennstoffsortimente in den vorangegangenen Kapiteln. Zudem konnten im Wesentlichen auch die Beobachtungen aus FuturePelletSpec 1 bestätigt werden mit dem Unterschied, dass die Pelletlänge und Energiedichte bei Öfen ohne Regelung einen doch wesentlich größeren Einfluss spielt als in FuturePelletSpec 1 angenommen. Zudem zeigen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen, anders als in FuturePelletSpec 1,

auch, dass der Aschegehalt näherungsweise als guter Marker für die Staubemissionen durch erhöhte Gehalte an Aerosolbildnern geeignet zu sein scheint. Dies untermauert nochmals den Vorschlag eines Aschegehalts von < 0,5 m-% für den optimalen Betrieb von Pelletöfen.

Arbeitspaket 5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung

Aus den Untersuchungen des Projekts geht hervor, dass die automatische Regelung des Brennstoffmassenstroms bei Pelletöfen enorme Vorteile hinsichtlich der Emissionen und der Brennstoffflexibilität bietet. Jedoch ist eine solche Regelung derzeit weder normativ gefordert, noch besteht eine geeignete Kennzeichnung bzw. Nomenklatur für Geräte, die solch eine Regelung aufweisen. Um den Verbraucher gezielt zum Kauf solcher Geräte beraten oder durch eventuelle Fördermaßnahmen anreizen zu können, bedarf es einer eindeutigen Kennzeichnung. Dies könnte, ähnlich wie bei raumluftunabhängigen Geräten durch eine Kennzeichnung auf dem Typenschild erfolgen. Hierzu wurden vom TFZ im deutschen Spiegelausschuss des CEN-TC 295 am 27.03.2024 Ergebnisse aus dem Projekt präsentiert. Es wurde entschieden, dass eine TS (Technische Spezifikation) erstellt wird. Diese befindet sich aktuell in der Bearbeitung durch die zuständigen Fachgremien und wird nach Fertigstellung erneut im Spiegelausschuss verteilt.

Da eine Richtlinie in Deutschland eher rechtlich bindenden Charakter hat, wurde im Konsortium entschieden die ursprünglich als Richtlinien geplanten Schriftstücke als Empfehlungen für das „Design neuer emissionsarmer Pelletöfen“ und die „erweiterte Pelletcharakterisierung“ zu veröffentlichen. Im folgenden Text wird daher von Empfehlungen gesprochen.

Es wurden Empfehlungen zum Design neuer emissionsarmer Pelletöfen erstellt, in der die wichtigsten Punkte die sich aus der Entwicklung des hier beschriebenen LEFlex-PKo ergeben haben, zusammengefasst wurden. Diese Empfehlungen werden auf der Projektseite des TFZ für interessierte Ofenhersteller und Entwickler zur Verfügung gestellt.

www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biogenefestbrennstoffe/dateien/empfehlungen_ofenentwicklung_final.pdf

Für die Kennzeichnung speziell für den Einsatz in Pelletöfen geeigneter Pelletsackware wurden im Projektgremium folgende Werte festgelegt:

- Aschegehalt $\leq 0,5$ m-%
- Wassergehalt 5 bis 10m-%
- Ausschluss der Längensklasse „S“

Hierdurch könnten nach aktuellem Kenntnisstand die schlimmsten brennstoffbedingten Einflüsse auf die Emissionen bei Bestandsgeräten deutlich abgemildert werden. Zudem könnte dies auch Reklamationen bei Pelletproduzenten vorbeugen. Ein entsprechender Entwurf wurde vom DEPI am 25.9.2025 in das entsprechende Gremium eingereicht.

Zudem wurden eine Empfehlungen für die erweiterte Pelletcharakterisierung erstellt, die ebenfalls die wichtigsten Ergebnisse aus AP2 und aus FuturePelletSpec 1 hinsichtlich der Brennstoffcharakterisierung enthält. Diese steht ebenfalls dauerhaft auf der Projektseite des TFZ zum Download zur Verfügung.

www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biogenefestbrennstoffe/dateien/empfehlungen_pelletcharakterisierung_final.pdf

Beide Richtlinien sind diesem Bericht als Anhang beigefügt.

Die Ergebnisse aus den Feuerungsversuchen wurden in Teilen bereits beim Arbeitskreis Holzfeuerungen 2024 und 2025 sowie auf der EUBCE 2025 vorgestellt. Desweiteren wurden Abstracts für die CEBC 2026 und die Pelletskonferenz in Wels 2026 eingereicht.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

keine

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die im Projekt entwickelten Simulationsmethoden und die daraus abgeleitete Entwicklung des Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens (LEFLEX-PKo) ermöglichen die Markteinführung einer neuen Generation von Pelletöfen mit extrem niedrigen Emissionen und hoher Brennstoffflexibilität. Diese Innovationen bieten ein hohes Marktpotenzial, insbesondere im Hinblick auf zukünftige verschärfte Ökodesign-Richtlinien und steigende Anforderungen an die Emissionsminderung.

Die im Projekt erarbeiteten Empfehlungen und Charakterisierungsmethoden können von anderen Ofenherstellern genutzt werden, um schneller und gezielter emissionsarme und brennstoffflexible Geräte zu entwickeln. Die neuen Modelle und Prüfmethode ermöglichen effizientere und kostengünstigere Entwicklungsprozesse, was die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller steigert.

Die im Projekt vorgeschlagene und entwickelte erweiterte Kennzeichnung von Pelletsackware, die speziell für den Einsatz in Pelletöfen geeignet ist (z. B. Aschegehalt < 0,5 m-%, Wassergehalt 5 bis 10 m-%, Ausschluss der Längensklasse „S“), eröffnet ein neues Marktsegment. Pelletproduzenten können gezielt Produkte für Einzelraumfeuerungen anbieten, was sowohl die Emissionen senkt als auch die Effizienz bestehender Geräte steigert.

Durch die Anwendung der im Projekt entwickelten CFD-Abbrandmodelle können Hersteller künftig gezielter neue Ofenkonzepte entwickeln, die effizienter und emissionsärmer sind. Dies kann zu einer höheren Akzeptanz und Verbreitung von Pelletöfen im Markt führen.

Die Projektergebnisse und die daraus abgeleiteten Normungsvorschläge und Empfehlungen stärken die Position deutscher und europäischer Hersteller im internationalen Wettbewerb, da sie frühzeitig aufkommende regulatorische Anforderungen vorbereitet sind.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Erste Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Fachtagungen (EUBCE, Arbeitskreis Holzfeuerungen 2024 und 2025, World of Fireplaces), sowie in peer-review Fachzeitschriften (Biomass & Bioenergy, Biomass Conversion and Biorefinery) konnten bereits während der Projektlaufzeit getätigt werden. Auf verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen und Messen konnten bereits die Ergebnisse präsentiert werden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden nach Ende der Projektlaufzeit durch weitere geplante Veröffentlichung in wissenschaftlichen Fachjournals, sowie durch Vorträge oder Fachbeiträge (CEBC 2026, Pelletskonferenz 2026) einem nationalen und internationalen wissenschaftlichen Publikum vorgestellt. Eine detaillierte Auflistung aller Veröffentlichungen befindet sich unter Punkt „II. Veröffentlichungen“.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im Projekt entwickelten und erprobten Methoden zur erweiterten Pelletcharakterisierung, wie Schnellbestimmungsmethoden (z. B. NIR-Spektroskopie, fotooptische Längenmessung) und die neuen Ansätze zur Vorhersage des Versinterungsverhaltens bieten eine solide Basis für weiterführende Forschungsarbeiten. Diese Methoden können in zukünftigen wissenschaftlichen Projekten weiter optimiert, validiert und auf andere Biomassebrennstoffe oder Anlagentypen übertragen werden.

Das im Projekt entwickelte und validierte CFD-Brennstoffbettmodell kann in weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekten für die Simulation und Optimierung von Pelletöfen und -kesseln eingesetzt werden. Es ermöglicht die Untersuchung neuer Feuerungskonzepte, Regelungsstrategien und die Bewertung alternativer Brennstoffe.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse werden laufend in nationale und internationale Normungsgremien eingebracht. Dadurch können zukünftige Normen und Zertifizierungen gezielter an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden.

Die Ergebnisse sind durch zahlreiche Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge und die Einbindung in Fachgremien national und international sichtbar und anschlussfähig. Die Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie kann auf Basis der Projektergebnisse weiter ausgebaut werden.

Die im Projekt entwickelten Charakterisierungsmethoden, Empfehlungen und das CFD-Modell ermöglichen es Herstellern, Entwicklungszeiten und -kosten für neue, emissionsarme und brennstoffflexible Pelletöfen deutlich zu reduzieren. Das verschafft einen Wettbewerbsvorteil und fördert die schnelle Markteinführung innovativer Produkte.

Die erarbeiteten Kriterien und Kennzeichnungen für speziell für Pelletöfen geeignete Pelletsackware eröffnen ein neues Marktsegment für Pelletproduzenten und den Handel. Dies kann zu einer Differenzierung am Markt und zu einer Steigerung der Produktqualität führen.

Die Anwendung der Projektergebnisse ermöglicht es, bestehende und neue Geräte effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten, was die Akzeptanz und Verbreitung von Pelletöfen erhöht und damit neue Absatzmärkte erschließt.

Die entwickelten Methoden und Modelle sind nicht auf Einzelraumfeuerungen beschränkt, sondern können auch auf Zentralheizungskessel oder andere Biomassefeuerungen übertragen werden, was die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit weiter erhöht.

Die klaren Empfehlungen und geplanten Kennzeichnungen erleichtern die Integration in Förderprogramme und Zertifizierungssysteme, was die Marktdurchdringung neuer Technologien und Brennstoffe beschleunigt.

3. Erkenntnisse von Dritten

Soweit bekannt, sind während der Projektlaufzeit keine verwertbaren Erkenntnisse von Dritten entstanden.

4. Veröffentlichungen

Vortrag zu dem Einfluss der Pelletlängenverteilung auf die Emissionen auf dem 27. Arbeitskreis Hozfeuerungen am 05.06.2024 in Straubing (TFZ)

Vortrag zu den Ergebnissen aus AP2 auf der World of Fireplaces am 29.04.2025 in Leipzig (TFZ)

Vortrag zu den Ergebnissen aus AP2 auf dem 28. Arbeitskreis Hozfeuerungen am 22.05.2025 in Straubing (TFZ)

Poster zu den Ergebnissen aus AP2 und AP4 auf der EUBCE am 12.06.2025 in Valencia (TFZ)

Vortrag zu AP3 bei der EUBCE 2023: BLANK M., OBERNBERGER I., 2023: Novel Packed-bed CFD Model for Pellet Combustion: Validation and Application to a Stove. In: Proceedings of the 31st European Biomass Conference and Exhibition, June 2023, Bologna, Italy, ISBN 978-88-89407-23-3, pp. 641-647, (paper DOI 10.5071/31stEUBCE2023-4CO.9.3), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy

Journal paper zu AP3: BLANK M., OBERNBERGER I., 2024: Novel Packed-bed CFD Model for Pellet Combustion: Validation and Application to a Stove. In: Biomass and Bioenergy 190, Volume 190, November 2024), 107362, Published by Elsevier Ltd. (paper DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107362>)

Veröffentlichungen mit Daten aus FuturePelletSpec 1:

MACK, R., C. SCHÖN, D. KUPTZ, H. HARTMANN, T. BRUNNER, I. OBERNBERGER und H.M. BEHR. Influence of pellet length, content of fines, and moisture content on emission behavior of wood pellets in a residential pellet stove and pellet boiler [online]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, 232(5 May), 384. ISSN 2190-6815. Verfügbar unter: doi:10.1007/s13399-022-03302-6

MACK, R., C. SCHÖN, D. KUPTZ, H. HARTMANN, T. BRUNNER, I. OBERNBERGER und H.M. BEHR. Influence of wood species and additives on emission behavior of wood pellets in a residential pellet stove and a boiler [online]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(17), 20241-20260. ISSN 2190-6815. Verfügbar unter: doi:10.1007/s13399-023-04204-x

MACK, R., C. SCHÖN, D. KUPTZ, H. HARTMANN, T. BRUNNER, I. OBERNBERGER und H.M. BEHR. Quality range of ENplus A1 certified wood pellets and their combustion behavior in residential pellet stoves and pellet boilers [online]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 5(1). ISSN 2190-6815. Verfügbar unter: doi:10.1007/s13399-024-06346-y

Geplante Veröffentlichungen:

Ausführlicher Bericht in der TFZ-Schriftenreihe (2026)

Vortrag auf der CEBC in Graz zu den Ergebnissen aus AP2 und AP4, Abstract eingereicht (2026)

Vortrag auf der europäischen Pelletskonferenz in Wels, Abstract eingereicht (2026)

Journal Papers zu Daten aus AP2 und AP4

ANHANG

Teilvorhaben 1: Brennstoffcharakteristik und Abbrandmodellierung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Erweiterung des bereits erlangten Grundlagenwissens bzgl. einzelner Aspekte der Holzpelletcharakterisierung, die in Teil 1 nicht zufriedenstellend genau untersucht werden konnten.

Prüfung und Bewertung der Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis (Ermittlung des erreichbaren Anlagenoptimierungspotenzials).

Entwicklung neuer praxisorientierter Charakterisierungsmethoden (idealerweise als Schnellbestimmungsmethode) für Holzpellets.

Erarbeitung neuer Richtlinien zur Brennstoffcharakterisierung und darauf aufbauende Normungs- und Öffentlichkeitsarbeit.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket AP1: Projektmanagement

Die Projektkoordination durch das TFZ in Arbeitspaket 1 umfasste die Planung und Durchführung von 6 Projekttreffen (5 vor Ort, 1 digital), die Koordination bilateralen Besprechungen und Arbeitskreistreffen (16 digital) sowie die Abstimmung mit den Praxispartnern und der FNR. Außerdem umfasst AP1 die Erstellung der Zwischenberichte und des Abschlussbericht sowie die Abrechnungen der Kosten der Unterauftragnehmer. Hierdurch wurden die unterschiedlichen Kompetenzen der einzelnen Projektpartner optimal miteinander verzahnt und eine effiziente und lösungsorientierte Arbeitsweise garantiert. AP 1 ist dabei als unterstützendes Arbeitspaket zu sehen, in dem keine konkreten Versuchsergebnisse anfielen.

Arbeitspaket AP2: Pellet Brennstoffcharakterisierung

AP2 hat wichtige Erkenntnisse zur Charakterisierung von Holzpellets geliefert, die für die Entwicklung emissionsarmer Pelletöfen von Bedeutung sind. Es wurden neue Methoden zur Brennstoffanalyse entwickelt, jedoch sind weitere Optimierungen erforderlich, um die Vorhersagegenauigkeit und die Charakterisierungsmethoden zu verbessern.

Arbeitspaket AP4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen

Die Testläufe in AP4 zeigen deutlich, dass marktverfügbare Pelletöfen – insbesondere solche ohne automatische Brennstoffregelung – empfindlich auf Schwankungen in der Pelletqualität reagieren. Dies führt in der Praxis häufig zu erhöhten Emissionen und ineffizientem Betrieb, insbesondere bei Teillast oder realitätsnahen Lastwechseln. Auch der Preis eines Geräts ist kein verlässlicher Indikator für niedrige Emissionen.

Außerdem belegen die Ergebnisse, dass eine konsequente Weiterentwicklung der Ofentechnologie – insbesondere die Einführung automatischer Brennstoffregelung und moderner Luftführung – notwendig ist, um die Emissionen von Pelletöfen nachhaltig zu senken und die Brennstoffflexibilität zu erhöhen. Die Prototypen des Projekts setzen hier neue Maßstäbe und zeigen, dass extrem niedrige Emissionen und hohe Effizienz auch unter Praxisbedingungen erreichbar sind. Für die Marktpraxis und künftige Normung sollte die automatische Brennstoffregelung als Standard etabliert werden, um die Umwelt- und Klimaschutzziele im Bereich der Biomassefeuerungen zu erreichen.

Arbeitspaket AP5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung

AP5 hat maßgeblich dazu beigetragen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts in konkrete, praxisrelevante Handlungsempfehlungen und Normungsvorschläge zu überführen. Die entwickelten Empfehlungen zur Brennstoffcharakterisierung und zum Ofendesign bieten Herstellern und Anwendern klare Orientierungspunkte für emissionsarmen und effizienten Betrieb. Die aktive Einbringung der Ergebnisse in Normungsgremien und die breite Veröffentlichung sichern die nachhaltige Wirkung des Projekts. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Emissionsminderung und zur Weiterentwicklung des Marktes für Pelletöfen und -brennstoffe geleistet.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Teilvorhaben 1 hat entscheidende neue Erkenntnisse zu bislang wenig beachteten Brennstoffparametern und deren Einfluss auf das Emissionsverhalten von Pelletöfen geliefert. Es wurden praxistaugliche Methoden zur

schnellen Brennstoffcharakterisierung entwickelt und ein innovatives Abbrandmodell bereitgestellt, dass die Basis für die Entwicklung emissionsarmer, brennstoffflexibler Pelletöfen bildet. Die Ergebnisse sind für die Normung, die Geräteentwicklung und die Qualitätssicherung von hoher Relevanz.

Teilvorhaben 2: Realisierung der Ofenentwicklung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Erstmalige Praxisanwendung des neu entwickelten Brennstoffbettabbrandmodells samt Kopplung mit einem Gasphasenverbrennungsmodell im Zuge der Entwicklung einer besonders emissionsarmen und bzgl. Pelletqualität flexiblen und hocheffizienten Pelletkaminofen-technologie, der Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofentechnologie (LEFLEX-PKo).

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 3: Entwicklung eines neuen Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofens auf Basis der Nutzung des neuen Brennstoffbettabbrandmodells,

Arbeitspaket 4: Testläufe an Versuchsanlagen und Prototypen

Die Feuerungsversuche belegen, dass eine konsequente Weiterentwicklung der Ofentechnologie – insbesondere die Einführung automatischer Brennstoffregelung und moderner Luftführung – notwendig ist, um die Emissionen von Pelletöfen nachhaltig zu senken und die Brennstoffflexibilität zu erhöhen. Die Prototypen des Projekts setzen hier neue Maßstäbe und zeigen, dass extrem niedrige Emissionen und hohe Effizienz auch unter praxisnahen Bedingungen („beReal-Lastzyklus“) erreichbar sind. Für die Marktpraxis und künftige Normung sollte die automatische Brennstoffregelung als Standard etabliert werden, um die Umwelt- und Klimaschutzziele im Bereich der Biomassefeuerungen zu erreichen.

Arbeitspaket 5: Erstellung von Richtlinien und Ergebnisverbreitung

AP5 hat maßgeblich dazu beigetragen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts in konkrete, praxisrelevante Handlungsempfehlungen und Normungsvorschläge zu überführen. Die entwickelten Empfehlungen zur Brennstoffcharakterisierung und zum Ofendesign bieten Herstellern und Anwendern klare Orientierungspunkte für emissionsarmen und effizienten Betrieb. Die aktive Einbringung der Ergebnisse in Normungsgremien und die breite Veröffentlichung sichern die nachhaltige Wirkung des Projekts. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Emissionsminderung und zur Weiterentwicklung des Marktes für Pelletöfen und -brennstoffe geleistet.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

In Teilvorhaben 2 konnte das entwickelte Abbrandmodell erfolgreich in einer Ofenentwicklung angewendet werden. Der neu entwickelte Low-Emission Flexi-Pellet-Kaminofen (LEFLEX-PKo) erreichte bei Nennlast extrem niedrige Emissionen und eine Effizienz von über 94 %. Auch bei Teillast und im beReal-Test lagen die Werte deutlich unter den Grenzwerten. Durch CFD-gestützte Optimierungen der Luftführung und Regelungssysteme konnten die Emissionen um bis zu 95 % im Vergleich zu marktüblichen Geräten reduziert werden. Automatische Brennstoffregelung und verbesserte Luftstufung sorgten für stabile Betriebsbedingungen und hohe Brennstoffflexibilität, auch bei variierenden Pelletlängen.

Literatur

- [1] Mack, R.; Schön, C.; Kuptz, D. et al.: Quality range of ENplus A1 certified wood pellets and their combustion behavior in residential pellet stoves and pellet boilers. *In: Biomass Conversion and Biorefinery* 5 (2024), Heft 1. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06346-y>.
- [2] Mack, R.; Schön, C.; Kuptz, D. et al.: Influence of wood species and additives on emission behavior of wood pellets in a residential pellet stove and a boiler. *In: Biomass Conversion and Biorefinery* 14 (2024), Heft 17, S. 20241-20260. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04204-x>.
- [3] Mack, R.; Schön, C.; Kuptz, D. et al.: Influence of pellet length, content of fines, and moisture content on emission behavior of wood pellets in a residential pellet stove and pellet boiler. *In: Biomass Conversion and Biorefinery* 232 (2022), 5 May, S. 384. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03302-6>.
- [4] Robert Mack, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann, Thomas Brunner, Ingwald Obernberger: Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln. *In: : Berichte aus dem TFZ*.
- [5] Blank, M.; Obernberger, I.: Novel packed-bed CFD model for pellet combustion – Validation and application to a stove. *In: Biomass and Bioenergy* 190 (2024), S. 107362. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107362>.
- [6] Sommersacher, P.; Brunner, T.; Obernberger, I.: Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. *In: Energy Fuels* 26 (2012), Heft 1, S. 380-390. <https://doi.org/10.1021/ef201282y>.
- [7] Knudsen, J.N.; Jensen, P.A.; Dam-Johansen, K.: Transformation and Release to the Gas Phase of Cl, K, and S during Combustion of Annual Biomass. *In: Energy Fuels* 18 (2004), Heft 5, S. 1385-1399. <https://doi.org/10.1021/ef049944q>.
- [8] Steenari, B.-M.; Lundberg, A.; Pettersson, H. et al.: Investigation of Ash Sintering during Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives. *In: Energy Fuels* 23 (2009), Heft 11, S. 5655-5662. <https://doi.org/10.1021/ef900471u>.
- [9] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 5370, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Feinanteils in Pellets (ISO 5370:2023) – = Solid biofuels - determination of fines content in pellets (ISO 5370:2023). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, DIN Media GmbH, Berlin, 2025.
- [10] 18847: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikeldichte von Pellets und Briketts (ISO 18847:2024); Deutsche Fassung EN ISO 18847:2024. DIN EN ISO, Ausgabe 2024.
- [11] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 17225-2, Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 2, Klassifizierung von Holzpellets (ISO 17225-2:2021) – = Solid biofuels - fuel specifications and classes. Part 2, Graded wood pellets (ISO 17225-2:2021). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.
- [12] Bioenergy Europe; Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI): ENplus-Holzpellets – Anforderungen an Unternehmen. ENplus ST 1001: 2022. Bioenergy Europe; Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI, Berlin, ENplus ST 1001: 2022 Ausgabe 2022.
- [13] Mancini, M.; Toscano, G.; Rinnan, Å.: Study of the scattering effects on NIR data for the prediction of ash content using EMSC correction factors. *In: Journal of Chemometrics* 33 (2019), Heft 4, e3111, 1-10. <https://doi.org/10.1002/cem.3111>.
- [14] Toscano, G.; Rinnan, Å.; Pizzi, A. et al.: 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. *In: Energy Fuels* 31 (2017), Heft 3, S. 2814-2821. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02421>.
- [15] Toscano, G.; Pizzi, A.; Mancini, M.: Activities of the Biomass Lab and first results of IR analysis. Università Politecnica delle Marche, Biomass Lab – Department D3A, Ancona, Italy Ausgabe 2016.
- [16] Mancini, M.; Taavitsainen, V.-M.; Toscano, G.: Comparison of three different classification methods performance for the determination of biofuel quality by means of NIR spectroscopy. *In: Journal of Chemometrics* 26 (2019), Heft 4, S. 1-11. <https://doi.org/10.1002/cem.3145>.
- [17] Duca, D.; Pizzi, A.; Mancini, M. et al.: Fast measurement by infrared spectroscopy as support to woody biofuels quality determination. *In: Journal of Agricultural Engineering* 47 (2016), Heft 1, S. 17. <https://doi.org/10.4081/jae.2016.499>.
- [18] Toscano, G.; Pizzi, A.; Mengarelli, C. et al.: Fast quality determination of the most common solid biofuels employed in Italian biomass power plants by means of NIRS. *In: Persson, M.; Scarlat, N.; Grassi, A. et al. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy – Papers of the 26th European Biomass Conference - Extracted from the Proceedings of the International Conference. ETA-Florence Renewable Energies; WIP Renewable Energies, Copenhagen, Denmark, 2018, S. 326-332.*
- [19] Duca, D.; Pizzi, A.; Rossini, G. et al.: Prediction of Hardwood and Softwood Contents in Blends of Wood Powders Using Mid-Infrared Spectroscopy. *In: Energy Fuels* 30 (2016), Heft 4, S. 3038-3044. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02994>.
- [20] Mancini, M.; Mircoli, A.; Potena, D. et al.: Prediction of pellet quality through machine learning techniques and near-infrared spectroscopy – Preprint. *In: Computers & Industrial Engineering* 147 (2020), 9 (September), 106566, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106566>.
- [21] Semella, S.; Zeng, T.; Mühlenberg, J. et al.: Online characterization of solid biofuels via pocket sized and low-cost near-infrared devices during small-scale boiler operation: Model development, evaluation

- and application tests. *In: Biomass and Bioenergy* 180 (2024), S. 106978.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106978>.
- [22] *Semella, S.; Hutengs, C.; Seidel, M. et al.*: Accuracy and Reproducibility of Laboratory Diffuse Reflectance Measurements with Portable VNIR and MIR Spectrometers for Predictive Soil Organic Carbon Modeling. *In: Sensors* (Basel, Switzerland), Vol. 22 (2022), Iss. 7.
<https://doi.org/10.3390/s22072749>.
- [23] *Kuptz, D.; Dietz, E.; Kuchler, C. et al.*: Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Verringerung der mineralischen Verschmutzung und zur Verbesserung der Verbrennung von Holzbrennstoffen – (Quasi-Holz, Förderkennzeichen KS/17/03). Abschlussbericht Dezember 2020. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Straubing Ausgabe 2020.
- [24] *Lesche, S.; Kuptz, D.; Nebel, F. et al.*: Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex-Schneckenhacker – BMEL-Förderkennzeichen 22016717 und 22023217, Projektlaufzeit: 01.10.2018 - 31.03.2022. In Kooperation mit der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (HFR), Berichte aus dem TFZ Heft 82, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, 2023.
- [25] *Brunner, T.; Oberberger, I.; Borman, C. et al.*: ERA-NET Bioenergy - BIOFLEX – FINAL REPORT, Official project duration: January 2016 - March 2019. May 2019. BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz Ausgabe 2019.
- [26] *Felix Endriss, Daniel Kuptz, Stefan Brauer, Alexander Braun, Hans Hartmann, Harald Thorwarth*: Evaluierung von Schnellmesstechnik zur Brennstoffanalytik in Holz-(Heiz-) Kraftwerken. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg; Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe Straubing, Rothenburg a. Neckar Ausgabe 2023.
- [27] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN ISO 17829, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets (ISO/DIS 17829:2024) – = Solid biofuels - determination of length and diameter of pellets (ISO/DIS 17829:2024). Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, DIN Media GmbH, Berlin, 2024.
- [28] 17829: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets (ISO 17829:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17829:2015, März 2016. DIN EN ISO, Ausgabe 2016.
- [29] *Schön, C.; Feldmeier, S.; Hartmann, H. et al.*: New Experimental Evaluation Strategies Regarding Slag Prediction of Solid Biofuels in Pellet Boilers. *In: Energy & Fuels* 33 (2019), Heft 10, S. 11985-11995.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03098>.
- [30] *Kaltschmitt, M.; Stampfer, K.*: Energie aus Biomasse. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2024.
- [31] 2330 Blatt 2: Schneckenförderer für Schüttgut - Auslegung von horizontalen und leicht geneigten Schneckenförderern, September 2013. VDI-Richtlinie, Ausgabe 2013.
- [32] *Tan, Y.*: Semi-empirische und simulationsgestützte Optimierung von Dosierschnecken für Biomassebrennstoffe. München, Universitätsbibliothek der TU München, Dissertation, 2022.
- [33] Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut, Forschungsbericht / fml, Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik. Technische Universität München, Utz Wiss, München, 2002.
- [34] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 16510-1, Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe. Teil 1, Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren – = Residential solid fuel burning appliances. Part 1, General requirements and test methods. Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2023.
- [35] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 16510-2-6, Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe. Teil 2-6, Mechanisch mit Holzpellets beschickte Raumheizer, Einsätze und Herde – = Residential solid fuel burning appliances. Part 2-6, Mechanically by wood pellets fed roomheaters, inset appliances and cookers. Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2023.
- [36] *Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz*: 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. 10.3.2017 | 420, Berlin Ausgabe 2017.
- [37] Berichte aus dem TFZ.

Empfehlungen zur Entwicklung emissionsarmer und brennstoffflexibler Pelletöfen

Autoren:

Prof. Dr. Ingwald Obernberger, Dr. Thomas Brunner
BIOS - Bioenergiesysteme GmbH



Dr. Volker Schulte
Olsberg GmbH



Robert Mack, Dr. Hans Hartmann
Technologie- und Förderzentrum, im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Hans Martin Behr
Holz-Energie-Zentrum Olsberg GmbH



Kevin Nätebusch
Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)



Haftungsausschluss:

Die präsentierten Empfehlungen sind Ergebnis eines wissenschaftlichen Projekts. Die Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse liegen im Ermessen jeder einzelnen Person oder jedes Unternehmens. Die Autoren übernehmen keine Haftung für die Nutzung und Umsetzung der Forschungsarbeit und der Forschungsergebnisse sowie für die Folgen der daraus resultierenden technologischen Entwicklung oder Anlagenbetrieb.

1. Ziel und Anwendungsbereich

Diese Empfehlung soll Entwickler und Hersteller von Pelletöfen bei der Konzeption besonders emissionsarmer und innerhalb der Schwankungsbreiten der Brennstoffparameter von ENplus A1-Pellets flexibler Pelletöfen unterstützen. Dies soll ausschließlich durch die Anwendung von Primärmaßnahmen (Optimierung des Verbrennungskonzeptes und der Ofenregelung) und somit ohne Anwendung von Staubabscheidern oder Katalysatoren erfolgen.

2. Definitionen und Abkürzungen

- **Primärluft:** Verbrennungsluft die durch den Rost dem Brennstoffbett zugeführt wird.
- **Rezirkuliertes Rauchgas (Rezi):** Rauchgas, das nach Ofenaustritt vom Hauptrauchgasstrom abgezweigt und in die Brennkammer rezirkuliert wird.
- **Sekundärluft:** Verbrennungsluft, die oberhalb des Brennstoffbettes in den Brenner eingebracht wird.
- **Scheibenspülluft:** Luft, die entlang der Scheibe in der Brennkammertür strömt und dazu dient, die Scheibe frei von Ablagerungen zu halten.

3. Ausgeprägte und effiziente Luftstufung - die Basis für eine besonders emissionsarme Verbrennung

Moderne Pelletöfen bauen heutzutage allgemein auf einer **gestuften Verbrennung** auf. Das heißt, dass der Brennstoff auf einem Verbrennungsrost aufgebracht wird und dort in einem ersten Schritt unter Einsatz von Primärluft brennbare gasförmige Komponenten aus dem Brennstoff freigesetzt und die zurückbleibende Holzkohle verbrannt wird. Oberhalb des Brennstoffbettes werden die brennbaren gasförmigen Komponenten dann durch Eindüsung von Sekundärluft möglichst vollständig verbrannt. Zudem wird üblicherweise Scheibenspülluft eingesetzt, die entlang des Sichtfensters in der Regel von oben nach unten strömt, sich oberhalb des Pelletbrenners in den Rauchgasstrom einmischt und somit zusätzliche Sekundärluftwirkung hat. Bei manchen Öfen wird auf die separate Einbringung von Sekundärluft verzichtet und nur die Scheibenspülluft zur Verbrennung der aus dem Brennstoffbett austretenden Gase eingesetzt. Das beschriebene Verbrennungskonzept (siehe Abbildung 1) bildet auch die Basis für die in dieser Empfehlung vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen.

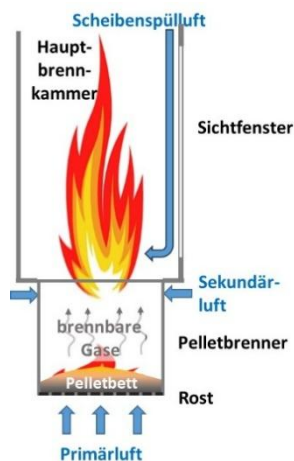


Abbildung 1: Schematische Darstellung der gestuften Verbrennung

3.1 Verbrennungsrost und Brennstoffbett

Eine **ruhige Brennstoffbettführung** bildet die Basis für eine emissionsarme Verbrennung. Wesentlich ist, dass der Verbrennungsrost zu jeder Zeit ausreichend und vor allem vollständig mit Pellets bedeckt ist und dass die Primärluft gleichmäßig (am besten über Öffnungen im Rost) aufgegeben wird. Dies sorgt für eine gleichmäßige Durchströmung des Brennstoffbettes mit Primärluft und damit zu einer gleichmäßigen Umsetzung des Brennstoffes. Außerdem wird das Aufwirbeln von Brennstoff-, Holzkohle- und Aschenpartikeln minimiert, die sonst mit den Rauchgasen aus dem Brennstoffbett ausgetragen und zu Aschenablagerungen im Wärmetauscher sowie zu Staubemissionen führen würden.

Zündluft, die z.B. über elektrische Heizelemente angesaugt und im unteren Teil des Brennstoffbettes zugeführt wird, ist ebenfalls der Primärluft zuzuordnen. Während des stationären Betriebs wirkt sich der punktuelle Lufteintrag über das Zündelement in Form lokal verstärkter Brennstoffumsetzung aus und führt zur Strahlenbildung im Brennstoffbett. Das beeinträchtigt die Gleichmäßigkeit des Bettabbrandes und führt somit zu erhöhten Emissionen. Optimal wäre es, die Luftzufuhr über das Heizelement außerhalb der Zündungsphasen zu unterbinden. Da dies mit erhöhten Kosten (eigene automatisierte Ventile oder Klappen) verbunden und somit kaum realisierbar ist, wird empfohlen, die Zündluftöffnungen und damit den Zündlufteintrag am notwendigen Minimum auszulegen.

Die **richte Wahl des Primärluft-Verhältnisses** (Anteil der Primärluft an der gesamten zugeführten Verbrennungsluft) ist dabei wesentlich. Es sollte niedrig (<50%) sein, da eine geringe Primärluftmenge folgende positive Auswirkungen hat:

- niedrige Gasgeschwindigkeiten im Brennstoffbett → weniger Staubaustrag
- niedrigere Brennstoffbetttemperaturen, da weniger Sauerstoff zur Verfügung steht → geringere Verschlackungsneigung
- Bildung einer reduzierenden Atmosphäre (Luftmangel) oberhalb des Brennstoffbettes → positive Auswirkung auf die Minderung von NO_x-Emissionen, da in reduzierender Atmosphäre bei hohen Temperaturen N-haltige Verbindungen zum Teil in elementaren Stickstoff umgewandelt werden

Die Primärluft muss aber ausreichen, um die Holzkohle vollständig zu verbrennen und ein Pelletbett mit stabiler Höhe aufzubauen. Zur **zusätzlichen Kühlung** des Brennstoffbettes kann auch rezirkuliertes Rauchgas (*Rezi*), das gemeinsam mit der Primärluft zugeführt wird, eingesetzt werden.

Da es im Zuge einer experimentellen Entwicklung eines Pelletbrenners kaum möglich ist, relevante Größen wie Primärluft- und Zündluftstrom ausreichend genau zu messen und deren Einfluss auf das Brennstoffbett zu bewerten, wird empfohlen, CFD-Simulationen (CFD = Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungssimulation) im Zuge der Ofenentwicklung einzusetzen. Derartige Simulationen erlauben eine voroptimierte Konzeption des Brennstoffbettbereichs, erhöhen die Entwicklungssicherheit und beschleunigen den Entwicklungsprozess im Vergleich zu einer rein experimentellen Entwicklung deutlich.

3.2 Gasphasenausbrand - optimierte Sekundärlufteindüsung und optimiertes Brennkammerdesign

Im Pelletbrenner muss entsprechend Raum (Höhe) für die Ausbildung des Brennstoffbettes zur Verfügung stehen und es muss auf jedem Fall vermieden werden, dass das Brennstoffbett bis an den Rand der Sekundärluft-Eindüsung anwächst. Ein genügend großer Abstand zwischen dem Brennstoffbett und der Sekundärluft-Eindüsung

- vermeidet Rückströmungen der Sekundärluft und nicht gewollte Rückstrahlung auf das Brennstoffbett und
- schafft Volumen und Zeit für NO_x-Reduktionsreaktionen in der reduzierenden Atmosphäre über dem Brennstoffbett.

Die Sekundärluft sollte getrennt von der Scheibenspülluft zugeführt werden. Ihre Eindüsung sollte bereits vor dem Eintritt in die Hauptbrennkammer mit Sichtscheibe erfolgen, um sicherzustellen, dass Oxidationsreaktionen bei möglichst hohen Temperaturen ablaufen können. Das Sekundärluftverhältnis (Verhältnis der Summe aus Primär- und Sekundärluft zur Luftmenge, die für die vollständige Umsetzung des Brennstoffes notwendig ist) muss dabei bereits über 1 liegen, da sonst kein entsprechend hoher CO-Ausbrand erzielt werden kann.

Die **optimierte Eindüsung der Sekundärluft** ist dabei sehr wichtig und ist der Schlüssel für geringe Emissionen an CO, OGC und Rußpartikeln. Dazu ist eine optimierte Geometrie, Ausrichtung und Positionierung der Sekundärluft-Düsen relevant, da diese für eine gute Durchmischung der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen und somit für einen annähernd vollständigen Gasphasenausbrand bei geringem Luftüberschuss und damit hohem Wirkungsgrad sorgt.

Die **Brennkammer** sollte **gut isoliert** sein um ausreichend hohe Temperaturen für vollständigen Gasphasenausbrand zu gewährleisten und hinsichtlich ihrer Geometrie so dimensioniert werden, dass ausreichend hohe Verweilzeiten für vollständigen Gasphasenausbrand zur Verfügung stehen.

Diesbezügliche Entwicklungsschritte können zwar experimentell erfolgen, es wird aber auch hier der Einsatz von modernen **CFD-Simulationen** empfohlen, da so Optimierungsschritte effizienter gesetzt und voroptimierte Prototypenkonzepte rascher erarbeitet werden können.

Je besser die genannten Aspekte umgesetzt werden, umso weniger Verbrennungsluft ist für eine vollständige Verbrennung notwendig. Mit sinkendem Verbrennungsluftverhältnis λ bzw. O₂-Gehalt im Rauchgas steigen der thermische Wirkungsgrad der Verbrennung und auch die Verbrennungstemperatur, was den Ausbrand der Gase beschleunigt und auch den Wirkungsgrad des Pelletofens erhöht.

3.3 Scheibenspülluft

Ein ungehinderter Blick auf die Flamme ist eine wesentliche Kundenanforderung. Scheibenspülluft, die am Sichtfenster von oben nach unten entlang strömt, soll dabei als Barriere zwischen dem Rauchgas und der Scheibe dienen, und so Ablagerungen von Ruß, organischen Kohlenwasserstoffen und Staub verhindern. Der **Scheibenspülluft-Strom sollte aber so gering wie möglich** gehalten werden, da er zur Abkühlung der Brennkammer beiträgt und sich nicht so gut wie die über Düsen eingebrachte Sekundärluft in das Rauchgas einmischen lässt. Außerdem sollte die Scheibenluftansaugung entlang der Brennkammer erfolgen,

um eine möglichst gute Vorwärmung der Scheibenluft vor Eintritt in die Brennkammer sicherzustellen.

Mittels **CFD-Simulationen** kann eine Lösung erreicht werden, die eine möglichst gleichmäßige Scheibenluftverteilung über die gesamte Scheibenfläche sicherstellt, was für die Vermeidung von Verschmutzungen sehr wichtig ist.

4. Was bei der Umsetzung zu beachten ist

Eine gezielt optimierte und im realen Anlagenbetrieb auch entsprechend genau eingestellte Aufteilung der Primär-, Sekundär- und Scheibenspülluft-Ströme ist ein wesentlicher Faktor für eine effiziente und kontrollierte Umsetzung des Luftstufungsprinzips.

Falschluffströme können das Konzept deutlich in seiner Effizienz mindern da sie unkontrolliert an verschiedenen Positionen in den Ofen eintreten und so zu Verschiebungen bei den eingestellten Luftverhältnissen führen.

- **Falschluff über die Entaschungstüren** z.B. verfälscht das Primärluftverhältnis (da sie in den Raum unterhalb des Rostes eintritt). Dasselbe gilt für Falschluff, die über das Zündelement in das Brennstoffbett eingebracht wird.
- **Falschluff über die Brennstoffzufuhr oder über die Ofentür** hingegen mischt sich erst in der Brennkammer in die Rauchgase ein (Sekundärluftwirkung). Dies geschieht aber im Gegensatz zur Sekundärluft, die durch Düsen eingebracht wird, ohne wesentlichen Impuls (schlechte Mischung = schlechte Wirkung).
- **Falschluff im Wärmetauscherbereich** nimmt wegen der bereits niedrigen Rauchgastemperaturen nicht an der Verbrennung teil. Sie verdünnt das Rauchgas und erschwert das gezielte Einstellen der Luftstufung in der Brennkammer.

Eine entsprechend genaue Fertigung sowie geeignete Falschlufftests an Prototypen und Seriengeräten zur Identifikation und Beseitigung potenzieller Falschluffquellen sind daher unumgängliche Maßnahmen zur effizienten Implementierung von Luftstufungskonzepten. Der Falschluffeintrag sollte dabei zumindest unter 20 % der gesamten eingebrachten Verbrennungsluft liegen, idealerweise unter 10 %.

5. Maßnahmen zur Erhöhung der Brennstoffflexibilität und zur Sicherstellung einer geregelten Heizleistung

Auch ENplus A1-Pellets unterliegen innerhalb der Norm gewissen Schwankungen wesentlicher Brennstoffparameter. Diese können einerseits die Brennstoffzusammensetzung, speziell die Gehalte an aschebildenden Elementen (im wesentlichen Ca, K, Si, Mg) sowie den Gesamtaschegehalt im Brennstoff betreffen, was Auswirkungen auf die Versinterungs-/Verschlackungsneigung der Aschen hat. Hier sollen die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Brennstoffbettkühlung (niedriges Primärluftverhältnis und Rauchgasrezirkulation) entsprechende Flexibilität schaffen.

Andererseits haben auch physikalische Parameter wie die Pelletlänge einen signifikanten Einfluss auf das Abbrandverhalten. Ein rascherer Pelletabbrand wirkt sich dabei in Form einer höheren Ofenleistung und, wenn nicht darauf reagiert wird, in Form höherer Brennkammertemperaturen und niedrigerer Verbrennungsluftverhältnisse aus. Letztere führen zu erhöhten Emissionen. Daher ist es für einen brennstoffflexiblen Ofen unumgänglich, dass schwankende

Pelletqualitäten über Änderungen der Brennkammertemperatur erfasst und durch Modulation des Brennstoffzufuhr regelungstechnisch entsprechend kompensiert werden.

6. Empfohlene mess- und regeltechnische Ausrüstung

Die in dieser Empfehlung diesbezüglich beschriebenen Maßnahmen lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand in Pelletöfen umsetzen. Für die vorgeschlagene Leistungsregelung wird lediglich ein Brennkammertemperatursensor sowie eine stufenlos regelbare Pelletzufuhrschnecke benötigt.

Es wird empfohlen über Vorversuche mit verschiedenen Pelletsortimenten die Fördercharakteristik der Schnecke zu bestimmen, um so den Arbeitsbereich des Schneckenantriebs optimal auf die geforderte Schwankungsbreite des Brennstoffeinschubs abstimmen zu können. Über die Brennkammertemperatur kann eine entsprechende Zielleistung eingestellt werden. Das heißt, dass die Brennstoffzufuhr so angepasst wird, dass eine für die aktuelle Leistungsstufe des Ofens charakteristische Brennkammertemperatur gehalten werden kann. Dadurch wird ein "Überfahren" des Ofens, das zu deutlich erhöhten CO und Staubemissionen führt, vermieden.

Die Einstellung optimaler Luftverhältnisse im Brennstoffbett und in der Brennkammer kann über entsprechende Stellorgane in den Zuluftleitungen und die Messung des Brennkammerunterdrucks erfolgen. Die Drehzahl des Rauchgasventilators wird dabei so angepasst, dass ein lastabhängig vorgegebener Unterdruck eingehalten wird. Die Positionen der Stellorgane (z.B.: Klappen, Ventile, Schieber) zur Einstellung der gewünschten Luftstufungseinstellungen können im Zuge von Prototypentests beim Hersteller bestimmt und fest voreingestellt werden. So kann der kostspielige Einbau separater regelbarer Klappen für die einzelnen Zuluftströme vermieden und trotzdem die vorgesehene Luftstufung bei Nennlast und Teillast sichergestellt werden.

7. Schlussbemerkung

Die vorliegenden Empfehlungen zur Entwicklung emissionsarmer und Brennstoffflexibler Pelletöfen stellen einen praxisnahen Leitfaden dar. Sie berücksichtigt aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse und Erfahrungen aus umfangreichen Praxisuntersuchungen. Die konsequente Umsetzung dieser Empfehlungen trägt wesentlich zur Reduktion von Emissionen bei erhöhter Brennstoffflexibilität, zur Steigerung der Effizienz und zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs von neu entwickelten Pelletöfen bei.

Alle hier beschriebenen Punkte sind aus den Forschungsergebnissen der FNR-Projekte "FuturePelletSpec1" und "FuturePelletSpec 2" abgeleitet. Beide Projekte wurden vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat gefördert.



Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Bundesarbeitsstelle für
Landwirtschaft und Ernährung

Empfehlungen zur erweiterten Holzpellet-Charakterisierung für den Einsatz in Pelletöfen

Autoren:

Robert Mack, Dr. Hans Hartmann

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

Hans Martin Behr

Holz-Energie-Zentrum Olsberg GmbH

Kevin Nätebusch

Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)

Prof. Dr. Ingwald Obernberger, Dr. Thomas Brunner

BIOS - Bioenergiesysteme GmbH

Dr. Volker Schulte

Olsberg GmbH



DEPI DEUTSCHES
PELLETINSTITUT



Haftungsausschluss:

Die präsentierten Empfehlungen sind Ergebnis eines wissenschaftlichen Projekts. Die Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse liegen im Ermessen jeder einzelnen Person oder jedes Unternehmens. Die Autoren übernehmen keine Haftung für die Nutzung und Umsetzung der Forschungsarbeit und der Forschungsergebnisse sowie für die Folgen der daraus resultierenden technologischen Entwicklung oder Anlagenbetrieb.

1. Ziel und Anwendungsbereich

Diese Empfehlungen definieren Anforderungen und Prüfmethode zur erweiterten Charakterisierung von Holzpellets, die speziell für den Einsatz in Pelletöfen (Einzelraumfeuerungen) vorgesehen sind. Ziel ist es, Brennstoffparameter zu identifizieren und zu bewerten, die über die bestehenden Normen hinaus einen signifikanten Einfluss auf Emissionen, Betriebssicherheit und Effizienz von Pelletöfen haben. Die Empfehlungen richten sich an Pelletproduzenten, Prüfinstitute, Gerätehersteller und Normungsgremien.

2. Erweiterte Brennstoffparameter und deren Bedeutung

Neben den in der DIN EN ISO 17225-2 und ENplus definierten Parametern (z. B. Wassergehalt, Aschegehalt, mechanische Festigkeit, Feinanteil, Heizwert, Durchmesser, Länge, Additive, Stickstoff, Schwefel, Chlor, Schwermetalle) sind weitere Parameter für den emissionsarmen und effizienten Betrieb von Pelletöfen relevant. Nachfolgend werden sowohl die zusätzlichen als auch die hinsichtlich der Emissionen besonders relevanten und bereits von der Norm abgedeckten Parameter erläutert:

- **Pelletlängenverteilung:**

Die Verteilung der Pelletlängen, insbesondere der Anteil sehr kurzer Pellets (< 10 mm), beeinflusst maßgeblich die Förderrate, die Gleichmäßigkeit der Brennstoffzufuhr und damit die Schadstoffemissionen von Pelletöfen. Ein hoher Anteil kurzer Pellets kann zu erhöhtem Feinanteil, ungleichmäßiger Dosierung und Emissionsspitzen führen.

- **Feinanteil (F < 3,15 mm und 3,15 – 5,6 mm) durch Pelletförderung:**

Der während der Förderung und Lagerung entstehende Feinanteil kann im Ofen zu Emissionspeaks und Betriebsstörungen führen. Die A1 Grenzwerte für Sackware nach ENplus sollten eingehalten werden; zusätzlich ist der durch die Fördertechnik erzeugte „feuerungstechnisch relevante“ Feinanteil zu berücksichtigen. Dieser lag in den Versuchen des Projekts FuturePellet-Spec 2 im Mittel über alle getesteten Sortimente und typische Schnecken bei 0,5 – 1,2 m-% (< 3,15 mm) und 0,2 - 1,0 m-% (3,15 – 5,6 mm) und entsteht zusätzlich zum regulären Feinanteil. Nach bisherigem Kenntnisstand scheint es für typische Schneckengeometrien bei Pellets mit einer mechanischen Festigkeit von > 98,5 % ausreichend, für den zusätzlichen Feinanteil durch Förderung einen festen Faktor von ca. 0,9 m-% (sowohl < 3,15 mm als auch 3,15 – 5,6 mm) anzusetzen. Dieser Wert ist vor allem für die Entwicklung neuer Öfen interessant.

- **Aschegehalt (A, d):**

Ein niedriger Aschegehalt ist für Pelletöfen besonders wichtig, da hohe Aschegehalte zu erhöhten Feinstaubemissionen, Versinterung und häufigeren Wartungsintervallen führen. Die Empfehlung eines maximalen Aschegehaltes von ≤ 0,5 m-% für Pelletöfen ist daher sinnvoll.

- **Wassergehalt (M, ar):**

Ein optimaler Wassergehalt von 5 bis 10 m-% verbessert die Verbrennung und reduziert Emissionen. Zu niedrige Werte (< 5 m-%) können zu erhöhten Emissionen führen.

- **Chemische Zusammensetzung (insbesondere K, Ca, Si):**

Der Gehalt an Kalium (K), Calcium (Ca) und Silizium (Si) sowie deren Verhältnis (Si/K, Ca/K) beeinflussen das Ascheschmelzverhalten und die

Feinstaubemissionen. Hohe Kaliumgehalte und niedrige Si/K- bzw. Ca/K-Verhältnisse erhöhen das Risiko von Versinterungen und hohen Feinstaubemissionen. Nach den aktuell vorliegenden Forschungsergebnissen, sind Kaliumgehalte von < 700 mg/kg für einen emissionsarmen Anlagenbetrieb zu empfehlen. Bei Si/K-Verhältnissen < 1 wurden keine messbaren Effekte auf das Ascheschmelzverhalten beobachtet. Liegt der Aschegehalt des Brennstoffs bei $\leq 0,5$ m-% werden hohe Kaliumgehalte größtenteils automatisch ausgeschlossen. Da zum aktuellen Zeitpunkt keine geeigneten Schnellbestimmungsverfahren für die Kaliumbestimmung vorliegen, sollte der Aschegehalt die maßgebliche Größe sein.

- **Stickstoffgehalt (N):**
Er bestimmt maßgeblich die NO_x -Emissionen. Für die Einhaltung strenger Grenzwerte (z. B. „5 Sterne“-Label Italien) sind niedrige Stickstoffgehalte ($\leq 0,1$ m-%) im Brennstoff erforderlich.
- **Mechanische Festigkeit (DU):**
Eine geringe Festigkeit $< 98,5\%$ erhöht den Feinanteil bei der Förderung und damit die Emissionen.
- **Schüttdichte:**
Als wichtigste Einflussgröße für die Energiedichte beeinflusst ein Wechsel in der Schüttdichte den Energieeintrag in die Feuerung. Bei unregelmäßigen und nur manuell anzupassenden Öfen kann das zu einer erheblichen Leistungsänderung (Überlast oder Nicht-Erreichung der Nennleistung) und bei Öfen ohne automatische Anpassung der Verbrennungsluft in der Folge zu Emissionsspitzen führen.

3. Schnellbestimmungsmethoden

Der Einsatz von NIR-Spektroskopie zur Schnellbestimmung von Wassergehalt und Heizwert ist schon heute gängige Praxis. Beim Kaliumgehalt und bei weiteren Parametern ist die Messgenauigkeit derzeit noch recht niedrig. Im Zuge des technischen Fortschritts im Bereich der künstlichen Intelligenz sind jedoch Verbesserungen zu erwarten. Die Modelle zur Auswertung der generierten Messdaten müssen teilweise noch weiterentwickelt und regelmäßig validiert werden.

Fotooptische Verfahren zur Bestimmung der Pelletlängenverteilung ermöglichen eine schnelle Bestimmung der Längen, müssen aber regelmäßig mit der Referenzmethode abgeglichen werden.

Zur Vorhersage des Ascheschmelzverhaltens hat sich der sogenannte [Rapid-Slag-Test](#) als am vielversprechendsten herausgestellt. Für eine quantitative Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens muss dieser jedoch noch leicht angepasst und validiert werden.

4. Empfohlene Anforderungen an Holzpellets für Einzelraumfeuerungen

Pellets, die explizit für Einzelraumfeuerungen (Pelletöfen) angeboten werden, sollten nach den Ergebnissen der Forschungsprojekte folgende Mindestanforderungen erfüllen, um in Bestandsanlagen möglichst niedrige Emissionen und einen effizienten Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

- **Aschegehalt:** $\leq 0,5$ m-%
- **Wassergehalt:** 5 – 10 m-%
- **Längensklasse:** Klasse¹ M oder L (Klasse S ist für Pelletöfen nicht geeignet)
- **Feinanteil:** $\leq 0,5$ m-% (Sackware)
- **Mechanische Festigkeit:** $\geq 98,5\%$
- **Stickstoffgehalt:** möglichst niedrig

Auf zusätzliche Vorgaben bei der Schüttdichte kann verzichtet werden, wenn die Anforderungen bei der Längensklasse eingehalten werden und somit Schwankungen in der Energiedichte niedrig bleiben.

Eine entsprechende Kennzeichnung („Besonders geeignet für Pelletöfen“) sollte auf der Verpackung und im Datenblatt erfolgen.

5. Hinweise zur Anwendung und Weiterentwicklung

Die Empfehlung ist als Ergänzung zu bestehenden Normen zu verstehen und sollte regelmäßig an neue wissenschaftliche Erkenntnisse angepasst werden.

Die Anwendung der Empfehlung ist insbesondere für die Entwicklung neuer Pelletöfen, für die Qualitätssicherung bei Pelletproduzenten sowie für die Beratung von Endkunden sinnvoll.

6. Literatur und Quellen

DIN EN ISO 17225-2:2021, EN*plus*-Handbuch, DIN EN ISO 17829:2024-10, DIN EN ISO 5370:2023, DIN EN ISO 18122, DIN EN ISO 18134-1/2, DIN EN ISO 16967/16968, DIN EN ISO 17831-1, ISO 16948, FuturePelletSpec2 Schlussbericht, TFZ 2025

¹ Anteil Pellets < 10 mm Länge:
Klasse S > 30 %,
Klasse M: ≥ 20 % bis ≤ 30 %,
Klasse L < 20 %

7. Schlussbemerkung

Die vorliegenden Empfehlungen zur erweiterten Holzpellet-Charakterisierung stellen einen praxisnahen Leitfaden für die Herstellung, Prüfung und Auswahl von Holzpellets für den Einsatz in Pelletöfen dar. Sie berücksichtigt aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse und Erfahrungen aus umfangreichen Praxisuntersuchungen. Die konsequente Umsetzung dieser Empfehlungen trägt wesentlich zur Reduktion von Emissionen, zur Steigerung der Effizienz und zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs von Pelletöfen bei.

Alle hier beschriebenen Punkte sind aus den Forschungsergebnissen der FNR-Projekte "FuturePelletSpec1" und "FuturePelletSpec 2" abgeleitet. Beide Projekte wurden vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat gefördert.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger

