

# Schlussbericht

## zum Verbundvorhaben

Thema:

**Optimierung der Emissionen von Holzhackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen durch geeignete Brennstoffauswahl und Verbrennungsführung (OptiChip)**

Zuwendungsempfänger:

**HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst  
Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement  
Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec)**

und

**Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Hochschule  
Braunschweig/Wolfenbüttel, Fakultät Versorgungstechnik**

Autoren:

**Dr. Volker Zelinski<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Achim Loewen<sup>1</sup>, Torge Schumacher<sup>3</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. Benno Lendt<sup>3</sup>, Michael Kralemann<sup>2</sup>, Dr. Daniel Kuptz<sup>4</sup>,  
Robert Mack<sup>4</sup>, Claudia Schön<sup>4</sup>, Dr. Hans Hartmann<sup>4</sup>**

Förderkennzeichen:

**22018114 (TV1) und 22008015 (TV2)**

Laufzeit:

**01.05.2015 bis 30.08.2016**

Datum der Veröffentlichung:

**März 2017**

Weitere Projektpartner:



Domäne  
Schladen-  
Achim



Niedersachsen • Netzwerk  
Nachwachsende Rohstoffe  
3N Dienstleistungen GmbH



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Verbundvorhaben „Optimierung der Emissionen von Holzhackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen durch geeignete Brennstoffauswahl und Verbrennungsführung (OptiChip)“ umfasst folgende Teilvorhaben:

Teilvorhaben 1: Theoretische und methodologische Entwicklung und Untersuchungen

Teilvorhaben 2: Experimentelle Unterstützung und Verbrennungsuntersuchungen

An der Bearbeitung des Projektes beteiligte Institutionen:

- 1 HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/  
Holzminden/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement,  
Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec)  
(Projektleitung TV 1 und Koordination des Verbundvorhabens)
- 2 3N Dienstleistungen GmbH
- 3 Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Hochschule Braun-  
schweig/Wolfenbüttel, Fakultät Versorgungstechnik (Projektleitung TV 1)
- 4 Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe  
(TFZ)
- 5 Domäne Achim Schladen (Praxispartner)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMELV für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	8
1.1	Hintergrund/Gesetzliche und technische Rahmenbedingungen .....	8
1.2	Ziele des Projektes .....	8
1.3	Stand der Wissenschaft und Technik .....	9
1.4	Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes .....	10
2	Material und Methoden .....	12
2.1	Brennstoffauswahl und –beschaffung .....	12
2.1.1	Beschaffung marktverfügbarer Qualitätshackschnitzel.....	12
2.1.2	Herstellung von Brennstoffen mit definiertem Feingutanteil .....	13
2.2	Brennstoffcharakterisierung .....	14
2.2.1	Probenahme und Probenvorbereitung.....	14
2.2.2	Wassergehalt .....	15
2.2.3	Aschegehalt .....	15
2.2.4	Partikelgrößenverteilung .....	15
2.2.5	Schüttdichte .....	17
2.2.6	Heizwert .....	17
2.2.7	Stickstoffgehalt.....	18
2.2.8	Chlor- und Schwefelgehalt.....	18
2.2.9	Gehalt an Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Zink.....	18
2.2.10	Gehalt an Silizium .....	18
2.2.11	Gehalt an Cadmium, Blei .....	18
2.3	Hackschnitzel-Kleinfeuerungen für Feuerungsversuche .....	18
2.3.1	50 kW-Anlage mit Einschubfeuerung und Kipprost .....	19
2.3.2	75 kW-Anlage mit Einschubfeuerung und Treppenrost .....	20
2.4	Feuerungsversuche und Emissionsmessungen .....	27
2.4.1	Aufbau der 50 kW-Versuchsanlage .....	27
2.4.2	Aufbau der 75 kW-Praxisanlage .....	31
2.5	Optimierung der Verbrennungsführung bezüglich der Emissionen .....	34
2.5.1	Optimierung der Verbrennungsführung an der 50 kW Kipprostfeuerung .....	34
2.5.2	Optimierung der Verbrennungsführung der 75kW-Praxisanlage mit Treppenrost .....	35

3	Verbrennungstechnische und chemisch-physikalische Brennstoffcharakterisierung .....	36
3.1	Chemisch-physikalische Charakterisierung der Brennstoffe im Überblick.....	36
3.2	Streuung einzelner Parameter zwischen Einzelproben aus einer Brennstoffcharge .....	38
3.3	Klassifikation der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-4 im Vergleich.....	39
3.4	Veränderung der Brennstoff-Wassergehalte über die Dauer der Versuchsperioden .....	44
3.5	Untersuchungen zum Gehalt an Aerosolbildnern .....	45
3.6	Charakterisierung der Brennstoff-Aschen .....	46
4	Emissionsmessungen und Leistungsermittlung.....	48
4.1	Optimierung der Verbrennungsführung bezüglich der Emissionen .....	48
4.1.1	Staubemissionen.....	48
4.1.2	Kohlenmonoxid-Emissionen.....	53
4.2	Emissionen aus Feuerungsversuchen mit verschiedenen Brennstoffen .....	57
4.2.1	Staubemissionen.....	57
4.2.2	Kohlenmonoxid- Emissionen.....	60
4.2.3	Einfluss des Feingutanteils auf Staub- und CO-Emissionen .....	62
4.2.4	Vergleich der CO-Emissionen im Teil- und Volllastbetrieb .....	65
4.2.5	NO <sub>x</sub> -Emissionen .....	65
4.2.6	Korrelation zwischen Aerosolbildnern im Brennstoff und Staubemissionen.....	67
4.2.7	Leistung .....	68
5	Fazit und Empfehlungen für den Betrieb von Hackschnitzel-Kleinfeuerungen ..	70
6	Darstellung und Verwertung der Ergebnisse .....	73
6.1	Zielgruppenorientierte Darstellung der Ergebnisse .....	73
6.2	Schornsteinfeger-Fachgespräch .....	73
6.3	Weitere Veröffentlichungen.....	74
	Zusammenfassung .....	75
	Literaturverzeichnis.....	77

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Brennstoff mit zugemischtem Feinanteil (B4a, P31S WG17,7% FG10%) in der Brennstoffzuführung für die 75 kW-Anlage .....	13
Abbildung 2:	Treppenrost (Draufsicht, Blickrichtung Brennstoffzufuhr) .....	22
Abbildung 3:	Schema der Brennstoffaufgabe .....	23
Abbildung 4:	Förderschnecke vom Brennstofflager in den Heizraum (links) und Detailansicht (rechts) .....	23
Abbildung 5:	Förderschnecke – Detailansicht bei geöffneter Wartungsklappe .....	25
Abbildung 6:	Halbmanuelle Brennstoffaufgabe (schwerkraftunterstützt) für Holzhackschnitzel B1 (P16S, WG13%) (links) und B4b (P31S, WG20,1%, FG15%) mit temporär auftretender Brückenbildung über der Förderschnecke (recht) ...	26
Abbildung 7:	Links: Entmischung des Brennstoffes durch hohen Feingutanteil (B6a, P45S, WG27,1%, FG10%) Rechts: Aufgabe von Brennstoff B7 (P45, WG20,6%, WRH) ...	27
Abbildung 8:	Schematischer Versuchsaufbau der Abgasmessstrecke für die 50 kW-Anlage, Skizze nicht maßstäblich .....	29
Abbildung 9:	Vorhandenes wärme gedämmtes Rauchrohr mit Zugbegrenzer (links); Neu eingepasstes Rauchrohr (ohne Wärmedämmung) mit Bohrungen für die Messsonden der Abgasanalytik (rechts) .....	31
Abbildung 10:	Probenahmestellen für Staub (Wöhler) und Testo (Staub, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> und CO) .....	32
Abbildung 11:	Schematischer Aufbau der Abgasanalytik an der 75 kW-Anlage .....	33
Abbildung 12:	Beladene Filterhülsen eines Feuerungsversuches (Teillast (unten), Volllast (oben), Kontrollhülsen (Links)) .....	34
Abbildung 13:	Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B1 (links) und B2 (rechts) .....	40
Abbildung 14:	Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B3 (links) und B4 (rechts) .....	40
Abbildung 15:	Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilcharge für 75 kW-Anlage, B4a (links) und B4b (rechts); Werte für 50 kW-Anlage nicht verfügbar .....	41
Abbildung 16:	Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B5 (links) und B5a (rechts) .....	41
Abbildung 17:	Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B6 (links) und B6a (rechts) .....	42
Abbildung 18:	Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B7 (Waldrestholz) .....	42
Abbildung 19:	Wassergehalte der verschiedenen Brennstoffe bei Anlieferung und zu den Versuchszeitpunkten an der 75 kW-Anlage .....	44
Abbildung 20:	Gehalte an Aerosolbildnern, Aschegehalte und deren relatives Verhältnis in den untersuchten Hackschnitzeln (sortiert nach steigendem Gehalt an Aerosolbildnern) .....	45

Abbildung 21	Gehalte an Nährstoffelementen in den Rostaschen aus 56 Feuerungsversuchen an der 75 kW-Anlage; Versuche chronologisch sortiert, 1. Phase Nr. 1-23 und 2. Phase Nr. 24-56) .....	46
Abbildung 22	Schwermetall-Gehalte in den Rostaschen aus 56 Feuerungsversuchen an der 75 kW-Anlage; Versuche chronologisch sortiert, 1. Phase Nr. 1-23 und 2. Phase Nr. 24-56) .....	47
Abbildung 23:	Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) bei Volllast.....	49
Abbildung 24:	Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>23</sub> %, FG <sub>3,2</sub> %) bei Volllast .....	49
Abbildung 25:	Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) bei Teillast .....	50
Abbildung 26:	Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>23</sub> %, FG <sub>3,2</sub> %) bei Teillast .....	50
Abbildung 27:	Vergleich der Staubemissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär-/ Sekundärluftverhältnis und veränderter Einstellung ( $\pm 1$ Stufe) bei Volllast: Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) (links) Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>23</sub> %, FG <sub>3,2</sub> %) (rechts).....	51
Abbildung 28:	Vergleich der Staubemissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär/ Sekundärluftverhältnis im Teillastbetrieb sowie veränderter Einstellung (Stufen +3, +1 und -1) für links: Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) rechts: Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>23</sub> %, FG <sub>3,2</sub> %) .....	52
Abbildung 29:	Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) bei Volllast .....	53
Abbildung 30:	Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) bei Teillast.....	54
Abbildung 31:	Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>23</sub> %, FG <sub>3,2</sub> %) bei Volllast .....	54
Abbildung 32:	Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas für Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>23</sub> %, FG <sub>3,2</sub> %) bei Teillast.....	55
Abbildung 33:	Vergleich der CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär-/ Sekundärluftverhältnis sowie veränderter Einstellung (Stufen +3, +1 und -1) für Brennstoff B <sub>3</sub> (P <sub>31</sub> S, WG <sub>7</sub> %, FG <sub>2,5</sub> %) im Voll- und Teillastbetrieb.....	56

Abbildung 34: Vergleich der CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär-/ Sekundärluftverhältnis sowie veränderter Einstellung ( $\pm 1$ Stufe) für Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31S</sub> , WG <sub>23%</sub> , FG <sub>3,2%</sub> ) im Voll- und Teillastbetrieb.....	56
Abbildung 35: Staubemissionen aller Brennstoffe an der 50 kW-Anlage bei Volllast.....	57
Abbildung 36: Staubemissionen aller Brennstoffe an der 75 kW-Anlage bei Volllast.....	58
Abbildung 37: Staubemissionen der 50 kW- und 75 kW-Anlage im Vergleich (nur Messungen mittels Wöhler-Messgerät) .....	59
Abbildung 38: Vergleich Staubemissionen ausgewählter Brennstoffe bei Voll- und Teillast an der 50 kW-Anlage.....	60
Abbildung 39: Emissionen von CO und organischen Kohlenwasserstoffen (OGC) aller Brennstoffe an der 50 kW-Anlage bei Volllast.....	60
Abbildung 40: Emissionen von CO und organischen Kohlenwasserstoffen (OGC) ausgewählter Brennstoffe im Teillast-Betrieb an der 50 kW-Anlage .....	61
Abbildung 41: CO-Emissionen aller Brennstoffe an der 75 kW-Anlage bei Volllast .....	61
Abbildung 42: Vergleich der CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage bei Voll- und Teillast.....	62
Abbildung 43: Partikelemissionen aus Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31S</sub> , WG <sub>23%</sub> , FG <sub>1,7%</sub> ) ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 50 kW-Anlage .....	62
Abbildung 44: Gasförmige Emissionen aus Brennstoff B <sub>4</sub> (P <sub>31S</sub> , WG <sub>23%</sub> , FG <sub>4%</sub> ) ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 50 kW-Anlage .....	63
Abbildung 45: Partikelemissionen der Brennstoffe B <sub>5</sub> und B <sub>6</sub> ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 75 kW-Anlage.....	64
Abbildung 46: CO-Emissionen der Brennstoffe B <sub>5</sub> und B <sub>6</sub> ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 75 kW-Anlage .....	64
Abbildung 47: CO-Emissionen ausgewählter Brennstoffe im Teil- und Volllast-Betrieb an der 50 kW-Anlage.....	65
Abbildung 48: Übersicht NO <sub>x</sub> -Emission aller Brennstoffe der 50 kW-Anlage bei optimierter Einstellung und Volllast .....	66
Abbildung 49: Übersicht NO <sub>x</sub> -Emission ausgewählter Brennstoffe der 50 kW-Anlage bei optimierter Einstellung und Teillast .....	66
Abbildung 50: NO <sub>x</sub> -Emissionen ausgewählter Brennstoffe der 75 kW-Anlage bei optimierter Einstellung und Volllast .....	67
Abbildung 51: Korrelation zwischen Aerosolbildnern im Brennstoff und Staubemissionen (Volllastbetrieb).....	67
Abbildung 52: Vergleich Feuerungs-/Kesselwärmeleistung bei Standardeinstellung und verändertem Primärluftanteil/O <sub>2</sub> -Gehalt bei Volllast an der 50kW-Anlage, Brennstoff B <sub>3</sub> .....	68
Abbildung 53: Vergleich von Feuerungs-/Kesselwirkungsgrad bei Standardeinstellung und verändertem Primärluftanteil/O <sub>2</sub> -Gehalt bei Volllast an der 50 kW-Anlage, Brennstoff B <sub>3</sub> .....	69

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Projektpartner und Aufgabenverteilung im Rahmen des Verbundprojektes .....	11
Tabelle 2:	Übersicht der in den Feuerungsversuchen des TV 2 eingesetzten Brennstoffe und Lastzustände während der Feuerungsversuche.....	12
Tabelle 3:	Klassifikationskriterien für die Partikelgrößenverteilung für Holzhackschnitzel gemäß DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-4 <sup>a)</sup> .....	16
Tabelle 4:	Klassifikationskriterien für den Feingutanteil von Holzhackschnitzeln gemäß DIN EN ISO 17225-1 .....	17
Tabelle 5:	Anlagentechnische Merkmale der 50 kW-Feuerungsanlage .....	20
Tabelle 6:	Kontinuierlich erfasste Messgrößen und eingesetzte Messgeräte .....	30
Tabelle 7:	Standardeinstellungen und Änderungen zur Optimierung der Kesselregelung.	35
Tabelle 8:	Charakterisierung der in den Feuerungsversuchen eingesetzten Brennstoffe, Teil 1: (Aschegehalt (AG), Wassergehalt (WG), Schüttdichte (BD), Partikelgrößenverteilung und Feingutanteil (P, F), Brenn- und Heizwert .....	37
Tabelle 9:	Charakterisierung der in den Feuerungsversuchen eingesetzten Brennstoffe, Teil 2: Gehalte der Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Silizium, (Si), Zink (Zn), Cadmium (Cd) und Blei (Pb) .....	38
Tabelle 10:	Untersuchung der Streuung einzelner Parameter innerhalb von Brennstoff-Chargen (B <sub>3</sub> und B <sub>4</sub> ) für folgende Parameter: Wasser- und Aschegehalt, Schüttdichte, Partikelgrößenklasse, Feingut-Klasse, Heizwert, Gehalte der Elemente Stickstoff (N), Kalium (K), Calcium (Ca).....	39
Tabelle 11:	Vergleich der Partikelgrößenklassen-Klassifikationen nach Deklaration und nach DIN EN ISO 17225 Teil1 bzw. Teil 4 sowie die Anteile der Hauptfraktion <sup>a)</sup> .....	43
Tabelle 12:	Schwermetallgehalte in Rostaschen aus Feuerungsversuchen an 75 kW-Anlage	47



## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund/Gesetzliche und technische Rahmenbedingungen

Vor dem Hintergrund des Klimawandels wurde die gesellschaftspolitische Zielsetzung entwickelt, einen zunehmenden Teil der Energieerzeugung von der Nutzung fossiler Brennstoffe hin zu regenerativen Energien zu verlagern. Das Hauptziel ist dabei, den durch steigende CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachten Klimawandel und seine Folgen durch Verringerung weiterer CO<sub>2</sub>-Emissionen für Mensch und Umwelt zu begrenzen.

Ein wichtiger Baustein in der Energieerzeugung aus regenerativen Quellen ist die Nutzung von Biomasse, insbesondere die Nutzung von Holz. Dabei spielt die Wärmeerzeugung in kleinen Verbrennungsanlagen eine bedeutende Rolle (Holzverbrauch zur energetischen Nutzung in priv. Haushalten 2010: 33,9 Mio FM (Mantau 2012)). Diese Form der Holznutzung hat eine Reihe von Vorteilen, u. a. die Energieerzeugung mit einem sehr hohen Wirkungsgrad sowie eine bedarfsgerechte Wärmebereitstellung durch die Lagerfähigkeit des Brennstoffes. Wird das Holz in Form von Hackschnitzeln eingesetzt, kommt auch der Aspekt der regionalen Wertschöpfung hinzu.

Ein Nachteil der Verbrennung von Holz ist die gegenüber Heizöl bzw. Erdgas deutlich höhere Emission von Staub. Eine Konsequenz der vermehrten Nutzung dieser Energiequelle war die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Kleinfeuerungsanlagen in der 1. BImSchV, wobei insbesondere der seit dem 01.01.2015 für Neuanlagen gültige Wert für Staub von 20 mg/m<sup>3N</sup> eine Herausforderung darstellt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, diesen Wert über Primärmaßnahmen, d. h. durch geeignete Brennstoffe und eine optimierte Verbrennungsführung, oder über Sekundärmaßnahmen, d. h. nachgeschaltete Filter, zu erreichen. Der Nachteil von Filteranlagen liegt in den erhöhten Investitions- und Betriebskosten, die die Wirtschaftlichkeit gefährden können. Um diesen Nachteil zu vermeiden, kann man versuchen, das Ziel mit Primärmaßnahmen zu erreichen. Für am Markt befindliche Anlagen heißt das in erster Linie eine optimale Abstimmung geeigneter Brennstoffe und einer entsprechenden Anlageneinstellung.

Anhand der für Niedersachsen durchgeführten Feuerstättenzählung wird die Größenordnung der Problematik deutlich. Allein für dieses Bundesland lag der Bestand an Holz hackschnitzel-Feuerungsanlagen Ende 2015 bei 4.053 Anlagen (60 % der Anlagen mit einer Leistung unter 50 kW) mit kontinuierlich steigender Tendenz. Die Zahl der Kleinanlagen unter 50 kW Leistung nahm dabei in den Jahren 2010 bis 2015 mit 9 – 19 % pro Jahr überproportional zu (3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2016).

### 1.2 Ziele des Projektes

Hauptziel des Projektes war die Optimierung der Verbrennungsführung von Kleinfeuerungsanlagen für unterschiedliche Brennstoffqualitäten mit dem Ziel der Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV für Kohlenmonoxid und Staub, die seit dem 01.01.2015 gültig sind, ohne zusätzliche Filteranlagen einzusetzen.

Im Einzelnen ergaben sich daraus folgende Zielsetzungen:

- Identifizierung geeigneter Holzhackschnitzelqualitäten für den Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen ohne zusätzliche Filteranlagen.
- Etablierung von Verbrennungseinstellungen, mit denen die Staub- und CO-Grenzwerte der 1. BImSchV unter Praxisbedingungen eingehalten werden.
- Erstellen von Empfehlungen für die Brennstoffauswahl sowie die Regelung der Feuerung zur Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV.

Aus den Zielsetzungen des Vorhabens ergaben sich folgende Arbeitsziele, die in zwei Teilvorhaben bearbeitet wurden, wobei deren genaue Zuordnung in Abschnitt III beschrieben wird:

- Auswahl geeigneter Holzhackschnitzelsortimente zur Untersuchung verschiedener Betriebszustände der Feuerungsanlagen
- Durchführung von Verbrennungsversuchen an ausgewählten Qualitäts-Holzhackschnitzelsortimenten mit der Optimierung der Betriebsparameter, abhängig von den Ergebnissen der Emissionsmessungen
- Messung der Emissionen bei Verbrennungsversuchen im Voll- und Teillastbetrieb
- Chemisch-physikalische Charakterisierung der eingesetzten Holzhackschnitzel sowie der Rostasche
- Korrelation der Ergebnisse der Emissionsmessungen mit den Betriebsparametern der Feuerung und den Eigenschaften der Holzhackschnitzel

Die zu erstellenden Handlungsempfehlungen sollten auf möglichst breiter Basis veröffentlicht werden, um eine schnelle Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis zu ermöglichen.

### 1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Untersuchungen mit dem Ziel vorgenommen, die Bildung von Staubemissionen in Kleinf Feuerungsanlagen zu charakterisieren bzw. zu minimieren. Ein Teil der Projekte beschäftigt sich mit der Verbesserung der Feuerungsanlagen einschließlich der Integration sekundärer Maßnahmen zur Abgasreinigung (Future Low Emission Biomass Combustion System (FutureBioTec) (Oberberger et al. 2012); Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinf Feuerungsanlagen (Hartmann 2014b); Feinstaubminderung in Kleinf Feuerungsanlagen (Deutsches Biomasse Forschungszentrum e. V. (DBFZ)). Ein weiteres Projekt beleuchtet u. a. Einflüsse der Brennstoffe und des Nutzerverhaltens auf die Emissionen, allerdings nur an Scheitholzöfen (Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen: Brennstoffeinfluss, Nutzer, Feuerungs-Wettbewerb, Sekundärmaßnahmen, Charakterisierung und Toxizität (Döhling 2012)). In dem Projekt „Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungen“ (Lenz et al. 2010) wurden die Staubemissionen und deren Charakteristik von unterschiedlichen Feuerungsarten vom Pelletofen bis zum Kaminofen untersucht.

Im Rahmen des FNR-Fachgespräches „Nutzung fester Biobrennstoffe im Rahmen der 1. BImSchV – Herausforderungen und Handlungsbedarf“ wurden außerdem Ergebnisse zu Staubemissionen aus Pelletfeuerungen dargestellt (Hartmann 2014c), wobei insbesondere die Abhängigkeit der Staubemissionen von der chemischen Zusammensetzung und dem Wassergehalt betrachtet worden ist. Dabei wurde konstatiert, dass eine breitere Datenbasis von Emissionsdaten in Verbindung mit der chemisch-physikalischen Charakterisierung des Brennstoffes notwendig ist, um bessere Abschätzungen abgeben zu können, unter welchen Voraussetzungen die Grenzwerte der 1. BImSchV in der Praxis eingehalten werden können. Insbesondere für den Brennstoff Holzhackschnitzel sind hierfür bisher nur wenige Daten vorhanden. Daraus folgt, dass auch bei der auf die Hackschnitzelqualität abgestimmten Optimierung der Anlagensteuerung noch Forschungsbedarf besteht. Wenn die Einhaltung der Emissionskriterien der 1. BImSchV nicht nur unter Prüfstandbedingungen, sondern auch in der Praxis gewährleistet werden soll, bilden die Daten zur Korrelation zwischen Holzhackschnitzelqualität und Anlagenparametern wichtige Voraussetzungen zur erfolgreichen Umsetzung dieser Zielsetzung.

Durch den Einsatz von Primärmaßnahmen besteht die Möglichkeit, das Ziel der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV vergleichsweise kostengünstig zu erreichen. Wie von H. Hartmann in einer beispielhaften Wirtschaftlichkeitsberechnung für eine Holzhackschnitzel-Feuerung dargestellt, zieht der Einbau einer Filteranlage neben den Investitionskosten noch erhebliche Betriebskosten nach sich, die die Wirtschaftlichkeit deutlich belasten können (Hartmann 2014a). Dies gilt insbesondere für kleinere Anlagen, da dort die Kosten für Filter im Vergleich zur gesamten Anlage überproportional hoch liegen.

Vor diesem Hintergrund ist die Zahl der seit dem 01.01.2015 installierten Neuanlagen relevant, da diese von der 2. Stufe der 1. BImSchV betroffen sind. Die oben genannte Niedersächsische Feuerstättenzählung ergab allein für das betrachtete Bundesland im letzten Auswertungsjahr 2015 eine Zunahme von 212 Anlagen mit einer Leistung unter 50 kW, wobei die Zahl der Neuanlagen in den vergangenen 8 Jahren konstant geblieben ist (3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2016).

#### 1.4 Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes

Die Aufgaben und Ziele des Verbundvorhabens wurden von den Projektpartnern im Rahmen der folgenden Teilvorhaben bearbeitet:

**Teilvorhaben 1:** Theoretische und methodologische Entwicklungen und Untersuchungen

**Teilvorhaben 2:** Experimentelle Unterstützung und Verbrennungsuntersuchungen

Die Verbundpartner, ihre Zuständigkeiten und Aufgaben sind in Tabelle 1 kurz dargestellt.

**Tabelle 1: Projektpartner und Aufgabenverteilung im Rahmen des Verbundprojektes**

Institution	Kompetenzen / Aufgaben
<b>TV1 - Theoretische und methodologische Entwicklungen und Untersuchungen</b>	
HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fachgebiet NEUTec	Verbundkoordinator, Gesamtvorhabensleitung, -planung, -durchführung und -auswertung, Erstellung Modellbrennstoff, Probenahme und Analytik
3N Dienstleistungen GmbH	Versuchsplanung, Brennstoffbeschaffung, Versuchsbegleitung, zielgruppengerechte Umsetzung der wissenschaftlichen Ergebnisse, Administrative Projektbetreuung
<b>TV2 - Experimentelle Unterstützung und Verbrennungsuntersuchungen</b>	
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft, Institut für energieoptimierte Systeme (EOS)	Planung, Durchführung und Auswertung von Verbrennungsversuchen und Emissionsmessungen
Technologie und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe	Planung, Durchführung und Auswertung von Verbrennungsversuchen und Emissionsmessungen
von Kaufmann GbR Domäne Schladen-Achim	Bereitstellung einer Praxis-Feuerungsanlage, Unterstützung bei den Verbrennungsversuchen

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Brennstoffauswahl und –beschaffung

#### 2.1.1 Beschaffung marktverfügbarer Qualitätshackschnitzel

Die Auswahl der Brennstoffe, die in den Feuerungsversuchen eingesetzt werden sollten, erfolgte so, dass qualitativ hochwertige Hackschnitzel ausgewählt wurden, die die Partikelgrößen und Wassergehalte, die in Hackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen typischerweise eingesetzt werden sollten, abdecken. Als Referenz wurde außerdem eine Charge Waldrestholz ausgewählt, die typisch für einen in der Praxis häufig verwendeten Brennstoff ist.

Die in dem Teilprojekt 2 durchgeführten Feuerungsversuche wurden in zwei Versuchsphasen unterteilt. In der ersten Phase wurden die Verbrennungsparameter untersucht und optimiert. Für diese Versuche wurden zwei unterschiedliche Brennstoffe (B3 und B4, siehe Tabelle 2) verwendet. Mit den optimierten Verbrennungsparametern wurden in einer zweiten Versuchsphase unterschiedliche Brennstoffe untersucht.

Eine Übersicht über die eingesetzten marktverfügbaren Hackschnitzel gibt Tabelle 2. Darin sind auch Hackschnitzelchargen mit definiertem künstlich hergestelltem Feinanteil aufgeführt. Die Herstellung dieser Hackschnitzel wird im nachfolgenden Kapitel 2.1.1 beschrieben. In der Tabelle sind außerdem die Brennstoffe mit den geplanten Eigenschaften (Wasser- und Aschegehalt, Partikelgrößenverteilung, Holzart) sowie dem tatsächlichen Wassergehalt aufgeführt.

**Tabelle 2: Übersicht der in den Feuerungsversuchen des TV 2 eingesetzten Brennstoffe und Lastzustände während der Feuerungsversuche**

Brennstoff-Nr.	Partikelgröße	Wassergehalt, geplant	Wassergehalt, analysiert	Aschegehalt	Holzart	Lastzustand <sup>2)</sup>
B1	P16S	ca. 20 %	13,5	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B2	P16S	ca. 30 %	24,3	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B3	P31S	< 15 %	6,6	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B4	P31S	ca. 30 %	22,8	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B4a	P31S, F 10 % <sup>1)</sup>	ca. 30 %	20,1	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B4b	P31S, F 15 % <sup>1)</sup>	ca.30 %	20,5	< 1%	Fichte	100 %
B5	P45S	ca. 20 %	11,7	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B5a	P45S, F 10 % <sup>1)</sup>	ca. 20 %	11,6	< 1%	Fichte	100 % / 30 %
B6	P45S	ca. 30 %	28,6	< 1%	Nadel-/Laubholz, gemischt	100 %
B6a	P45S, F 10 % <sup>1)</sup>	ca. 30 %	27,5	< 1%	Nadel-/Laubholz, gemischt	100 % / 30 %
B7	Waldrestholz-Hackschnitzel (WRH)	≤ 30 %	21,0	Ca. 3 %	Fichte	100 %

1 Feingut aus Hackschnitzeln derselben Charge hergestellt und in angegebenem Anteil zugesetzt

2 Die Teillastversuche wurden an der 50 kW-Anlage mit den Brennstoffen B1, B3, B4, B5 und B6a und an der 75 kW-Anlage mit den Brennstoffen B2, B3, B4, B5, B5a durchgeführt

Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, war es nicht immer möglich, genau die geplante Qualität der Hackschnitzel zu erhalten, insbesondere in Bezug auf den Wassergehalt. Gründe dafür waren zum einen, dass die verfügbaren Sortimente nicht immer genau den geplanten Qualitäten entsprachen und zum anderen, dass die Versuche nicht immer zum geplanten Zeitpunkt durchführbar waren und damit teilweise eine Nachtrocknung der Brennstoffe erfolgte.

Tabelle 2 gibt auch einen Überblick, mit welchen Brennstoffen Feuerungsversuche im Vollastbetrieb (100 %) bzw. zusätzlich im Teillastbetrieb (30%) durchgeführt wurden.

### 2.1.2 Herstellung von Brennstoffen mit definiertem Feingutanteil

Ein Aspekt, der untersucht werden sollte, war der Einfluss des Feingutanteils auf die Emissionen und insbesondere auf die Staubemissionen. Im Regelfall ist mit einem erhöhten Feingutanteil auch ein steigender Aschegehalt verbunden. Um den Effekt der Partikelgröße allein untersuchen zu können, wurde Material von den entsprechenden Brennstoffen mit einer Schneidmühle (Brennstoff B<sub>4a</sub>, B<sub>4b</sub>) bzw. Hammermühle (Brennstoff B<sub>5a</sub> und B<sub>6a</sub>) zerkleinert und anschließend in Mengen zugemischt, die in der Summe definierte Feingutanteile ergeben. Das Mischen erfolgte über 10 min in einem mechanischen Betonmischer, der während des Mischvorganges mit einer Kunststoffolie abgedichtet war, um Materialverluste zu vermeiden.



Abbildung 1: Brennstoff mit zugemischtem Feinanteil (B<sub>4a</sub>, P<sub>31S</sub> WG<sub>17,7%</sub> FG<sub>10%</sub>) in der Brennstoffzuführung für die 75 kW-Anlage

Abbildung 1 zeigt, dass trotz der intensiven Durchmischung eine dauerhafte Homogenisierung nur bedingt möglich war. Diese Schwierigkeit spiegeln auch die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung dieser Proben wieder (siehe Kapitel 3).

## 2.2 Brennstoffcharakterisierung

Zur Charakterisierung der in den Feuerungsversuchen des TV 2 eingesetzten Brennstoffe wurden die wichtigsten verbrennungstechnischen Parameter Wasser- und Aschegehalt, Partikelgrößenverteilung, Schüttdichte und Heizwert untersucht. Daneben wurden verschiedene chemische Parameter untersucht, die Einfluss auf die Verbrennung bzw. die Emissionen haben. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Elemente gelegt, die als Aerosolbildner wesentlich zum anorganischen Anteil der Staubemissionen beitragen.

Die Charakterisierung der Brennstoffe wurde gemäß folgender Methoden vorgenommen:

Wassergehalt	DIN EN 14774-2
Aschegehalt	DIN EN 14775
Heizwert	DIN EN 14918
Partikelgrößenverteilung	DIN EN 15149-1
Klassifikation der Partikelgrößenklassen	DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-4
Schüttdichte	DIN EN 15103
Chlor- und Schwefel-Gehalt	DIN EN 15289 und DIN EN ISO 10304-1
Gehalte an Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium, Zink	DIN EN 15290 / Flammen-AAS
Gehalte an Blei und Cadmium	DIN EN 15297 / Grafitrohr-AAS
Gehalt an Silizium	DIN EN 15297 / ICP-OES

Die Durchführung der einzelnen Analysen wird in den nachfolgenden Teilkapiteln kurz beschrieben.

### 2.2.1 Probenahme und Probenvorbereitung

Für die Probenahme wurde neben dem Aspekt, repräsentative Ergebnisse für die jeweils zu analysierenden Chargen zu ermitteln, außerdem die Frage der Homogenität der Brennstoffe mit untersucht.

Zu diesem Zweck wurden insbesondere von den Brennstoffen B<sub>3</sub> und B<sub>4</sub>, die in der ersten Versuchsphase eingesetzt wurden, jeweils 10 Einzelproben entnommen und als solche auch analysiert. Aus Gründen des Arbeitsaufwandes wurde die Anzahl der entnommenen und untersuchten Einzelproben für die in der zweiten Versuchsphase verwendeten Chargen auf jeweils drei beschränkt.

Die Probenahme erfolgte gemäß DIN EN 14778. Die notwendige Reduktion des Probenvolumens nach der Bestimmung der Schüttdichte erfolgte gemäß DIN EN 14780 mit der Vier-

telungsmethode. Die Teilung der Proben in Teilproben für die einzelnen Bestimmungen sowie die Probenvorbereitung erfolgte im Labor.

Zusätzlich wurden für jeden Versuchstag, an dem in Teilvorhaben 2 Feuerungsversuche durchgeführt wurden, Proben zur Bestimmung des aktuellen Wassergehaltes entnommen.

Für die Bestimmung des Aschegehaltes sowie der Heizwert- und Elementbestimmungen wird die Anteil der Originalprobe bei 40 °C getrocknet und mittels Schneidmühle (Fritsch, Pulverisette 25) auf < 1 mm zerkleinert. Für die Elementbestimmungen wird die < 1 mm zerkleinerte in einer Kugelmühle (Fritsch, Pulverisette 5) staubfein nachzerkleinert, um für die Einwaagen von  $\leq 100$  mg eine ausreichend homogene Probe zu erhalten. Von den vorbereiteten Proben wird parallel zu der jeweiligen Analyse der Wassergehalt durch Trocknung bei 105 °C ( $\pm 2$  °C) bestimmt und als Korrekturfaktor bei der Ergebnisberechnung der entsprechenden Analyse berücksichtigt.

Die untersuchten Ascheproben lagen in der Regel ausreichend fein vor, so dass sie direkt für die Analysen verwendet werden konnten, ggf. wurden sie manuell nachzerkleinert. Der Wassergehalt wurde parallel zu den jeweiligen Bestimmungen analysiert und zur Ergebniskorrektur verwendet.

### 2.2.2 Wassergehalt

Für die Bestimmung des Wassergehaltes werden ca. 300 g der Originalprobe gewogen, für ca. 24 h bei 105 °C ( $\pm 2$  °C) getrocknet und wieder gewogen. Der Wassergehalt berechnet sich aus dem Quotienten des Masseverlustes und der eingewogenen Masse der Originalprobe, angegeben in m-%.

### 2.2.3 Aschegehalt

Ca. 2 g der getrockneten und < 1 mm zerkleinerten Probe werden in einen Porzellantiegel auf 0,0001 g genau eingewogen und entsprechend des in DIN EN ISO 18122 angegebenen Temperaturprogramms in einem Glühofen mit einer Endtemperatur von 550 °C verascht. Den auf ca. 100 °C abgekühlten Tiegel lässt man im Exsikkator auf Raumtemperatur abkühlen, wiegt den Tiegel mit der Asche und berechnet den Aschegehalt in m-% bezogen auf die wasserfreie Probe.

### 2.2.4 Partikelgrößenverteilung

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgt durch Siebung der auf unter 20 m-% Wassergehalt abgetrockneten Originalprobe mit Hilfe einer Siebmaschine und Rundlochsieben mit entsprechenden Lochdurchmessern (siehe Tabelle 3). Überlängen und Querschnittsflächen werden manuell bestimmt. Die Anteile der einzelnen Größenfraktionen werden bezogen auf die gesiebte Gesamtprobe in m-% angegeben.



Die Klassifikation der Partikelgrößenverteilung der Holzhackschnitzel wurde sowohl nach DIN EN ISO 17225-1 als auch nach DIN EN ISO 17225-4 vorgenommen. Die Klassifikation in Teil 4 der Norm umfasst dabei nur den Teil der möglichen Klassen (P16S, P31S, P45S), der in erster Linie für kleinere Anlagen mit strengeren Anforderungen an die Partikelgrößenverteilung in Frage kommt, insbesondere in Bezug auf die Übergrößen. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass nach Teil 1 keine Vorgaben bezüglich des Feingutanteils bestehen, sondern dieser als eigene Klasse angegeben wird. Die einzelnen Kriterien sind Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen.

**Tabelle 3: Klassifikationskriterien für die Partikelgrößenverteilung für Holzhackschnitzel gemäß DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-4<sup>a)</sup>**

Klasse	Hauptfraktion mind. 60 m-%	Feingutanteil <sup>b)</sup> m-% ( $< 3,15$ mm)	Grobanteil <sup>c)</sup>		
			Grobanteil m-% (Länge eines Partikels, mm)	max. Partikellänge [mm]	max. Querschnittsfläche [cm <sup>2</sup> ]
P16S	$3,15 \text{ mm} < P \leq 16 \text{ mm}$	$\leq 15 \%$	$\leq 6 \% > 31,5 \text{ mm}$	$\leq 45 \text{ mm}$	$\leq 2 \text{ cm}^2$
P16	$3,15 \text{ mm} < P \leq 16 \text{ mm}$	---	$\leq 6 \% > 31,5 \text{ mm}$	$\leq 150 \text{ mm}$	---
P31S	$3,15 \text{ mm} < P \leq 31,5 \text{ mm}$	$\leq 10 \%$	$\leq 6 \% > 45 \text{ mm}$	$\leq 150 \text{ mm}$	$\leq 4 \text{ cm}^2$
P31	$3,15 \text{ mm} < P \leq 31,5 \text{ mm}$	---	$\leq 6 \% > 45 \text{ mm}$	$\leq 200 \text{ mm}$	---
P45S	$3,15 \text{ mm} < P \leq 45 \text{ mm}$	$\leq 10 \%$	$\leq 10 \% > 63 \text{ mm}$	$\leq 200 \text{ mm}$	$\leq 6 \text{ cm}^2$
P45	$3,15 \text{ mm} < P \leq 45 \text{ mm}$	---	$\leq 10 \% > 63 \text{ mm}$	$\leq 350 \text{ mm}$	---
P63	$3,15 \text{ mm} < P \leq 63 \text{ mm}$	---	$\leq 10 \% > 100 \text{ mm}$	$\leq 350 \text{ mm}$	---
P100	$3,15 \text{ mm} < P \leq 100 \text{ mm}$	---	$\leq 10 \% > 150 \text{ mm}$	$\leq 350 \text{ mm}$	---
P200	$3,15 \text{ mm} < P \leq 200 \text{ mm}$	---	$\leq 10 \% > 250 \text{ mm}$	$\leq 400 \text{ mm}$	---
P300	$3,15 \text{ mm} < P \leq 300 \text{ mm}$	---	festzulegen	festzulegen	---

P Partikelgröße, bezogen auf Partikel, die durch Sieböfnungen von Rundlöchern der angegebenen Größe passen. Die Maße der tatsächlichen Partikel können von diesen Werten abweichen, insbesondere hinsichtlich der Länge.

--- Keine Festlegung in der Norm.

a) DIN EN ISO 17225-4 gibt nur die Klassen P16S, P31S und P45S an

b) Nach DIN EN ISO 17225-1 wird der Feinanteil für die Klassifikation nicht berücksichtigt, sondern als gesonderte Klasse angegeben (siehe Tabelle 4)

c) Die Querschnittsfläche wird nur für Partikel des Grobanteils bestimmt. In einer Probe von ca. 10 l dürfen höchstens 2 Stücke die maximale Länge überschreiten, wenn die Querschnittsfläche  $< 0,5 \text{ cm}^2$  beträgt.

**Tabelle 4:** Klassifikationskriterien für den Feingutanteil von Holzhackschnitzeln gemäß DIN EN ISO 17225-1

Klasse	Feingutanteil ≤ 3,15 mm (m-%)
F05	≤ 5 %
F10	≤ 10 %
F15	≤ 15 %
F20	≤ 20 %
F25	≤ 25 %
F30	≤ 30 %
F30+	> 30 % (Höchstwert ist anzugeben)

### 2.2.5 Schüttdichte

Die Schüttdichte wird während der Probenahme bestimmt, indem die Originalprobe mit einer Schaufel in ein 50 l-Gefäß gefüllt und durch Aufstoßen des Gefäßes aus 15 cm Höhe auf eine glatte Fläche nachverdichtet wird. Eventuell entstandene Lücken in der Probe werden mit weiterem Material aufgefüllt, die Oberfläche wird bündig mit dem Gefäßrand abgezogen und die Masse der Probe wird bestimmt. Mit dem bekannten Gefäßvolumen wird die Schüttdichte berechnet.

### 2.2.6 Heizwert

Ca. 0,5 g der zerkleinerten und bei 40 °C getrockneten Probe werden zu einem Pellet gepresst, in einen Quarztiegel eingewogen, mit Verbrennungshilfsmittel versehen und in das Bombenkalorimetergefäß eingesetzt. Der weitere Zusammenbau des Gefäßes erfolgt nach Herstellerangaben des Kalorimeters (IKA, Calorimeter C 7000). Anschließend wird das Gefäß mit 30 bar Sauerstoff beaufschlagt und die Bestimmung des Brennwertes durchgeführt. Da sehr einheitliche Proben verwendet wurden, wurden für die Berechnung des Heizwertes aus dem Brennwert für die entsprechenden Elementgehalte Tabellenwerte aus der DIN EN ISO 17225-1 verwendet.

Das Wasser aus dem Gefäß wurde für die Bestimmung des Chlor- und Schwefelgehaltes aufgefangen. Zusätzlich wurden alle inneren Oberflächen mit Wasser abgespült, um mögliche restliche Chlorid- bzw. Sulfatreste zu erfassen und dem Wasser hinzugefügt.

### 2.2.7 Stickstoffgehalt

Der Stickstoffgehalt wurde aus der bei 40 °C getrockneten und zerkleinerten Probe mittels Hochtemperaturverbrennung in einem Elementanalysator (Elementar, Vario el) bestimmt.

### 2.2.8 Chlor- und Schwefelgehalt

Die Bestimmung des Chlor- und Schwefelgehaltes erfolgte aus dem als Absorptionslösung dienenden Wasser aus der Brennwertbestimmung, in dem die Elemente in Form von Chlorid bzw. Sulfat gelöst vorliegen. Die Lösung wird auf ein Volumen von 50 ml aufgefüllt, filtriert und an einem Ionenchromatographen (Metrohm, Basic IC 883 plus) analysiert.

### 2.2.9 Gehalt an Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Zink

Für die Bestimmung der Elemente Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium und Zink wurde ein Aliquot der mittels Kugelmühle nachzerkleinerten Probe in einem Säuredruckaufschluss in Lösung überführt und anschließend mittels Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (Flammen-AAS) analysiert.

### 2.2.10 Gehalt an Silizium

Der Silizium-Gehalt wurde mittels ICP aus der Aufschlusslösung bestimmt, der mittels Säuredruckaufschluss nach DIN EN ISO 16967 von der fein zerkleinerten Probe hergestellt wurde.

### 2.2.11 Gehalt an Cadmium, Blei

Die Blei- und Cadmium-Gehalte der Proben wurden mittels Graphitrohr-Atomabsorptionsspektrometrie (Graphit-AAS) aus den Aufschlusslösungen bestimmt, die für die Elemente Natrium etc. hergestellt wurden.

## 2.3 Hackschnitzel-Kleinfeuerungen für Feuerungsversuche

Der Focus des Forschungsvorhabens lag auf der Untersuchung kleiner Hackschnitzel-feuerungsanlagen, für die mögliche Zusatzinvestitionen für Staubabscheider überproportional hohe Belastungen verursachen. Daher wurden zwei Anlagen mit unterschiedlichen Nennleistungen unter 100 kW ausgewählt, die außerdem unterschiedliche Verbrennungstechniken abbilden sollten. Außerdem sollte gewährleistet sein, dass es sich um 2015 aktuell am Markt befindliche Anlagen handelt.

Für die Feuerungsversuche wurden zwei unterschiedliche Hackschnitzelkessel verwendet. Eine 50 kW-Anlage mit Einschubfeuerung und Kipprost wurde im Abgaslabor des Technologie- und Forschungszentrums (TFZ) in Straubing, Bayern in die vorhandene Abgasmessstrecke eingefügt. Die zweite Anlage mit Einschubfeuerung und Treppenrost und einer Leistung von 75 kW

war 2013 auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in Schladen, Niedersachsen installiert worden und konnte mit der freundlichen Genehmigung des Eigentümers für die Versuchsreihen genutzt werden. Diese Anlage ist baugleich mit dem 2015 auf dem Markt befindlichen Modell der Firma. Da es sich um eine in der Praxis in Betrieb befindliche Heizungsanlage handelte, mussten für den Aufbau der Abgasanalytik einige Umbauten u.a. an der Rauchgasführung vorgenommen werden.

### 2.3.1 50 kW-Anlage mit Einschubfeuerung und Kipprost

Die eingesetzte Heizanlage ist konzipiert für die Verbrennung von naturbelassenem Holz in Form von Hackschnitzeln, Spänen oder Holzpellets. Bei diesem Hackschnitzelkessel wird der Brennstoff aus einem Vorratsbehälter entnommen und über Schnecken dem Heizkessel zugeführt. Während des Startvorgangs wird der Brennraum mit Hackschnitzeln befüllt und anschließend mit einem elektrischen Anzündgebläse automatisch gezündet. In der anschließenden Anheizphase stellt sich die eingestellte Materialfördermenge ein. Nach Ablauf der Anheizphase geht die Anlage in den Automatik-Betrieb über. In diesem Modus erfolgt die Verbrennung gemäß der eingestellten Regelungsvariante. Um die bei der Verbrennung anfallende Asche vom Rost zu entfernen, wird standardmäßig alle vier Stunden gekippt. Die automatische Wärmeübertragerreinigung reinigt mithilfe der auf- und abfahrenden Turbulatoren die Wärmeübertragerflächen. Die Asche fällt bei dem hier eingesetzten Kessel in die Aschenlade für die Brennkammerasche. Die Flugasche fällt in die Aschenlade für die Flugraumasche. Die notwendige Verbrennungsluft wird über zwei Stellmotoren bedarfsgerecht zugeführt. Über die Lambda-Sonde, den Kesseltemperaturfühler und den Brennraumtemperaturfühler wird:

- die Feuerung permanent überwacht,
- die Kesselleistung dem Wärmebedarf angepasst,
- die Emission minimiert und
- der Kesselwirkungsgrad optimiert.

Tabelle 5: Anlagentechnische Merkmale der 50 kW-Feuerungsanlage

Anlagenkomponente		Ausführung
<i>Feuerung</i>	Anlagenart	Rostfeuerung
	Bauart	Feuerung in Kessel integriert
	Nennwärmeleistung	50 kW
	kleinste Wärmeleistung	15 kW
	Feuerungsprinzip	Kipprost mit seitlichem Einschub
	Brennstoffzufuhr	automatisch über Förderschnecken
	Zündung	automatisch mittels Zündgebläse
	Entaschung	über Kipprost in Aschebox
<i>Wärmeübertrager</i>	Form	Rohrbündelwärmeübertrager stehend
	Reinigung	automatisch
<i>Verbrennungsluft</i>	Primärluftzufuhr	durch den Kipprost
	Sekundärluftzufuhr	in die Nachverbrennungszone hinein
	Luftmengenregelung	Über Drosselklappen
<i>Leistungsregelung</i>	Regelgrößen	Kesselwasser-, Brennraum- und Abgastemperatur
	Stellgrößen	Brennstoff- und Verbrennungsluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	Regelgrößen	Abgastemperatur, Verbrennungsluftverhältnis (Lambda-Wert)
	Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge über Gebläsedrehzahl
<i>Betriebsdaten</i>	Betriebsdruck	3,0 bar
	Betriebstemperatur	60 - 80 °C
	Wasserinhalt	167 l
	Rauchrohrdurchmesser	180 mm

### 2.3.2 75 kW-Anlage mit Einschubfeuerung und Treppenrost

Bei der zweiten Anlage handelt es sich um einen Kessel mit Einschubfeuerung und Treppenrost, der zur Wärmebereitstellung in einem landwirtschaftlichen Betrieb dient. Der Kessel mit einer maximalen Heizleistung von 75 kW ist primär für den Betrieb mit Holzhackschnitzeln ausgelegt; die Verwendung von Holzpellets (oder ein Gemisch der beiden Brennstoffe) ist andererseits auch problemlos möglich.

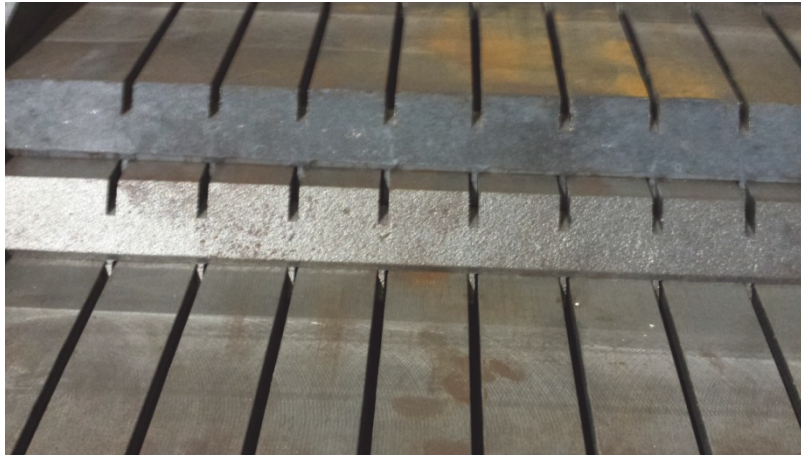
Die verwendeten Holzhackschnitzel werden im benachbarten Brennstofflager zugegeben und über eine Förderschnecke in den Heizungsraum befördert. Dort erfolgt die eigentliche Beschickung des Brennraumes über die sogenannte Stokerschnecke des Kessels.

Durch die Feuerraumtür kann während des Kesselbetriebes dank eines Sichtfensters das Flammenbild beurteilt werden. Das über eine Stokerschnecke in den Brennraum geförderte Brenngut passiert eine Füllstandszone, welche sowohl eine Überfüllung des Brennraumes als auch einen Brennstoffmangel (z.B. durch leergelaufene Förderschnecke) verhindert bzw. ausgleicht. Der Brennstoff befindet sich auf einem Treppenrost (vgl. Abbildung 2) und wird mit Primärluft versorgt. Zum Zeitpunkt der Zündung (Anfahrphase bei Beginn des Heizbetriebs oder nach einer Störung) wird der Brennstoff bei ruhendem Rost über ein Heizgebläse gezündet; im regulären Betrieb wird der Ausbrand über die Intervallbewegungen des Treppenrostes reguliert und die Asche in den fahrbaren Aschebehälter geschoben. Außerdem kann dank der beschriebenen Mechanismen die Heizleistung je nach Anforderung von 75 kW maximaler Leistung bis zu 22,5 kW minimaler Leistung moduliert werden. Über eine Wirbeldüse wird den Brenngasen für die Nachverbrennung Sekundärluft zugemischt (vgl. Kapitel 2.5.2). Das in einem Reaktionsrohr weiter oxidierte Brenngas/Luftgemisch wird aufgrund des schon erwähnten Saugzuggebläses durch den Rohrbündelwärmeübertrager in das Rauchrohr transportiert. Mit Hilfe eines Gestänges und Wirbulatoren wird die Reinigung des Wärmeübertragers gewährleistet. Im Rauchrohr befinden sich eine Lambdasonde und ein Rauchgas-Temperaturfühler für die Regelung der Verbrennung. Über einen Antrieb werden sowohl die Wärmeübertragerreinigung, als auch der Treppenrost und die Ascheförderschnecke angetrieben. Über eine menügeführte Regelung kann der Betreiber verschiedene Informationen abrufen und Einfluss auf den Kesselbetrieb nehmen.

Abbildung 2 zeigt den Treppenrost mit Blick in Richtung Brennstoffzufuhr. Im Betrieb wird die Glut bzw. die Asche schrittweise in Richtung des Betrachters gefördert. Die oberste Stufe ist fast vollständig ausgefahren, die mittlere Stufe schiebt im Anschluss das Material über die untere Stufe, dieses fällt dann anschließend in den Aschebehälter. Die einzelnen Stufen greifen derart ineinander, dass bei jeder Bewegung auch die Primärluftschlitze gereinigt werden und durchlässig bleiben. Eventuelle Störstoffe wie Steine, Schlacke, oder Metallteile werden problemlos „durchgefördert“ bzw. kleinere Steine fallen durch die Schlitze in eine eigens dafür vorgesehene Schublade. Der Rostantrieb ist leistungsfähig genug, dass auch etwas größere Ansammlungen von evtl. gebildeter Schlacke aufgebrochen und hinausgefördert werden. Bei den verwendeten Qualitätshackschnitzeln war während der Versuchsdauer ohnehin keine nennenswerte Schlackebildung zu erwarten.

Für die Einstellung der Kesselparameter und eine Beurteilung des Betriebszustands hat der Hersteller einen benutzerfreundlichen Touchscreen vorgesehen. Die wichtigsten Parameter hierbei sind Kesseltemperatur, Betriebszustand, Leistung und gewähltes Programm. Um die gewünschten Versuche durchgehend mit Volllast durchführen zu können, wurde der „Schornsteinfegermodus“ gewählt, in dem der Kessel eine 100%ige Leistungsabgabe ansteuert und diese aufrechterhält. Im Betrieb „Regelung“ passt der Kessel die Leistung gemäß der gemessenen Rücklauftemperaturen an und moduliert entsprechend herunter. In Abwesenheit eines

Pufferspeichers wäre dies bis auf die Minimalleistungsstufe von 30% möglich. Für die in Versuchsphase I durchgeführten Teillastmessungen wurde eine Maximalleistung von 30% einprogrammiert, welche in Kombination mit der minimal möglichen Leistung bei ebenfalls 30% einen konstanten Betriebszustand für die Dauer der Messungen garantierte.



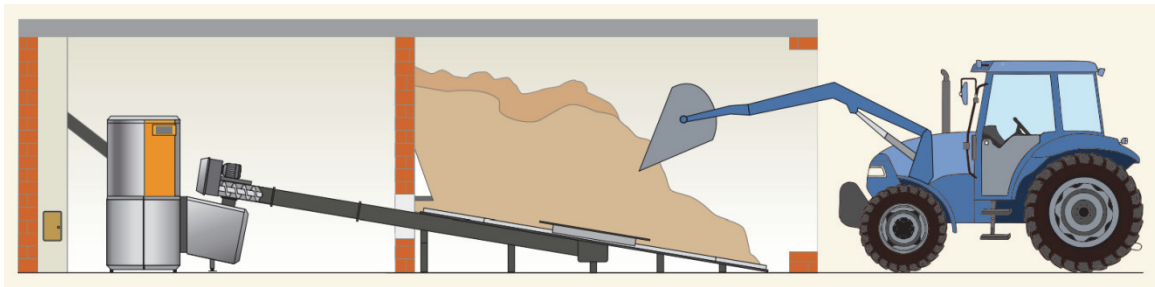
**Abbildung 2: Treppenrost (Draufsicht, Blickrichtung Brennstoffzufuhr)**

In das Heizkonzept ist ein Pufferspeicher mit 3000 l Volumen eingebunden (2 x 1500 l Behälter in Reihenschaltung), so dass der Kessel im Normalfall im emissionsärmeren Volllastzustand läuft, bis sich die voreingestellte gewünschte (Speicher-)Temperatur eingestellt hat und der Kessel abschaltet. Für eventuellen zusätzlichen Heizbedarf oder kurzfristigen Brennstoffmangel ist eine Gastherme als Spitzenlastkessel installiert.

Da zu Beginn der praktischen Messungen jahreszeitlich bedingt kein Heizwärmebedarf vorhanden war (Trinkwarmwasser wurde außerdem in der gesamten Liegenschaft elektrisch erzeugt), wurde das im Kesselbetrieb erhitzte Wasser vor dem Pufferspeicher umgeleitet und über einen im Außenbereich installierten Kühler rückgekühlt und rückgeführt. Mit Voranschreiten der Messungen und Beginn der Heizperiode wurde natürlich zuerst der Pufferspeicher bedient und die einsetzende Nachfrage nach Heizwarmwasser befriedigt, bevor überschüssige Wärme an längeren Versuchstagen wieder über den Rückkühler abgeführt werden musste.

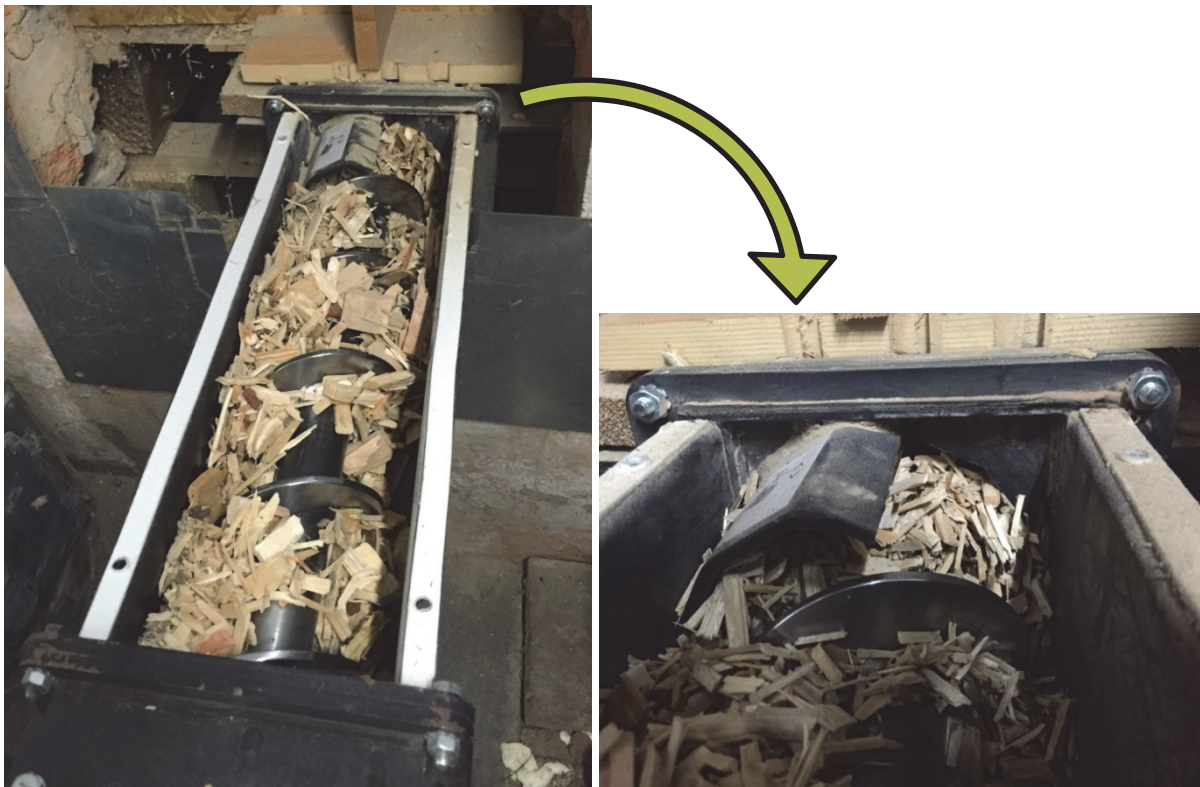
Die Brennstoffaufgabe resultiert aus einem Zusammenspiel zwischen einer Förderschnecke, aus dem Brennstofflager kommend, und einer sogenannten Stokerschnecke: Der geförderte Brennstoff fällt aus der Förderschnecke in die Stokerschnecke, was neben der dadurch verbesserten Dosierbarkeit (Vermeidung der Zufuhr von Brennstoffpfropfen oder -klumpen) auch eine Schutzmaßnahme gegen Rückbrand darstellt. Zusätzlich sind mehrere Brandschutzklappen zwischen den Schnecken verbaut; die Förderschnecke verfügt zusätzlich über eine Löscheinrichtung, um die gesamte Schnecke zu fluten.

Am kesselseitigen Ende der Förderschnecke ist eine Klappe angebracht, die eine Beurteilung des geförderten Brennstoffs oder auch die Entfernung eventuell vermuteter Störstoffe ermöglicht (vergleiche Abbildung 5).



**Abbildung 3: Schema der Brennstoffaufgabe**

Abbildung 3 entspricht (schematisch) der Brennstoffaufgabe in Schladen. Das Brennstofflager (Tagesbehälter) wird im Normalbetrieb mit einem Traktor oder Radlader befüllt. Ein Federarmrührwerk sorgt dafür, dass Pellets oder Holzhackschnitzel homogenisiert und kontinuierlich in die Förderschnecke befördert werden. Diese führt durch Mauerwerk (Brandschutz) in den benachbarten Heizraum und mündet in die vorher beschriebene Stokerschnecke.



**Abbildung 4: Förderschnecke vom Brennstofflager in den Heizraum (links) und Detailansicht (rechts)**

Abbildung 4 (links) zeigt den Durchgang der Förderschnecke vom Brennstofflager in den Heizraum. Eine so oder auch anders geartete feuerbeständige Barriere ist zwischen Brennstofflager und Kesselraum in jedem Fall zwingend erforderlich, auch wenn durch redundante Brandschutzmechanismen ein Rückbrand bis in weite Teile der Förderschnecke im Prinzip ausgeschlossen ist.



Abbildung 4 (rechts) gewährt einen genaueren Einblick in das Innenleben der Förderschnecke. Diese ist im Mauerdurchgang mit einem Überfüllschutz (Blech links im Bild) und einer Schneidkante (dreieckiges Blech rechts im Bild) ausgestattet. Der Überfüllschutz verhindert, dass eine zu große Menge an Brennstoff in die im Normalzustand geschlossene Schnecke gelangt und diese verstopft (Hackschnitzel stellen eine verhältnismäßig weiche Biomasse dar, welche bei entsprechendem Druck nach vorübergehender Verformung einen massiven Störfropfen bilden können). In Ergänzung zum Überfüllschutzblech zerschneidet die Schneidkante beispielsweise überlange Hackschnitzel, Zweige, zusammengequetschte Brennstoffklumpen oder sonstige Störstoffe. Nach Aussage eines Mitarbeiters des Hersteller-Wartungsteams würde selbst eine Dachlatte, die von der Schnecke erfasst wird, zuverlässig zerkleinert werden. In der Realität liefert allerdings die daraus resultierende erhöhte Stromaufnahme des Schneckenantriebs ein Warnsignal, welches die Kesselsteuerung veranlasst, die Schnecke rückwärts laufen zu lassen und letztendlich abzustellen. Dies ist nicht zuletzt zur Unfallvermeidung von Vorteil. Nach Zugabe eines problematischen Brennstoffs (Brennstoff B7, Waldrestholz) konnte die Funktionsfähigkeit dieses Sicherheitskonzeptes bestätigt werden. Eine Kombination aus Waldboden, (Fichten-)Nadeln und -Zapfen und kleineren, flexiblen Zweigen wurde zu einem massiven Störfropfen komprimiert, die Stromaufnahme des Schneckenantriebs stieg über den Schwellenwert (0,9 A) und die Schnecke schaltete nach zwei rückwärtsderhenden Intervallen, die das Problem nicht beheben konnten, ab.

Der beschriebene Störfall trat ebenfalls nach mehreren Versuchen mit erhöhtem Feingutanteil im Brennstoff auf (Brennstoff B4a, B4b, B5a und B6a, vergleiche Abbildung 1, Abbildung 6 und Abbildung 7). Hier hatte sich unmittelbar vor Schneidkante und Überfüllschutz ein stark verdichteter Pfropfen aus dem feinen „Sägemehl“ gebildet. Durch Anordnen der Einbauten an der Außenwand (aus Perspektive des Kesselraums) bzw. an der Innenwand des Brennstofflagers wären diese Störungen unter Umständen zu vermeiden oder zumindest einfacher zu beheben gewesen.

Abbildung 5 gewährt einen weiteren Einblick in die Förderschnecke. In diesem Fall durch eine Wartungsklappe am Ende der Förderstrecke. An dieser Stelle kann man sich über den Zustand des Brennstoffs informieren oder überprüfen, ob die Schnecke nach einem eventuellen Brennstoffwechsel oder einer Störung im Brennstoffnachschub bereits wieder vollständig gefüllt ist. Ein regulärer Betrieb des Kessels ist allerdings nicht möglich, ein längeres Offenstehen der Klappe wird registriert (mechanischer Kontakt oben links im Bild).

Zu der Fördereinrichtung gehört auch ein umfangreiches Brandschutzkonzept, um einen möglichen Rückbrand in die Stokerschnecke zu verhindern. Dazu gehört eine Löscheinrichtung für beide Schnecken, eine automatische Kesselabschaltung und mehrere automatisch schließende Brandschutzklappen.



**Abbildung 5: Förderschnecke – Detailansicht bei geöffneter Wartungsklappe**

Während die oben beschriebene Brennstoffversorgung bei gut bestücktem Brennstofflager (Federarmrührwerk vollständig mit Brennstoff bedeckt) einwandfrei funktioniert, musste die Brennstoffaufgabe für die Durchführung der Versuche und die damit verbundenen häufigen Brennstoffwechsel angepasst werden. Das Rührwerk wurde entfernt und die Förderschnecke für eine halbmanuelle Brennstoffaufgabe (schwerkraftunterstützt) umgerüstet (vgl. Abbildung 6, links). Der eingesetzte Brennstoff (B<sub>1</sub>) ist verhältnismäßig fein, kann aber in vertretbaren Abständen zwischen den Messungen aufgefüllt werden; die Kombination aus Eigengewicht und Schwerkraft stellt den Brennstoffnachschub der Förderschnecke zuverlässig sicher. Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen Unterschiede der verwendeten Brennstoffe und zeigen, dass dadurch auch das Förderverhalten und die Verteilung im Brennraum beeinflusst werden.

Abbildung 6 (links) zeigt das umgerüstete Brennstofflager, beaufschlagt mit feinem Material (Brennstoff B<sub>1</sub>) und niedrigstem Feingutanteil. Die Schnecke fördert diskontinuierlich; die Hackschnitzel rutschen auch dank der entstehenden Vibrationen beim An- und Abschalten zuverlässig nach.

Abbildung 6 (rechts) veranschaulicht den mitunter aufgetretenen Brennstoffmangel. Im Bereich des Schneckenkanals wird das Brenngut zuverlässig weitergefördert, unmittelbar darüber bildet sich jedoch allein aufgrund von Haftreibung ein temporär stabiles Konstrukt (Brückenbildung) aus naturgemäß rauen, leichten, ineinander verhakten Hackschnitzeln. Ein erhöhter Feingutanteil, eventuell anhaftendes Harz und besonders leichte (trockenes Nadelholz) Materialien verstärken diesen Effekt noch.



**Abbildung 6: Halbmanuelle Brennstoffaufgabe (schwerkraftunterstützt) für Holzhack- schnitzel B1 (P16S, WG13%) (links) und B4b (P31S, WG20,1%, FG15%) mit temporär auftretender Brückenbildung über der Förderschnecke (recht)**

Der in Abbildung 7 (links) abgebildete Brennstoff B6a wies eine Abweichung gegenüber den übrigen Brennstoffen auf. Entgegen der Planung nur Nadelholz einzusetzen, enthielt dieses Material Laubholzanteile. Es handelte sich um das größte Material, das im Rahmen der Feuerungsversuche eingesetzt wurde. Außerdem ist gut zu erkennen, dass sich der zugesetzte Feingutanteil in der Zuführung teilweise entmischt hat und somit auch nicht völlig homogen verteilt im Brennraum ankommen konnte.

Abbildung 7 (rechts) verdeutlicht die beschriebenen Anforderungen an die Fördertechnik. Es handelt sich um den schwieriger zu fördernden Brennstoff Waldrestholz (Brennstoff B7). Zu sehen sind u. a. Erde/Waldboden, Nadeln und Zweige und Rindenstücke. Tannenzapfen waren ebenfalls vorhanden. Aus diesem vielfältigen Gemisch resultierte die erwähnte Blockade der Schnecke. Verbrennungstechnisch ergeben sich bei längerer Verwendung dieses (kostengünstigen) Brennstoffs weitere Nachteile durch hohe Aschegehalte ( $>3 \text{ m-}\%$ ) und die Gefahr der Schlackebildung dank der hohen Anteile an Sand/Boden. Die mit dieser Charge erzielten Emissionsdaten sind unter dem Vorbehalt zu sehen, dass aufgrund der mangelhaften Förderbarkeit der angestrebte Lastzustand von 100 % nicht erreicht bzw. aufrechterhalten werden

konnte. Dies trifft nicht für die am TFZ gewonnenen Daten über die 50 kW-Anlage zu, da hier alle Brennstoffe direkt (ohne Umweg über Förderschnecken) zugegeben wurden.



**Abbildung 7:** Links: Entmischung des Brennstoffes durch hohen Feingutanteil (B6a, P45S, WG27,1%, FG10%)  
Rechts: Aufgabe von Brennstoff B7 (P45, WG20,6%, WRH)

## 2.4 Feuerungsversuche und Emissionsmessungen

### 2.4.1 Aufbau der 50 kW-Versuchsanlage

Die Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in Straubing durchgeführt. Der Aufbau der Abgasmessstrecke für die Bestimmung der Zusammensetzung der Abgase sowie der Staubemissionen ist in Abbildung 8 dargestellt. Die messtechnische Ausstattung wurde entsprechend der Aufgabenstellung gewählt.

Der Brennstoffvorratsbehälter befand sich auf einer Plattformwaage für die kontinuierliche Bestimmung des Brennstoffmassenstromes. Der Versuchsaufbau bestand abgasseitig aus einer senkrechten Messstrecke mit einem Krümmer und einer oder mehreren Reduzierungen zum Anschluss an den Abgasstutzen der Feuerungsanlage. In der verwendeten Messstrecke waren die notwendigen Messöffnungen für die Bestimmungen von Abgastemperatur, Schornsteinzug,

Abgasgeschwindigkeit, der gasförmigen Bestandteile sowie der Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes gemäß VDI 2066, Blatt 1 (Kommission zur Reinhaltung der Luft (KRDL) 2006) sowie Wöhler SM 96 angeordnet.

Die Kesselanlage wurde wasserseitig an einen speziellen Kühlkreislauf angeschlossen, der die direkte Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme ermöglicht. Die hydraulische Messstrecke entspricht dabei den Anforderungen der DIN EN 303 Teil 5 (Deutsches Institut für Normung e. V. 1999) bzw. der DIN EN 304 (Deutsches Institut für Normung e. V. 2004).

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Anlagenparameter und Emissionsmessgrößen erfasst:

Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:

- Kohlenstoffmonoxid (CO),
- flüchtige organische Stoffe (Ges.-C),
- Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>),
- Gesamtstaub.

Betriebsparameter der Feuerungsanlage:

- Sauerstoff (O<sub>2</sub>),
- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>),
- Abgasfeuchte (H<sub>2</sub>O),
- Wärmeleistung und feuerungstechnischer Wirkungsgrad,
- Abgastemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen, Raum- bzw. Verbrennungslufttemperatur,
- Brennstoffverbrauch durch Plattformwaage
- Förderdruck sowie
- Abgasgeschwindigkeit.

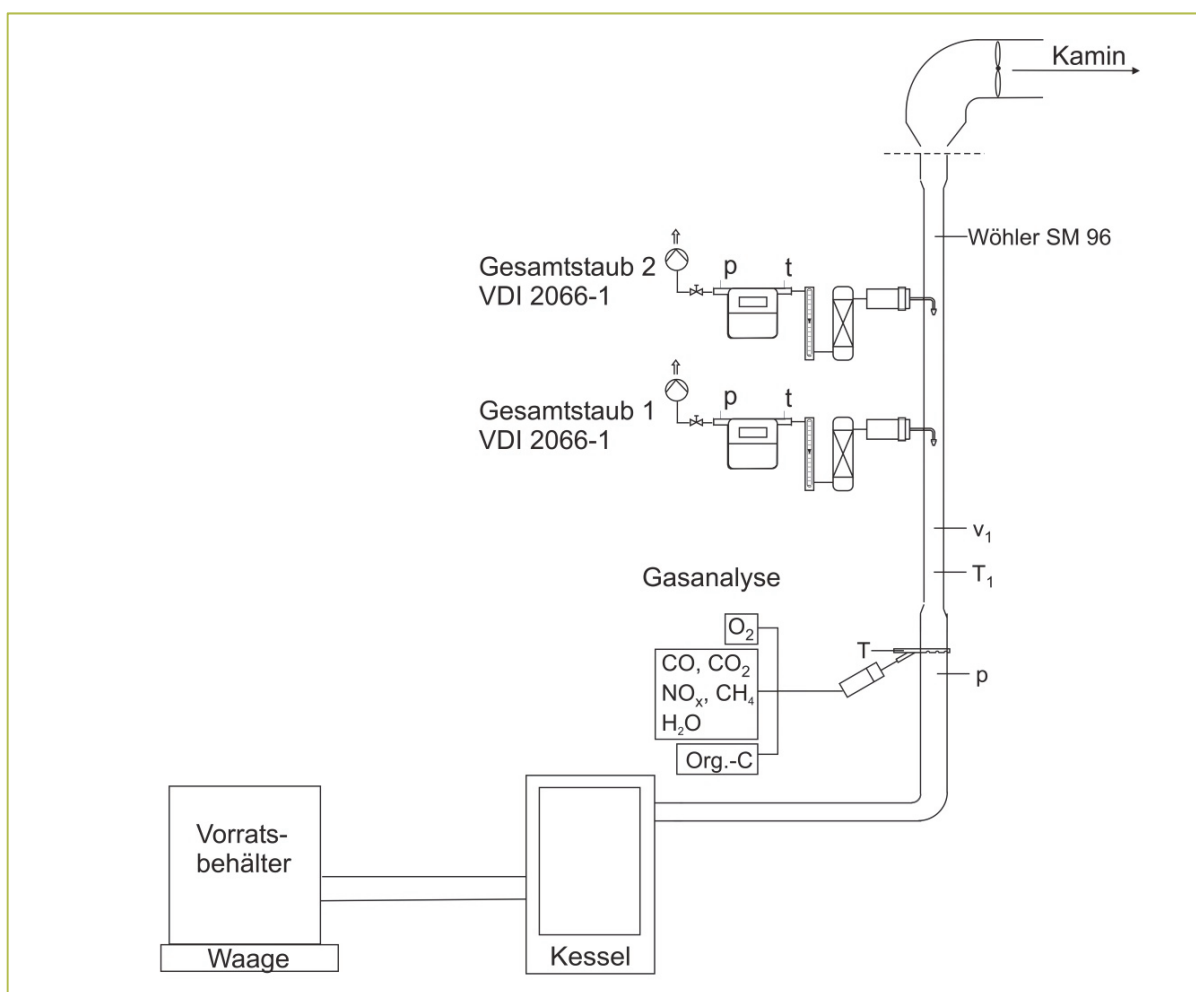
Mit Ausnahme des Gesamtstaubes wurden alle Messgrößen kontinuierlich erfasst.

Eine Übersicht über die bei den kontinuierlichen Messungen eingesetzten Geräte und Verfahren zeigen Abbildung 8 und Tabelle 6.

Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgte in Anlehnung an das in der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 beschriebene Messverfahren. Bei der Probenahme wurde ein staubbelasteter Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wurde eine mit Quarzwatte gestopfte Filterhülse mit einem Quarzfaserplanfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP (0,3 µm), Durchmesser 45 mm) kombiniert und im Filterkopfgerät eingesetzt, das außerhalb des Abgaskanals angeordnet war. Das Absaugrohr und das Rückhaltesystem wurden elektrisch auf 160 °C beheizt, um Abgaskondensation im Filtersystem zu vermeiden. Nach dem Filterkopfgerät gelangte das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrock-

nung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Die Filtermedien wurden bei 160 thermisch vor- und nachbehandelt. Die Staubsonden wurden nach jedem Messtag mit Aceton gespült. Das Aceton in den Spülbehältern wurde in einem Abdampfschrank restlos abgedampft. Anschließend wurden die Behälter wie die Filter bei 160 °C nachbehandelt. Die Beladung wurde proportional der Filterbeladungen auf die Einzelmessungen aufgeteilt.

Außerdem wurden parallel zum Referenzverfahren nach VDI 2066 auch mit dem Wöhler SM 96 der Gesamtstaub bestimmt, um die Ergebnisse besser mit den Messergebnissen für die 75 kW-Anlage vergleichen zu können, bei der ebenfalls mit einem Wöhler-Messgerät, dem Wöhler SM 87 (baugleich mit dem SM 96), gearbeitet wurde.



**Abbildung 8: Schematischer Versuchsaufbau der Abgasmessstrecke für die 50 kW-Anlage, Skizze nicht maßstäblich**

Im hochgeschossigen Abgaslabor des TFZ fand sich genug Raum für eine normgerechte Platzierung der Probenahmestellen (z.B. fünffacher Durchmesser des Rohres als Beruhigungsstrecke nach Einbauten/Krümmern und doppelter Durchmesser zwischen Messstellen untereinander). An der Heizungsanlage in Schladen mussten aus Platzgründen diesbezüglich Abstriche gemacht werden (vgl. Abbildung 9).

Tabelle 6: Kontinuierlich erfasste Messgrößen und eingesetzte Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ -verfahren	aktiver Messbereich
<b>Umgebungsbedingungen und Betriebsparameter</b>			
Abgastemperatur	Thermoelement (Typ K)	Thermoelektrizität	0 - 1.000 °C
Statischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 5000	Membran mit induktivem Abgriff	-200 – 200 Pa
Abgasgeschwindigkeit	Flügelradanemometer	Drehzahlmessung am Flügelrad	0,4 – 20 m/s
Lufttemperatur	Toss Kombisensor Typ 20500	temperaturabhängige Widerstandsänderung	-20 – 50 °C
<b>Abgasbestandteile</b>			
CO <sub>2</sub>	Gasmet CX 4000 FTIR	fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 12,5 Vol.-%
H <sub>2</sub> O	Fa. Ansyco		0 – 12,5 Vol.-%
CO			0 – 100 ppm 100 – 5.000 ppm
NO <sub>x</sub>			0 – 200 ppm 200 – 2.000 ppm
HCl			0 – 1.000 ppm
SO <sub>2</sub>			0 – 1.000 ppm
O <sub>2</sub>	PMA 100-L Fa. M&C Products	Paramagnetismus	0 – 21 Vol.-%
Ges.-C	Thermo-FID, Fa. Mess- & Analysetechnik GmbH	Flammenionisation	0 – 100 ppm
<b>Wärmeleistung und Wirkungsgrad</b>			
Kesselwasser-durchfluss	Promag 53 P Fa. Endress+Hauser	magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem	15 – 3.000 l/h
Temperatur	Widerstandsthermometer, (PT 100, Klasse B);	temperaturabhängige Widerstandsänderung	0 – 100 °C

### Bestimmung der Staubemissionen gemäß VDI 2066, Blatt 1

Aufgrund der geringen Massendifferenz zwischen leerer Filterhülse und beladener Filterhülse wurde am TFZ ein Schrank konstruiert, in dem eine definierte Luftfeuchte herrscht und Luftbewegungen fast vollständig ausgeschlossen sind. Der Schrank befindet sich wiederum in einem Raum mit konditionierter, trockener Luft, so dass die Filterhülsen kaum Gelegenheit haben, beim Transport Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufzunehmen. So wird eine Verfälschung des Messergebnisses verringert. Mit den beschriebenen Maßnahmen ist aber auch das Maximum an Aufwand betrieben worden, um eine hinreichende Qualität der Analysedaten zu garantieren. Die Varianz in den Ergebnissen der Dreifachmessungen konnten sie dennoch nicht vollständig eliminieren.

### 2.4.2 Aufbau der 75 kW-Praxisanlage

Wie bereits erwähnt, wurde der Rauchzug für die Emissionsmessungen angepasst. Da das vorhandene Rauchrohr einen Zugbegrenzer besitzt (siehe Abbildung 9 (links)) welcher Falschlufteintritt und Turbulenzen im Rauchgasstrom verursacht/verstärkt hätte, wurde es insgesamt durch ein neues Rohr ersetzt. Auf die Wärmedämmung wurde vorerst verzichtet, da die Messungen Anfang September begannen.



**Abbildung 9: Vorhandenes wärme gedämmtes Rauchrohr mit Zugbegrenzer (links); Neu eingepasstes Rauchrohr (ohne Wärmedämmung) mit Bohrungen für die Messsonden der Abgasanalytik (rechts)**

Abbildung 9 (rechts) zeigt das neu eingepasste Rauchrohr mit den Bohrungen für die Messsonden der Abgasanalytik. Beim Vergleich mit der Abgasmessstrecke im TFZ fällt auf, dass hier aufgrund der beengten Räumlichkeiten ein Kompromiss zwischen normgerechter Anordnung der Messstellen und überhaupt vorhandenem geeigneten Abgasweg gefunden werden musste. Für die Staubmessungen wurde die längst mögliche Beruhigungsstrecke im Abgasstrom reserviert. Die übrige Abgasanalytik zur Beurteilung der gasförmigen Komponenten ist an der gegenüberliegenden Seite des Rauchzugs angeordnet. Ein garantiert ungestörter Kernstrom für jede Sonde und isokinetische Probenahme konnten jedoch nicht umgesetzt werden. Das im oberen Bildbereich sichtbare Aluminiumklebeband wurde auch stromaufwärts ab dem Kesselabgasstutzen an allen Winkelverbindungen und Übergängen eingesetzt, um die Gefahr von unterdruckbedingtem Falschlufteintritt ins Rohr so gut wie vollständig auszuschließen.

Im Anschluss an die Messreihen wurde das ursprüngliche Rohr mit Zugbegrenzer wieder eingebaut und eine Wärmedämmung aufgebracht.

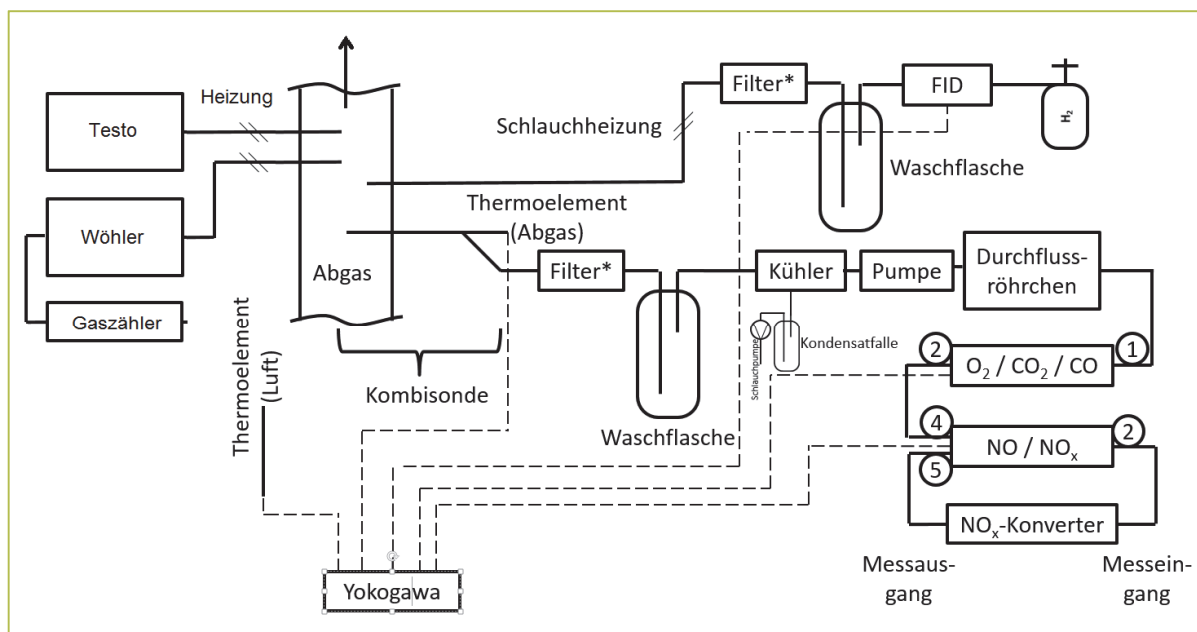




**Abbildung 10: Probenahmestellen für Staub (Wöhler) und Testo (Staub, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CO)**

Abbildung 10 zeigt die eingesetzten Sonden der Messsysteme Wöhler SM 87 (unten) und Testo 380. Letztere wurde auch eingesetzt, um an beiden Probenahmestellen den Kernstrom der Abgasströmung zu identifizieren. Hier wurde wiederholt die Strömung mit der höchsten Temperatur ermittelt, und die Positionstiefe der Sonden im Rohr entsprechend angepasst. Die Testosonde erlaubt nach Vorwärmung und Kalibrierung zwei 15minütige Messintervalle innerhalb einer Dreiviertelstunde, da nach jeder Messung ein Reinigungsschritt und erneute Kalibrierung (Nullung) erforderlich ist. In dieser Zeitspanne wurden mit der (vorgewärmten) Wöhlersonde drei 15minütige Intervalle absolviert, in denen entsprechend drei Filterhülsen mit Staub beladen und für die weitergehende Analyse im Labor verwahrt wurden. Es standen also für jeden Versuch eine Zweifach- und eine Dreifachmessung zur Auswertung zur Verfügung. Bei Wiederholungsmessungen entsprechend mehr.

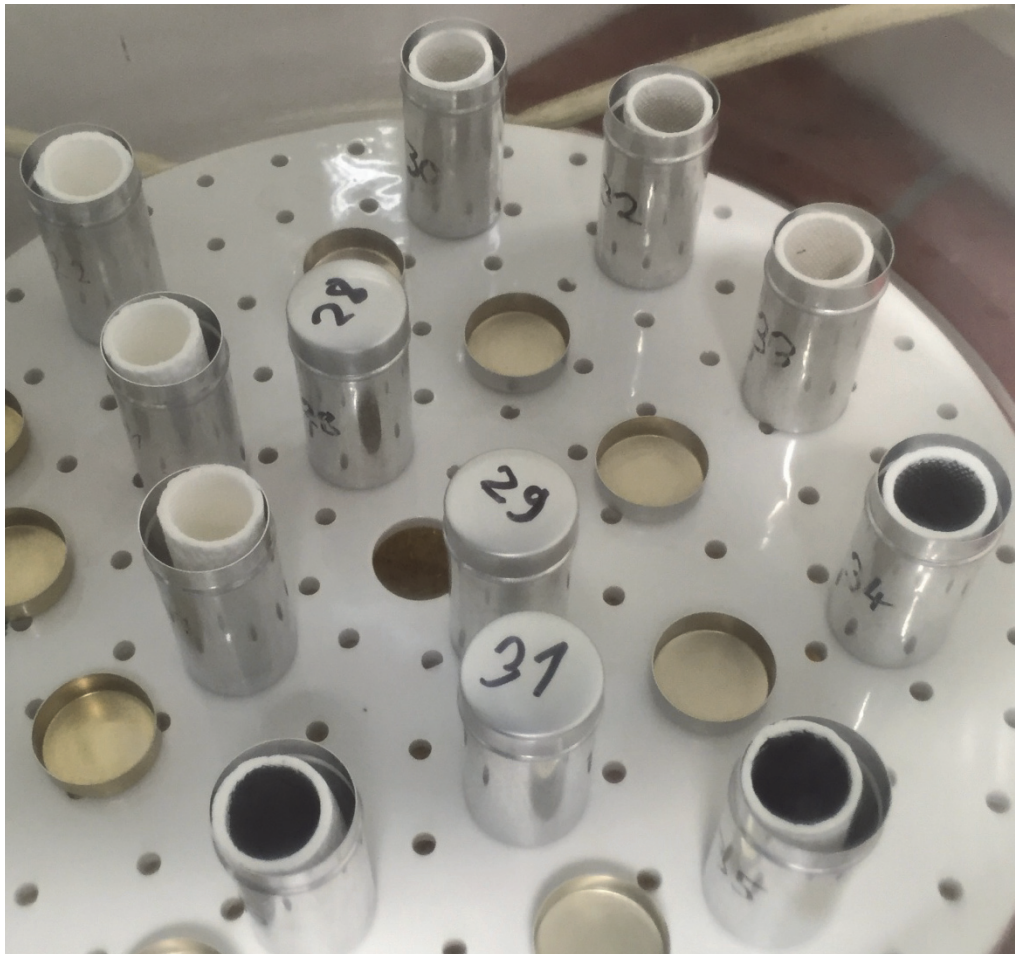
Für die Variation der Verbrennungsbedingungen stand, ohne über die Kesselsteuerung auf die Programmierung der Lambdasonde Einfluss nehmen zu müssen, im Wesentlichen die mechanische Beeinflussung des Verbrennungsluftverhältnisses über den Parameter „Klappenstellung“ zur Verfügung. Über ein starres Gestänge wurden die Sekundärluftklappen und die Primärluftklappe gegenläufig bewegt und das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft entsprechend variiert.



**Abbildung 11: Schematischer Aufbau der Abgasanalytik an der 75 kW-Anlage**

Abbildung 11 zeigt die Abgasanalytik mit allen Komponenten im Überblick. Neben den erwähnten Messsonden der Hersteller Testo und Wöhler wurden Gasanalysatoren der Firma ABB verwendet. Die Messsignale dieser und des Flammenionisationsdetektors wurden auf einen Yokogawa-Messschreiber aufgegeben und gespeichert. Die Temperaturen im Raum und im Abgas wurden erfasst. Alle Werte wurden mit einer Auflösung von zwei Sekunden erfasst, so dass auch kleinere Schwankungen im Gasstrom sichtbar wurden, wenn auch im Nachgang für die Auswertung gröbere Viertelstunden-Durchschnittswerte gebildet wurden. Neben den Messgeräten ist auch die Verwendung der Komponenten zur Messgasaufbereitung, d.h. der Filter und Kondensatfallen, erkennbar.

In Abbildung 12 sind beladene und unbeladene Filterhülsen zweier Messzyklen zu sehen (jeweils dreimal eine Viertel-stunde Probenahme bei Voll- und Teillast). Eindeutig zu identifizieren sind die Hülsen des Teillastversuchs mit ihrem tiefschwarzen Rußfilm (unten im Bild). Links im Bild erkennbar befinden sich die unbeladenen Kontrollhülsen, oben die schwächer beladenen Hülsen (grau, „staubig“) eines Vollastversuchs. Nach Beladung werden die Hülsen in ihren Aluminium-Transportkapsel in geschlossenen Boxen bis zur Wägung verwahrt. Um gleiche Wägebbedingungen vor und nach dem Versuch herzustellen, werden sowohl die unbeladenen als auch die beladenen Hülsen zur Vorbereitung mindestens sechs Stunden bei 120 °C getrocknet und im Exsikkator abgekühlt und gelagert.



**Abbildung 12: Beladene Filterhülsen eines Feuerungsversuches (Teillast (unten), Volllast (oben), Kontrollhülsen (Links))**

## 2.5 Optimierung der Verbrennungsführung bezüglich der Emissionen

### 2.5.1 Optimierung der Verbrennungsführung an der 50 kW Kipprostfeuerung

Die Anlage wurde vor Versuchsbeginn herstellenseitig in Betrieb genommen und auf den während der Inbetriebnahme verfügbaren Brennstoff eingestellt. Während der Versuche zur Optimierung der Verbrennungsführung wurden im Wesentlichen 4 Parameter variiert:

#### **Primärluft für Materialmengen-Minimum (Teillastbetrieb):**

Primärluftmenge bei minimaler Materialmenge (Brennstoffmenge). Die Primärluftklappe öffnet bis zu diesem eingestellten Wert (Einstellbarer Bereich: 0 - 100 %).

#### **Primärluft für Materialmengen-Maximum (Volllastbetrieb):**

Primärluftmenge bei maximaler Materialmenge (Brennstoffmenge). Die Primärluftklappe öffnet bis zu diesem eingestellten Wert (Einstellbarer Bereich: 0 – 100 %).

#### **O<sub>2</sub> Soll-Wert bei minimaler Brennraumtemperatur (Voll-/Teillastbetrieb):**

Bei minimaler Brennraumtemperatur regelt der Kessel auf diesen eingestellten Restsauerstoff-Sollwert (in Abhängigkeit dieses Wertes wird die Sekundärluftmenge geregelt).

**Tabelle 7: Standardeinstellungen und Änderungen zur Optimierung der Kesselregelung**

	Standard-einstellung nach Inbetriebnahme	Korrekturwert nach oben	Korrekturwert nach unten
Primärluft für Materialmengen-Minimum	25 %	+ 5 %	- 5 %
Primärluft für Materialmengen-Maximum	35 %	+ 5 %	- 5 %
O <sub>2</sub> Soll-Wert bei minimaler Brennraumtemperatur	7,0 %	+ 2 %	- 2 %

### 2.5.2 Optimierung der Verbrennungsführung der 75kW-Praxisanlage mit Treppenrost

Für die Variation der Verbrennungsbedingungen stand, ohne über die Kesselsteuerung auf die Programmierung der Lambdasonde Einfluss zu nehmen, im Wesentlichen die mechanische Beeinflussung des Primär-/Sekundärluftverhältnisses über Einstellung der entsprechenden Luftklappen zur Verfügung. Über ein starres Gestänge wurden die Sekundärluftklappen und die Primärluftklappe manuell gegenläufig bewegt und das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft entsprechend variiert. Neben der Brennstoffqualität ist dieses Verhältnis der wichtigste variierte Parameter, dieser soll deshalb nachstehend kurz erläutert werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie sich eine Betätigung des Einstellhebels (von Klappenstellung „2“ bis „8“ können sieben Positionen per Hand angewählt werden) auf den Öffnungsgrad der Luftklappen auswirkt. Es wird allerdings in jedem Fall eine starre, gegenläufige Bewegung erzielt: Beide Sekundärluftklappen werden gleichzeitig entgegen der Richtung der Primärluftklappe bewegt. Eine unabhängige Einstellung z.B. nur von der Primärluftklappe war nicht möglich.

Eine „höhere“ Klappenstellung hat nun zur Folge, dass die Sekundärluftklappen sich etwas schließen, der Verbrennung steht also weniger Sekundärluft zur Verfügung. Außerdem öffnet sich die Primärluftklappe, das Luftverhältnis verschiebt sich also bei höherer Klappenwahl zu einem erhöhten Primär-/Sekundärluftverhältnis.

Die Standardeinstellung für den Brennstoff Hackschnitzel ist Klappenstellung „4“, also ein relativ ausgeglichenes Primär-/Sekundärluftverhältnis. In der ersten Phase der Verbrennungsversuche wurde der Bereich der Klappenstellungen „3“ bis „5“ untersucht.

### 3 Verbrennungstechnische und chemisch-physikalische Brennstoffcharakterisierung

Kapitel 3.1 gibt einen Überblick über die chemisch physikalischen Eigenschaften der Brennstoffe. In den nachfolgenden Kapiteln werden verschiedene Einzelaspekte der Brennstoffeigenschaften näher betrachtet. Die Frage der Streuung zwischen den Einzelproben einer Charge wird in Kapitel 3.2 an ausgewählten Proben und Parametern dargestellt. In Kapitel 3.3 werden die Unterschiede in der Klassifikation der Partikelgrößenverteilung nach Teil 1 bzw. Teil 4 der DIN EN ISO 17225 untersucht. Die Veränderung des Wassergehaltes der einzelnen Chargen über den Versuchszeitraum wird in Kapitel 3.4 dargestellt. Das nachfolgende Kapitel 3.5 befasst sich mit dem Verhältnis zwischen Aschegehalt und dem Anteil aerosolbildender Elemente, die maßgeblich an den Staubemissionen beteiligt sind. An der 75 kW-Anlage war es möglich, die Rostasche getrennt nach Versuchen aufzufangen und auf ihre Inhaltsstoffe zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.6 dargestellt.

#### 3.1 Chemisch-physikalische Charakterisierung der Brennstoffe im Überblick

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Brennstoffanalysen im Überblick dargestellt. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte aus den Mehrfachbestimmungen, wobei die Anzahl der Wiederholungen je nach Brennstoff und Parameter unterschiedlich ist. Für die meisten Brennstoffe und Parameter wurden drei Einzelproben analysiert, der Wassergehalt sowie die Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe B<sub>3</sub> und B<sub>4</sub> wurden jeweils aus 10 Einzelproben bestimmt. In der Übersicht sind jeweils die Mittelwerte angegeben.

Mit den Wassergehalten zwischen 6,6 und 28,6 m-% wurde der gesamte für den Betrieb der in Teilvorhaben eingesetzten Feuerungsanlagen zulässige Bereich abgedeckt. Die Aschegehalte, die bis auf das Waldrestholz (3,4 m-%) bei maximal 0,74 m-% lagen, sind in die Klasse A1 nach DIN EN ISO 17225-4 einzuordnen.

Die Heizwerte liegen mit Werten zwischen 17,92 MJ/kg und 18,78 MJ/kg für die Brennstoffe B<sub>1</sub> bis B<sub>6</sub> sowie 19,11 MJ/kg für das Waldrestholz in dem erwartungsgemäßen Bereich. Die Schüttdichten lagen in dem Bereich von 162 - 251 kg/m<sup>3</sup>, wobei die höchste Dichte für die Charge bestimmt wurde, die außer Nadelholz noch einen Anteil von Laubholz aufwies.

Die Partikelgrößenklassen reichten von P<sub>16</sub> bis P<sub>45</sub> gemäß der Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-1. Bei Verwendung der Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 bewegte sich das Spektrum zwischen P<sub>31S</sub> und „nicht klassifizierbar“, d. h. die Klassifikation ergab jeweils die nächst höhere Klasse oder eine Zuordnung war nicht möglich. Das zeigt, dass die Klassifikationskriterien gemäß Teil 4 der Norm relativ strenge Anforderungen stellen, die bei den Aufbereitungsmethoden, die zur Herstellung der untersuchten Hackschnitzel eingesetzt wurden, dadurch erreicht wurden, dass ein Brennstoff mit einer Hauptfraktion hergestellt wurde, der um eine Klasse kleiner war als die angestrebte Deklaration. Diese Problematik wird in Kapitel 3.3 noch einmal näher erläutert.

**Tabelle 8:** Charakterisierung der in den Feuerungsversuchen eingesetzten Brennstoffe, Teil 1: (Aschegehalt (AG), Wassergehalt (WG), Schüttdichte (BD), Partikelgrößenverteilung und Feingutanteil (P, F), Brenn- und Heizwert

Nr.	WG	AG	BD	Fein- anteil	P	F	P	Brenn- wert (trocken) (MJ/kg)	Heiz- wert (trocken) (MJ/kg)	Heizwert (An- lieferung) (MJ/kg)
	(m-%)	(m-%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(m-%)	(17225-1)	(17225-4)				
B1	13,5	0,52	185	2,8	P16	F05	P31S	20,00	18,65	15,82
B2	24,3	0,52	196	2,0	P16	F05	P31S	20,09	18,74	13,60
B3	6,6	0,49	162	2,5	P16	F05	P31S	19,88	18,53	17,06
B4	22,8	0,27	172	3,2	P16	F05	P31S	19,27	17,92	13,32
B4a	20,1	0,36	---	9,0	P31	F10	P45S	---	---	---
B4b	20,5	0,33	---	19,7	P31	F20	n. kl.	---	---	---
B5	11,7	0,45	199	0,2	P31	F05	n. kl.	20,13	18,78	16,85
B5a	11,6	0,47	---	6,9	P31	F10	n. kl.	---	---	---
B6	28,6	0,69	251	0,3	P31	F05	n. kl.	19,66	18,31	12,38
B6a	27,5	0,74	---	10,9	P31	P15	n. kl.	---	---	---
B7	21,0	3,40	213	14,6	P45	F15	n. kl.	20,46	19,11	14,65

--- nicht analysiert, identisch mit Brennstoff ohne Feingutanteil

n. kl. nicht klassifizierbar

Die Feingutanteile der beschafften Chargen lagen außer für das Waldrestholz mit 14,6 m-% alle deutlich unter 5 m-%. Die Brennstoffe mit höheren Feingutanteilen wurden wie in Abschnitt 1.1 beschrieben durch Zugabe von Feinmaterial hergestellt. Die Analysenwerte von 9,0 m-%, 6,9 m-%, und 10,9 m-% für die Chargen, die auf 10 m-% Feingutanteil eingestellt wurden und der Wert von 19,7 m-% für die Charge mit einem berechneten Feingutanteil von 15 m-% zeigen, dass die Herstellung solcher künstlicher Brennstoffe nur mit relativ großen Abweichungen praktisch umsetzbar ist.

Bei den Gehalten der verschiedenen Elemente ist gut zu erkennen, dass der Aschegehalt bei dem Waldrestholz aufgrund der deutlich höheren Anteile an Nährstoffelementen sowie Silizium erheblich höher ausfällt als bei den übrigen Chargen. Der hohe Siliziumgehalt legt außerdem nahe, dass mineralische Anhaftungen zu dem Gesamtaschegehalt beitragen.

Von den Brennstoffen wurden nur B3 und B4 auf Gehalte an Blei und Cadmium untersucht (siehe Tabelle 9), da die Gehalte insgesamt für die Summe der Aerosolbildner keine Rolle spielen und die Ascheanalysen (siehe II.1.3) gezeigt haben, dass nur bei diesen Brennstoffen etwas erhöhte Konzentrationen festgestellt wurden.

**Tabelle 9: Charakterisierung der in den Feuerungsversuchen eingesetzten Brennstoffe, Teil 2: Gehalte der Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Silizium, (Si), Zink (Zn), Cadmium (Cd) und Blei (Pb)**

Nr.	C	H	N	S	Cl	Na	K	Ca	Mg	Si <sup>1)</sup>	Zn	Cd	Pb
	(m-%)					(mg/kg)							
B1	49,9	6,69	0,08	0,01	< 0,02	81	400	970	160	87	11	---	---
B2	50,2	6,74	0,07	0,01	< 0,02	120	240	765	145	106	12	---	---
B3	47,0	6,08	0,05	0,01	< 0,02	101	484	761	189	157	23	0,11	0,54
B4	48,2	6,56	0,04	0,01	< 0,02	83	472	646	141	80	13,9	0,15	0,94
B4a	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
B4b	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
B5	50,1	6,67	0,07	0,01	< 0,02	136	432	975	182	50	10	---	---
B5a	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
B6	49,6	6,62	0,11	0,01	< 0,02	69	913	1121	303	133	11	---	---
B6a	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
B7	51,2	6,71	0,39	0,03	0,02	119	1560	4390	573	4720	61	---	---

--- nicht analysiert, identisch mit Brennstoff ohne Feingutanteil

- 1) Für Silizium wurde aufgrund der großen Differenzen der Einzelwerte der Median statt des Mittelwertes verwendet.

### 3.2 Streuung einzelner Parameter zwischen Einzelproben aus einer Brennstoffcharge

Für die Untersuchung der Streuung einzelner Parameter innerhalb einer Charge wurde für die Brennstoffe B3 und B4 Einzelproben separat entnommen und analysiert. Je nach Parameter wurden unterschiedlich viele der entnommenen Proben untersucht. Die Ergebnisse sind exemplarisch für die Parameter Wasser- und Aschegehalt, Schüttdichte, Partikelgrößenklasse, Heizwert, Kalium und Calcium in dargestellt. Einzelwerte, die besonders stark vom Mittelwert abweichen sind in der Tabelle rot gekennzeichnet.

**Tabelle 10: Untersuchung der Streuung einzelner Parameter innerhalb von Brennstoff-Chargen (B<sub>3</sub> und B<sub>4</sub>) für folgende Parameter: Wasser- und Aschegehalt, Schüttdichte, Partikelgrößenklasse, Feingut-Klasse, Heizwert, Gehalte der Elemente Stickstoff (N), Kalium (K), Calcium (Ca)**

		WG	AG	BD	P <sup>1)</sup>	F	P <sup>1)</sup>	Q <sub>ar</sub>	N	K	Ca
		(m-%)	(m-%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(17225-1)		(17225-4)	(MJ/kg)	(m-%)	(mg/kg)	(mg/kg)
B <sub>3</sub>	MW	6,6	0,5	162	P16	F05	P31S	17,06	0,05	484	761
	Min	5,6	0,2	160	P16	F05	P31S	16,95	0,04	450	648
	Max	7,8	1,3	166	P16	F05	P45S	17,18	0,06	519	913
	n	10	4	5	10	10	10	4	4	4	4
	Stabw.	0,7	0,5	2,4				0,10	0,01	33	129
	RSD (%)	10,6	107,5	1,5				0,56	16,3	6,8	16,9
B <sub>4</sub>	MW	22,8	0,3	172	P16	F05	P31S	13,32	0,04	472	646
	Min	20,0	0,2	166	P16	F05	P31S	12,54	0,03	442	610
	Max	27,2	0,3	180	P16	F05	n. kl.	13,86	0,04	483	694
	N	10	4	10	10	10	10	4	4	4	4
	Stabw.	2,4	0,06	4,5				0,56	0,01	19,9	37,9
	RSD (%)	10,7	21,6	2,6				4,20	13,3	4,2	5,9

1) Die Klassifikation erfolgt gemäß DIN EN ISO 17225-1 bzw. DIN EN ISO 17225-4

Stabw. Absolute Standardabweichung, in der jeweiligen Einheit für den Parameter

RSD Relative Standardabweichung in %

### 3.3 Klassifikation der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-4 im Vergleich

Ein wichtiger Parameter, der sowohl die die Zuführung der Feuerungsanlage als auch das Abbrandverhalten beeinflusst, ist die Partikelgrößenverteilung. In Abbildung 13 bis Abbildung 18 sind die Partikelgrößenverteilung für alle untersuchten Brennstoffe dargestellt. Zusätzlich zu den Anforderungen nach DIN EN ISO 17225-1 bzw. DIN EN ISO 17225-4 wurde die Feingutfraktion nochmals auf den Anteil < 1 mm hin untersucht und ein 8 mm-Sieb eingesetzt, mit dem die Fraktion 3,15 mm bis 16 mm in zwei getrennten Fraktionen aufgefangen wurde. Außer für die Brennstoffe B<sub>4a</sub> und B<sub>4b</sub> wurden jeweils die Teilchargen für die 50 kW-Anlage bzw. die 75 kW-Anlage parallel untersucht. Die Fehlerbalken geben die Spannweite der Ergebnisse bei Mehrfachbestimmungen an.

Vergleicht man die Brennstoffe B<sub>1</sub> bis B<sub>6</sub> ohne zugesetzten Feingutanteil mit dem Waldrestholz (B<sub>7</sub>), fällt auf, dass die Siebung durch die Hersteller zu einer deutlich geringeren Verteilung der Partikel über verschiedene Klassen festzustellen war. Sehr ausgeprägt ist das für B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub> der Fall, bei denen sich bis auf einen geringen Feingutanteil fast die gesamte Materialmenge in den Fraktionen von 3,15 mm bis 16 mm wiederfindet.



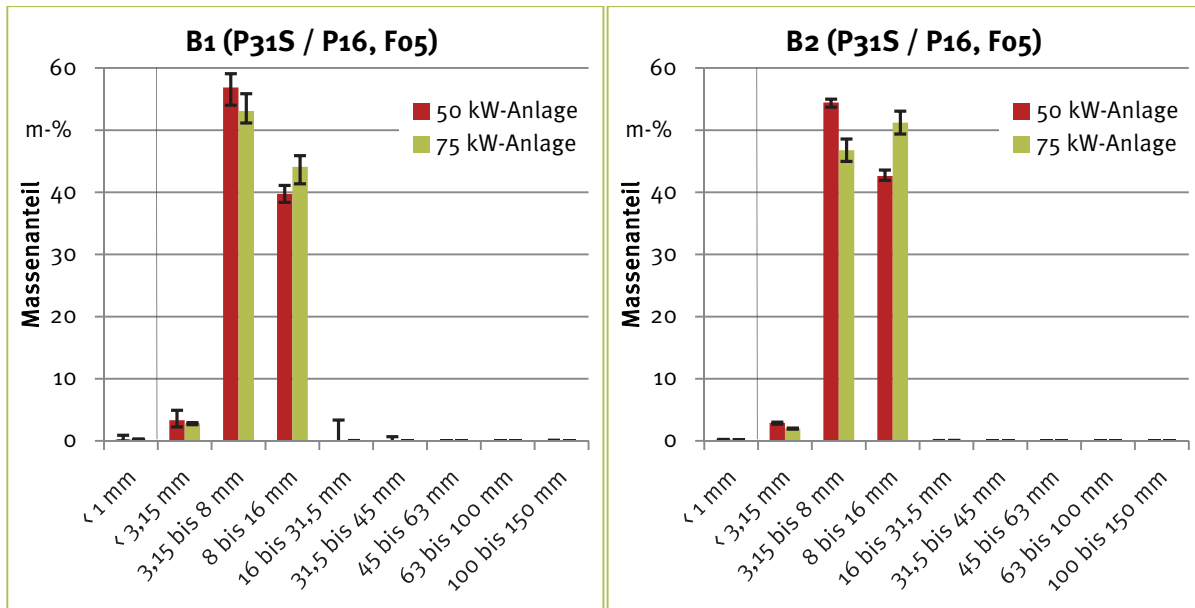


Abbildung 13 Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B1 (links) und B2 (rechts)

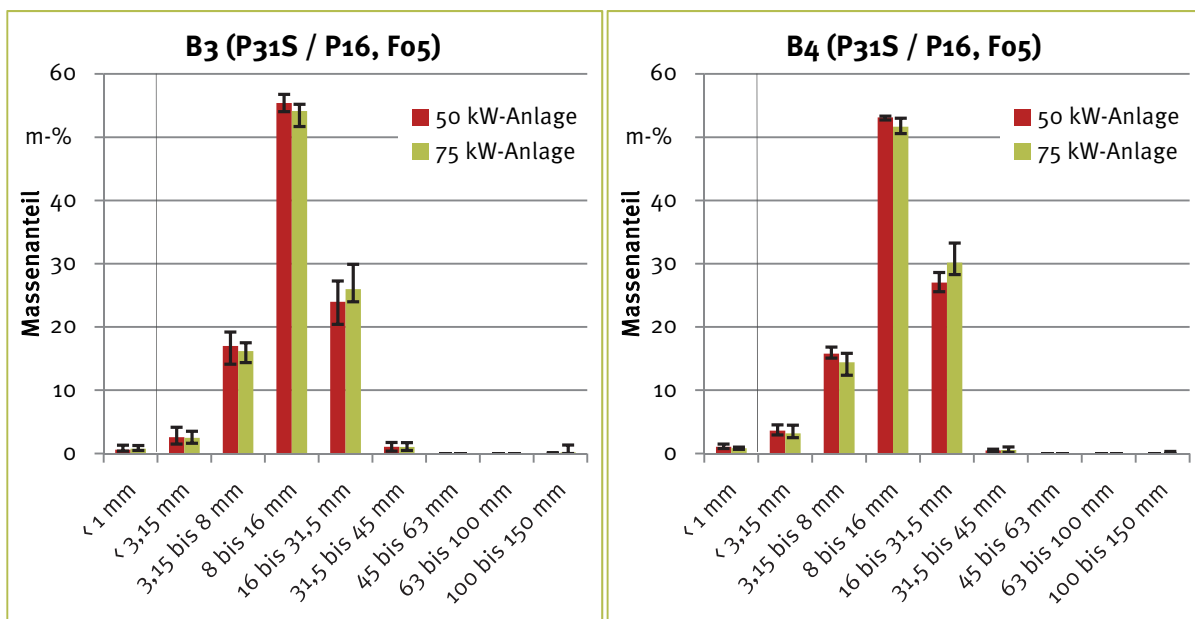


Abbildung 14 Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B3 (links) und B4 (rechts)

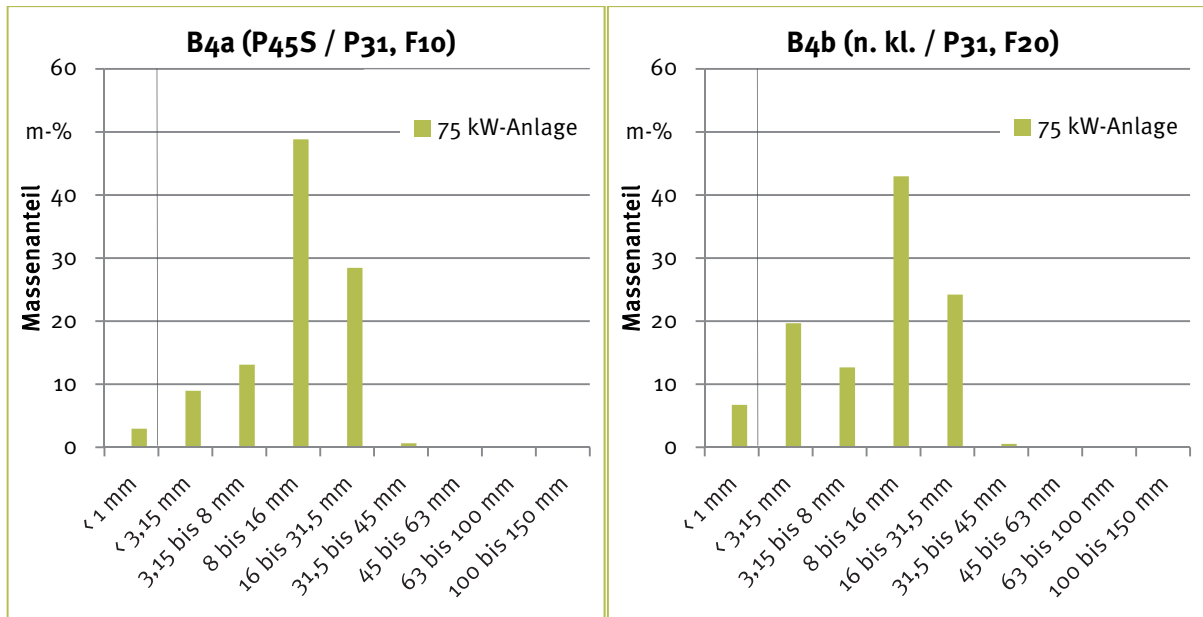


Abbildung 15 Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilcharge für 75 kW-Anlage, B4a (links) und B4b (rechts); Werte für 50 kW-Anlage nicht verfügbar

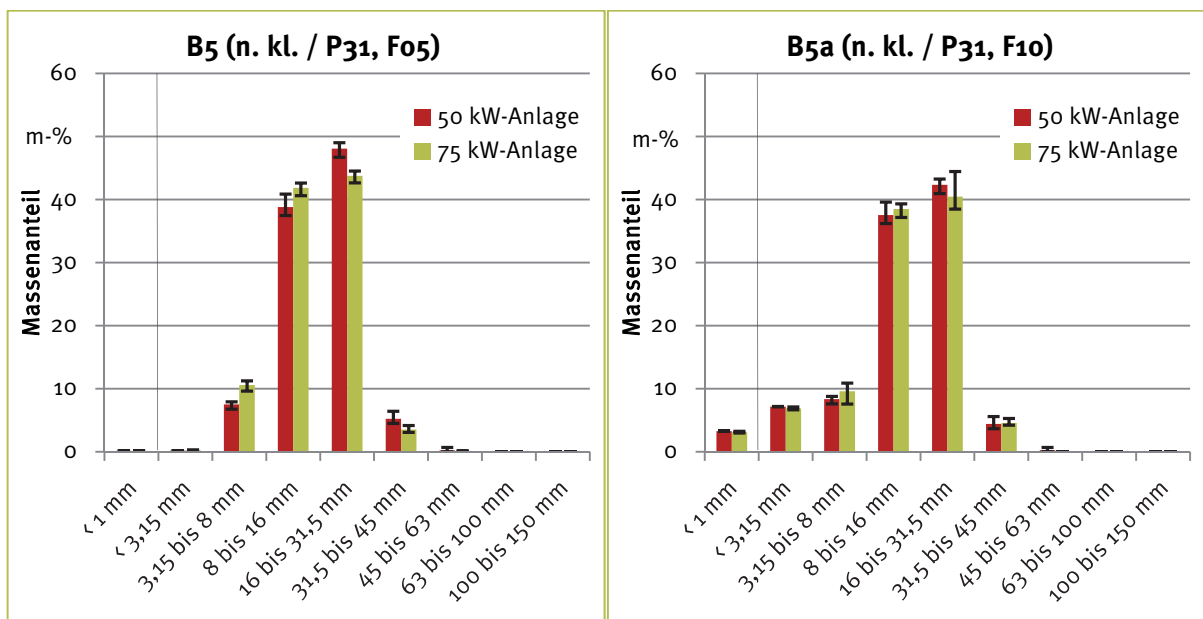


Abbildung 16 Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B5 (links) und B5a (rechts)

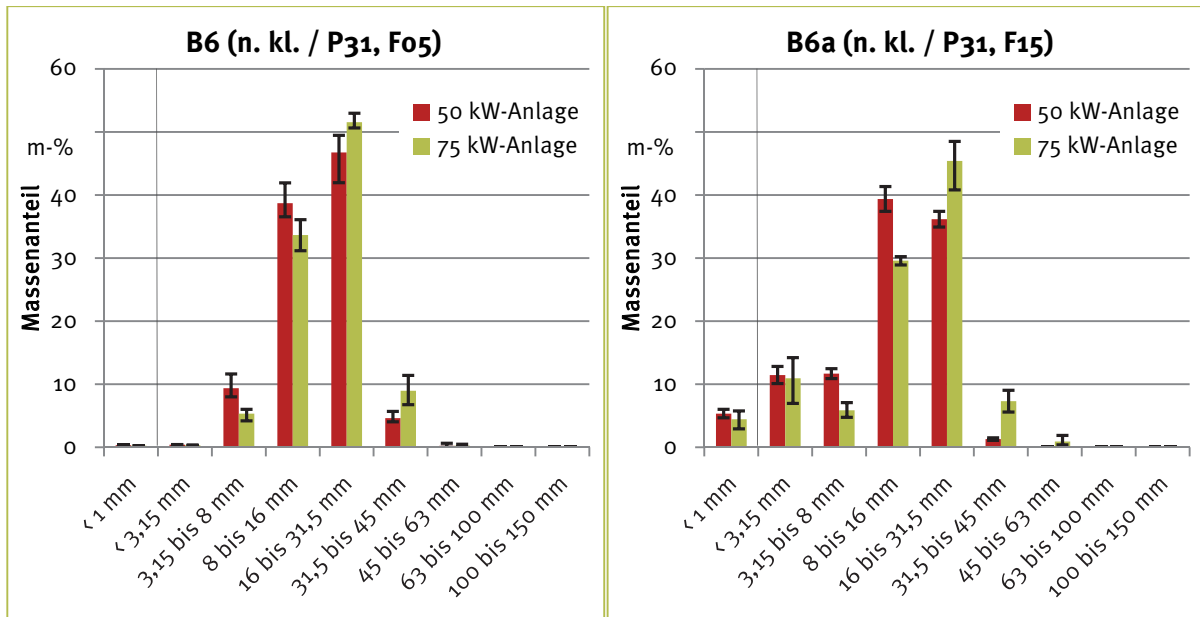


Abbildung 17 Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B6 (links) und B6a (rechts)

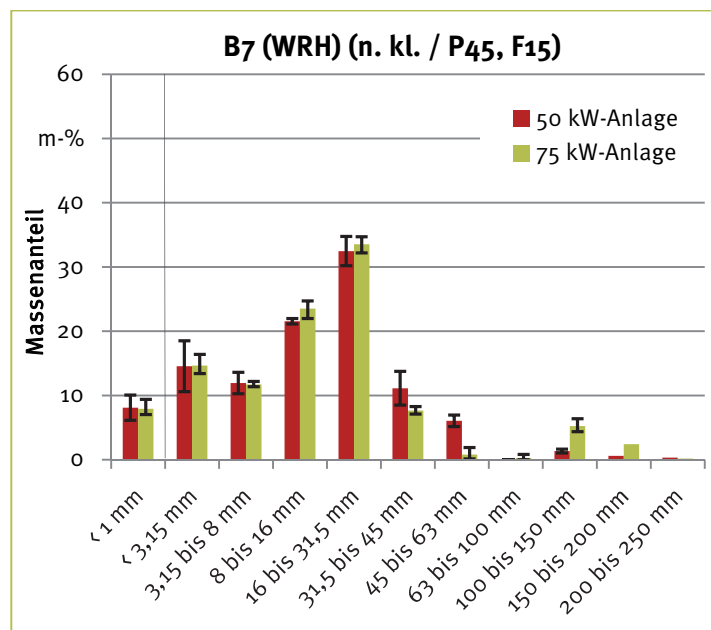


Abbildung 18 Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Brennstoffe, Teilchargen für 50 kW-Anlage und 75 kW-Anlage im Vergleich, B7 (Waldrestholz)

Im Vergleich der Teilchargen für die beiden Feuerungsanlagen stellt man fest, dass eine weitgehende Übereinstimmung der Partikelgrößenverteilung vorliegt, so dass man in der Hinsicht von ausreichend gleichwertigen Voraussetzungen ausgehen kann. Eine leichte Tendenz zur Verschiebung in Richtung höherer Anteile in den kleineren Fraktionen ist bei einigen Chargen von der 50 kW-Anlage auszumachen, z. B. bei B1 und B2. An der 50 kW-Anlage wurden Proben mit einem Volumen von 8 l entnommen und anschließend analysiert, von der 75 kW-Anlage

wurden jeweils 24 l-Proben entnommen und analysiert. Möglicherweise führte das geringe Probenvolumen zu einer leichten Diskriminierung der größeren Partikel, was sich auch in den Überlängen widerspiegelt. Für die meisten Brennstoffe wurden als längste Partikel in den Teilchargen an der 75 kW-Anlage etwas längere Teile gefunden, nur für B7 waren die Ergebnisse gleich und für B1 wurde in einer Probe von der 50 kW-Anlage ein längerer Partikel identifiziert.

Da die Kriterien zur Klassifikation der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-4 nicht völlig identisch sind, wurden Einstufungen nach beiden Normen vorgenommen und zusätzlich mit der Deklaration der Brennstoffe sowie der Zuordnung gemäß der Hauptfraktion miteinander verglichen (siehe Tabelle 11).

**Tabelle 11: Vergleich der Partikelgrößenklassen-Klassifikationen nach Deklaration und nach DIN EN ISO 17225 Teil1 bzw. Teil 4 sowie die Anteile der Hauptfraktion<sup>a)</sup>**

Brennstoff Nr.	Partikelgrößenklasse P			Anteil Hauptfraktion gemäß Klasse <sup>b)</sup>			Gründe für Differenz zwischen P (17225-1) und P (17225-4) (grau unterlegt)
	Deklaration	Analysiert und klassifiziert nach (17225-1)	Analysiert und klassifiziert nach (17225-4)	P16 m-%	P31 m-%	P45 m-%	
B1	P16S	P16	P31S	<b>98,0%</b>	98,0%	98,0%	<b>72 mm; 2,5 cm<sup>2</sup></b>
B2	P16S	P16	P31S	<b>97,2%</b>	97,2%	97,2%	<b>95 mm, 1,9 cm<sup>2</sup></b>
B3	P31S (G30)	P16	P31S	<b>70,3%</b>	96,3%	97,3%	<b>130 mm, 6,0 cm<sup>2</sup></b>
B4	P31S	P16	P31S	<b>66,1%</b>	96,2%	96,8%	<b>142 mm, 10 cm<sup>2</sup></b>
B4a	---	P31	P45S	<b>61,9%</b>	90,4%	91,0%	171 mm <sup>c)</sup> , 2,9 cm <sup>2</sup>
B4b	---	P31	n. kl.	55,6%	<b>79,8%</b>	80,3%	142 mm, 3,6 cm <sup>2</sup> , <b>FG 19,7%</b>
B5	P45	P31	n. kl.	52,4%	<b>96,2%</b>	99,7%	<b>151 mm, 15 cm<sup>2</sup></b>
B5a	---	P31	n. kl.	48,1%	<b>88,6%</b>	93,1%	115 mm, <b>10 cm<sup>2</sup></b>
B6	P45	P31	n. kl.	39,0%	<b>90,5%</b>	99,5%	126 mm, <b>16 cm<sup>2</sup></b>
B6a	---	P31	n. kl.	35,4%	<b>80,8%</b>	88,2%	86 mm, <b>6,1 cm<sup>2</sup></b>
B7	k. A.	P45	n. kl.	35,2%	<b>68,8%</b>	76,4%	<b>208 mm, 8,5 cm<sup>2</sup></b>

- a) Es wurden die Ergebnisse der Untersuchung der Chargen für die 75 kW-Anlage (Probenvolumen 24 l) verwendet
- b) Für die Zuordnung zu einer Partikelgrößenklasse muss die Hauptfraktion mindestens 60 m-% umfassen.
- c) Die Überlänge führte zu Klassifikation als P31 nach DIN EN ISO 17225-1.
- Deklaration kann nicht angegeben werden, da Feingutanteil für die Versuche zugemischt wurde.
- k. A. keine Angaben des Lieferanten

Sehr auffällig war, dass die Klassifikation nach Teil 4 der Norm durchweg eine Klasse höher lag als nach Teil 1 oder eine Klassifikation nicht möglich war. Dabei spiegelt die Klasse nach Teil 1 in den meisten Fällen auch die Zuordnung wider, die entsprechend der Hauptfraktion vorgenommen würde. In der letzten Spalte von Tabelle 11 sind die Gründe für die unterschiedliche Einstufung aufgeführt, wo auch deutlich wird, dass Überlängen bzw. zu große Querschnittsflächen die häufigsten Ursachen darstellen.

### 3.4 Veränderung der Brennstoff-Wassergehalte über die Dauer der Versuchsperioden

Die Wassergehalte der einzelnen Brennstoffe wurden zunächst bei Anlieferung bestimmt. Zusätzlich wurden Proben an den einzelnen Versuchstagen entnommen, um den aktuellen Wassergehalt der Teilcharge zum Zeitpunkt eines Feuerungsversuches zu ermitteln. Die Wassergehalte und ihre Veränderung sind in Abbildung 19 wiedergegeben.

In den meisten Fällen lagen nur sehr kleine Abweichungen zwischen dem Wassergehalt bei Anlieferung und zum Zeitpunkt des Versuches vor. Die Brennstoffe B<sub>3</sub> und B<sub>4</sub> wurden deutlich vor dem Beginn der Feuerungsversuche an der 75 kW-Anlage geliefert, was offensichtlich zu einer Abnahme des Wassergehaltes in Brennstoff B<sub>4</sub> (und B<sub>4a</sub> / B<sub>4b</sub>) sowie zu einer Wassergehaltszunahme bei dem ursprünglich sehr trockenen Material B<sub>3</sub> geführt hat. Für Brennstoff B<sub>4</sub> konnte eine eindeutige Tendenz festgestellt werden, dass der Wassergehalt über die Versuchsdauer kontinuierlich absank. Der Wassergehalt von Brennstoff B<sub>2</sub> schwankte zwischen den einzelnen Proben deutlich stärker als in den übrigen Versuchen, d. h. hier lag ein inhomogener Brennstoff vor.

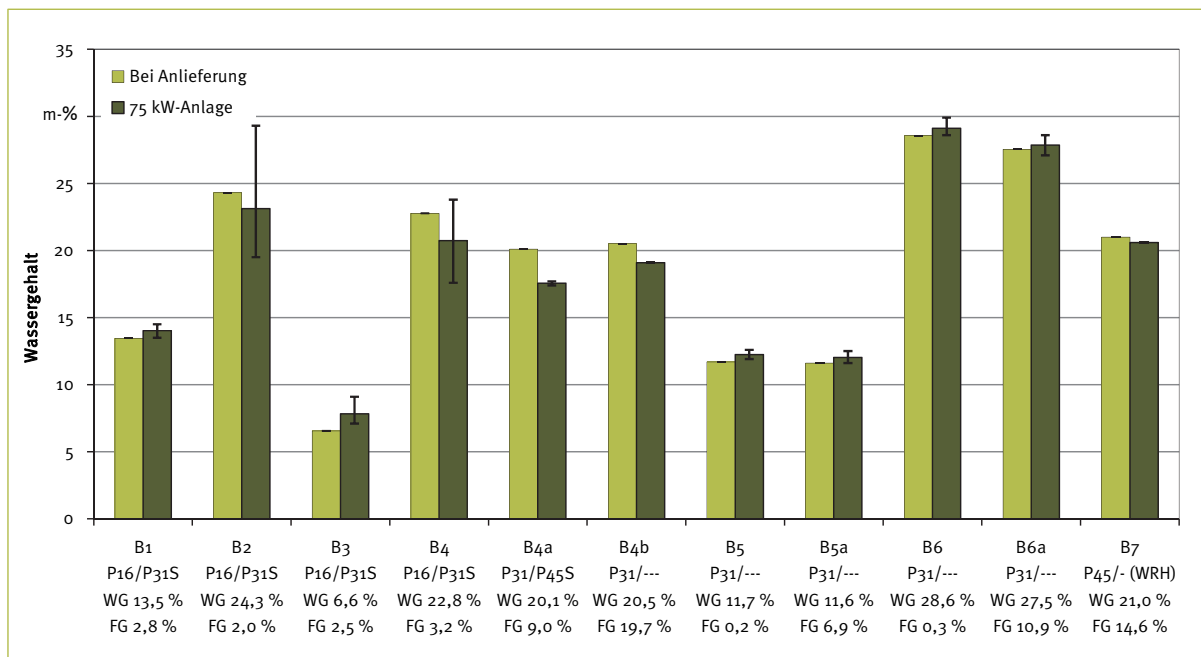


Abbildung 19 Wassergehalte der verschiedenen Brennstoffe bei Anlieferung und zu den Versuchszeitpunkten an der 75 kW-Anlage

### 3.5 Untersuchungen zum Gehalt an Aerosolbildnern

Einige Elemente (Kalium, Natrium, Zink, Blei) werden aufgrund ihres leichter flüchtigen Verhaltens zu den Aerosolbildnern gerechnet, die den wesentlichen Teil der mineralischen Bestandteile der Flugasche und damit der Staubemissionen bilden. Da Blei im Vergleich zu den anderen Elementen in vernachlässigbar geringen Konzentrationen auftritt, wurde es nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt.

Mit den Angaben und den Emissionsdaten aus Teilvorhaben 2 soll untersucht werden, ob eine entsprechende Korrelation zwischen Staubemissionen und Gesamtgehalt an Aerosolbildnern besteht. Hier wurde außerdem untersucht, wie das Verhältnis zwischen der Summe der Aerosolbildner und dem Gesamtaschegehalt ist. Wie die in Abbildung 20 dargestellten Ergebnisse zeigen, lässt sich keine Korrelation ableiten, d. h. eine gezielte Analyse der einzelnen Elemente zusätzlich zur Bestimmung des Aschegehaltes ist unumgänglich, wenn die Information über den Gehalt an Aerosolbildnern benötigt wird.

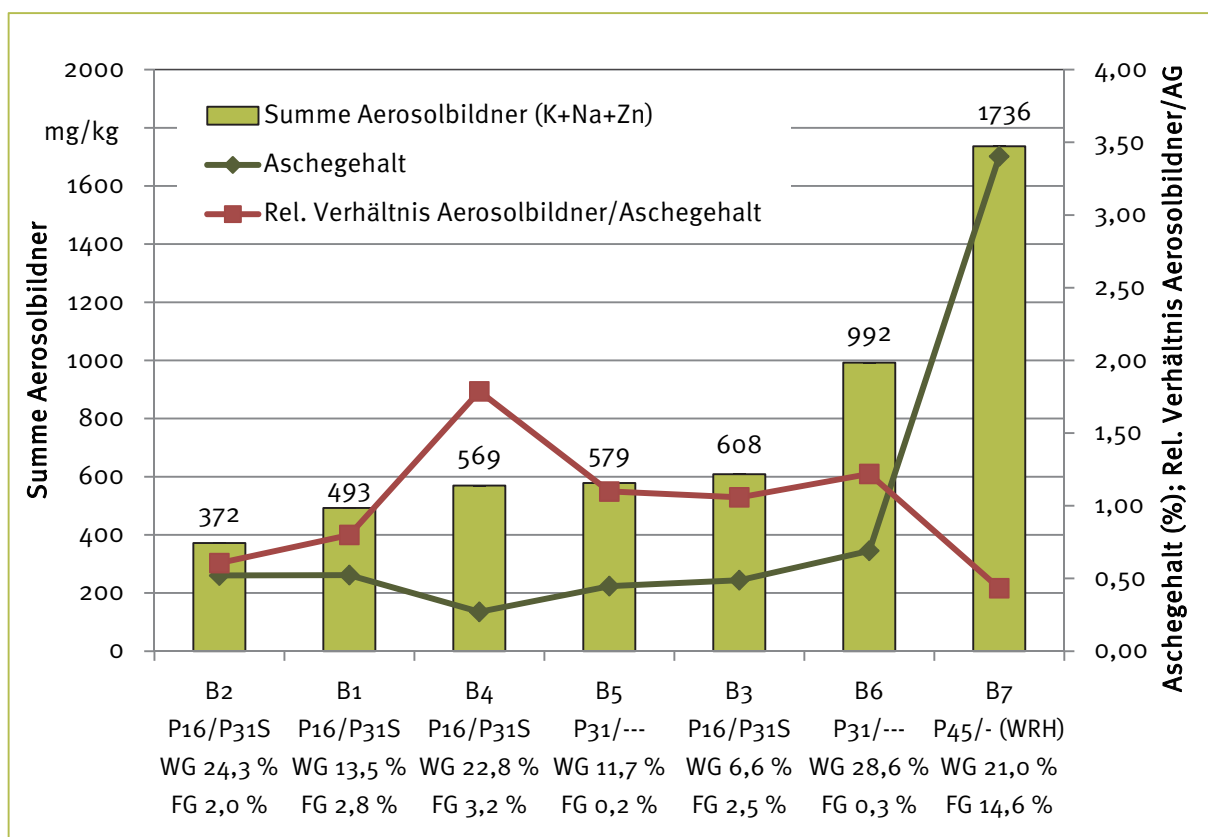


Abbildung 20 Gehalte an Aerosolbildnern, Aschegehalte und deren relatives Verhältnis in den untersuchten Hackschnitzeln (sortiert nach steigendem Gehalt an Aerosolbildnern)

### 3.6 Charakterisierung der Brennstoff-Aschen

Bei den Feuerungsversuchen an der 75 kW-Anlage, die in Teilvorhaben 2 durchgeführt wurden, war es möglich, die Rostaschen separat von jedem Feuerungsversuch zu gewinnen, so dass diese einzeln untersucht werden konnten. Die Flugasche wird in der Anlage zwar getrennt von der Rostasche aufgefangen, die anfallenden geringen Mengen haben allerdings keine getrennte Sammlung erlaubt. Daher wurde die Flugasche nicht mit untersucht.

Die Gehalte der Nährstoffelemente sind für alle Brennstoffe auf einem sehr ähnlichen Niveau, wie in Abbildung 21 zu sehen ist. Lediglich die Natrium-Gehalte der Brennstoffe B1 und B2 (ab Versuch Nr. 51) sind erhöht. In Abbildung 21 sind die Ergebnisse in chronologischer Reihenfolge der Versuche dargestellt. Die chronologische Reihenfolge der Darstellung der Versuche wurde gewählt, da für die Schwermetalle Zink und Blei ein Trend abnehmender Gehalte mit zunehmender Versuchsdauer feststellbar war (siehe Abbildung 22).

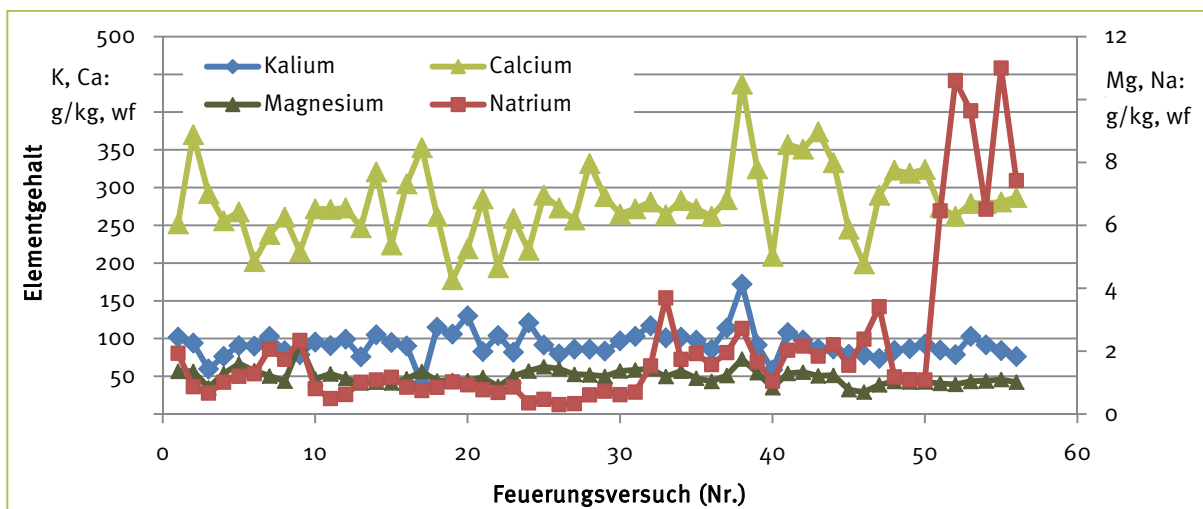
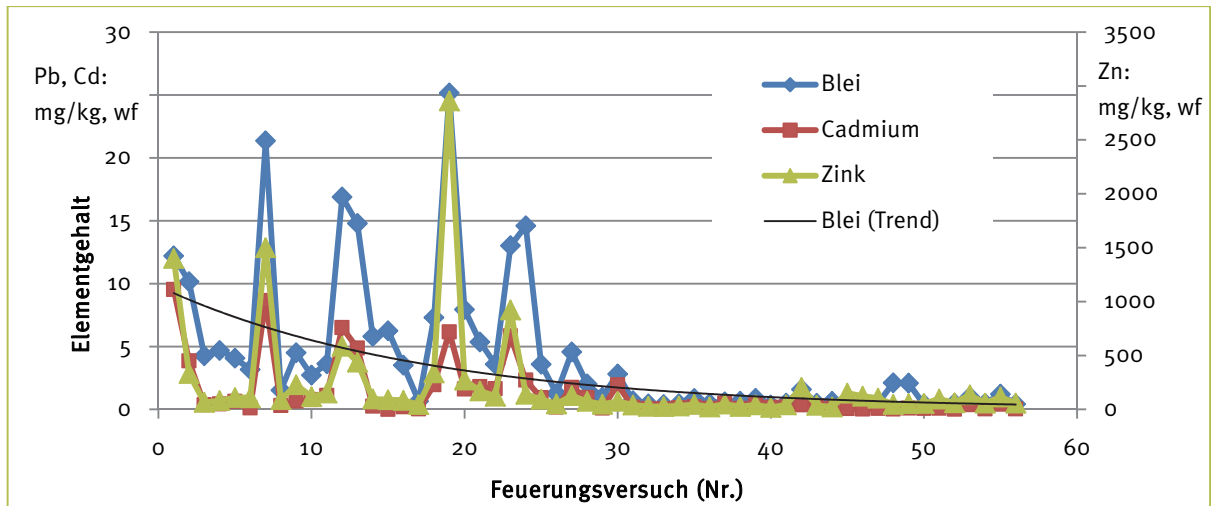


Abbildung 21 Gehalte an Nährstoffelementen in den Rostaschen aus 56 Feuerungsversuchen an der 75 kW-Anlage; Versuche chronologisch sortiert, 1. Phase Nr. 1-23 und 2. Phase Nr. 24-56)

Die erhöhten Blei-, Cadmium- und Zink-Gehalte wurden in den Rostaschen der Brennstoffe B3 und B4, die zu Beginn der Versuchsreihe eingesetzt wurden, festgestellt. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Feuerungsanlage vor Versuchsbeginn mit Pellets betrieben wurde, die aus dem Harz stammen, ebenso wie die Hackschnitzel B4. Da die Böden im Harz durch jahrhundertelangen Bergbau mit Schwermetallen belastet sind, ist es möglich, dass erhöhte Schwermetallgehalte in den ersten Versuchen mit dem Brennstoff B3 durch noch vorhandene Kontaminationen aus dem Ascheaustragssystem und anschließend durch den Neueintrag mit Brennstoff B4 aufgetreten sind. Im Anschluss setzte anscheinend eine längerfristige Reinigung des Ascheaustragssystems durch die Verwendung unbelasteter Brennstoffe ein. Die höhere Belastung des Brennstoffes B4 gegenüber B3 ist auch in der Analyse der Brennstoffe sichtbar (siehe Tabelle 9), wobei auch der Wert mit 0,94 mg/kg noch deutlich unter dem in DIN EN ISO 17225-4 genannten Grenzwert von 10 mg/kg für Blei liegt.



**Abbildung 22** Schwermetall-Gehalte in den Rostaschen aus 56 Feuerungsversuchen an der 75 kW-Anlage; Versuche chronologisch sortiert, 1. Phase Nr. 1-23 und 2. Phase Nr. 24-56)

Die deutlich höhere Blei-, Cadmium- und Zink-Belastung der Rostaschen aus Versuchen mit den Brennstoffen B<sub>3</sub> und B<sub>4</sub> im Vergleich zu den Gehalten in den Rostaschen aus den übrigen Versuchen ist auch in Tabelle 12 dargestellt. Dabei fällt außerdem eine sehr starke Streuung der Werte auf. Die große Streuung der Werte spricht auch dafür, dass der Ascheaustrag nicht so gleichmäßig stattfindet und so scharf versuchsweise abgrenzbar ist, dass eine eindeutige Zuordnung zu dem jeweiligen Brennstoff nur über längere Versuchszeiträume zuverlässig möglich wäre.

**Tabelle 12:** Schwermetallgehalte in Rostaschen aus Feuerungsversuchen an 75 kW-Anlage

Brennstoff	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
B1	1,01	(0,40 – 2,11)	0,07	(0,02 – 0,11)	69,2	(46,2 – 104)
B2	0,70	(0,41 – 1,21)	0,16	(0,03 – 0,41)	77,0	(57,6 – 135)
B3	6,60	(2,72 – 16,9)	2,19	(0,11 – 9,53)	259	(50,2 – 1400)
B4	8,78	(1,53 – 25,2)	2,65	(0,20 – 8,66)	564	(170 – 2860)
B5	0,83	(0,35 – 2,02)	0,27	(0,08 – 0,94)	53,5	(18,5 – 74,6)
B6	0,90	(0,38 – 2,82)	0,40	(0,05 – 1,95)	40,7	(26,3 – 74,4)
B7	0,51	(0,36 – 0,66)	0,04	(0,02 – 0,06)	136	(122 – 150)



## 4 Emissionsmessungen und Leistungsermittlung

Die Feuerungsversuche wurden in 2 Phasen durchgeführt. Die erste Phase diente der Ermittlung der optimalen Parameter der Verbrennungssteuerung unter dem Aspekt der Minimierung der Emissionen (Kapitel 4.1). In der zweiten Phase wurden Emissionsversuche mit der optimierten Verbrennungssteuerung und verschiedenen Brennstoffen durchgeführt um den Einfluss der Brennstoffe auf das Emissionsverhalten zu bestimmen (Kapitel 4.2).

Für Staubemissionen erfolgt die Darstellung jeweils in  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , was eine detailliertere Betrachtung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Betriebszuständen bzw. Brennstoffen zulässt, als die Darstellung in  $\text{g}/\text{Nm}^3$  mit zwei Nachkommastellen, wie sie entsprechend der 1. BImSchV erfolgt. Für eine Beurteilung von Grenzwertüberschreitung muss diese Rundung und Umrechnung der Einheit jeweils noch vorgenommen werden.

### 4.1 Optimierung der Verbrennungsführung bezüglich der Emissionen

#### 4.1.1 Staubemissionen

Primäres Ziel der ersten Versuchsphase war die Optimierung der Verbrennungssteuerung in Bezug auf die Minimierung der Staubemissionen. Für diese Versuche wurden die Brennstoffe B<sub>3</sub> und B<sub>4</sub> eingesetzt. Im Gegensatz zu der 75 kW-Feuerungsanlage, an der nur das Primärluft/Sekundärluftverhältnis mechanisch verändert werden konnte, waren am TFZ für die 50 kW-Anlage noch weitere Änderungen der Verbrennungsbedingungen möglich. Für die 50 kW-Anlage bestand die Möglichkeit, neben der Standard-Kesseleinstellung die Primärluftzufuhr und den Sollwert für den Sauerstoffgehalt getrennt voneinander zu variieren.

In Abbildung 23 zeigen die Messungen nach VDI 2066, dass die in der Abbildung eingerahmte Einstellung ( $\text{O}_2$  Soll +2 %/ Primärluft -5 %) zu präferieren ist. Die ersten sechs Messungen mit dem Wöhler-Gerät für Brennstoff B<sub>3</sub> konnten aufgrund messtechnischer Probleme nicht verwendet werden. Für die letzten drei Messungen liegen die Werte beider Messverfahren relativ nahe beieinander, so dass die fehlenden Daten des Wöhler-Gerätes kein Problem für die Beurteilung der Staubemissionen darstellen.

In Abbildung 24 ergibt sich für Brennstoff B<sub>4</sub> ein ähnliches Bild: Die rechts im Bild dargestellte Einstellung ( $\text{O}_2$  Soll + 2 %, Primärluft – 5 %) ist mit  $16 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  (Wöhler-Messgerät) bzw.  $24 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  (Bestimmung nach VDI 2066) diejenige mit den geringsten Staubemissionen. Nach den Werten des Wöhler-Gerätes zu urteilen, hält hier auch der feuchtere Brennstoff den Grenzwert ein, dies gilt ebenfalls für die Einstellung „Primärluft - 5 %“, ohne Änderung der Standardeinstellung für die Primärluft.

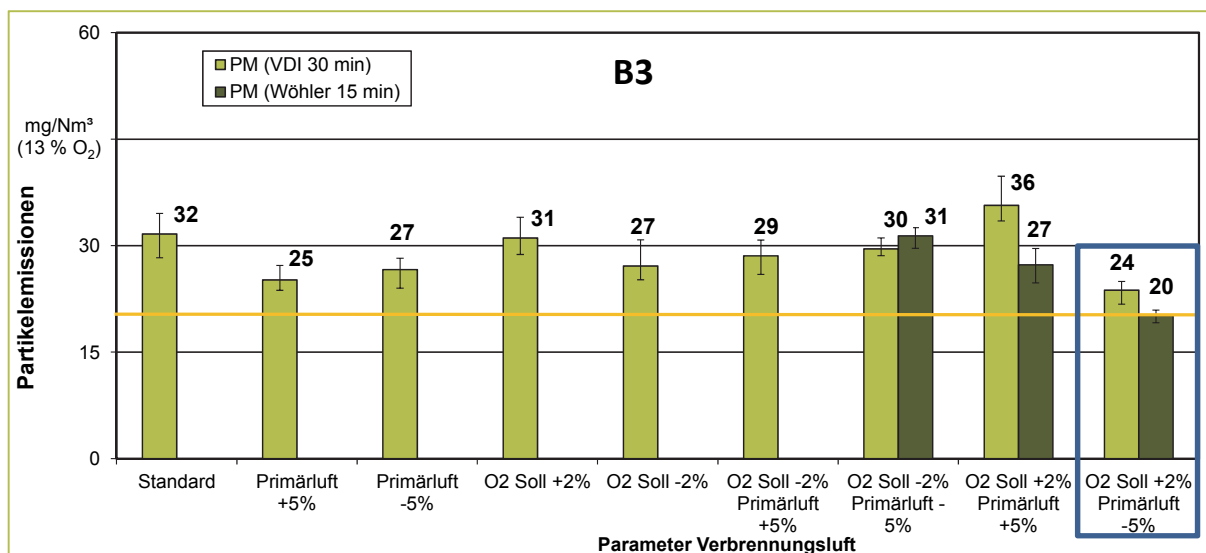


Abbildung 23: Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B<sub>3</sub> (P<sub>31</sub>S, WG7%, FG2,5%) bei Vollast

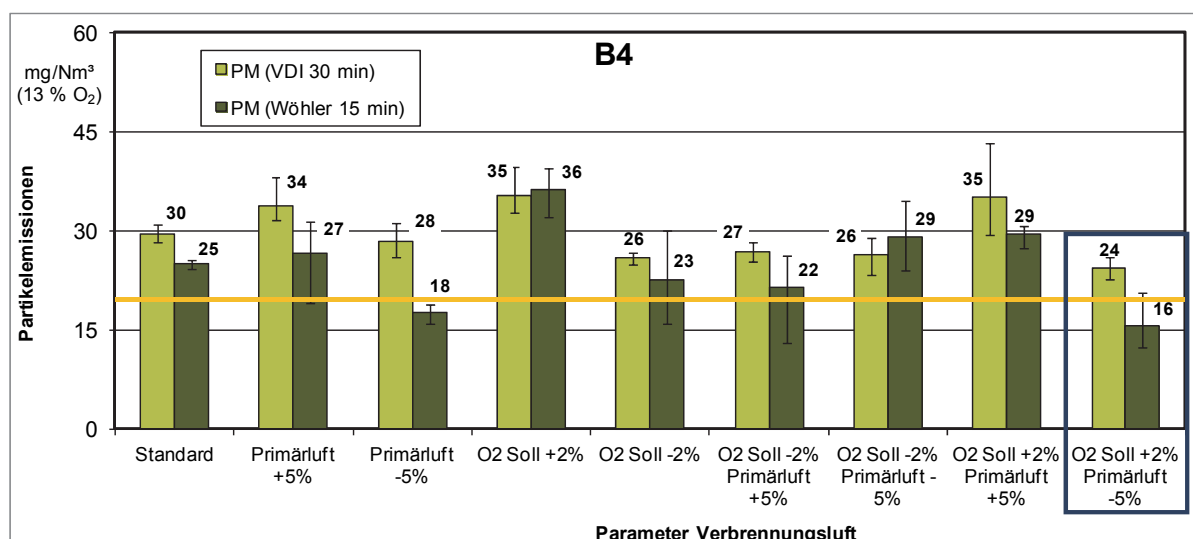


Abbildung 24: Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B<sub>4</sub> (P<sub>31</sub>S, WG23%, FG3,2%) bei Vollast

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen für die 50 kW-Anlage deutlich erhöhte Staubemissionen bei den Versuchen im Teillastbetrieb. Das Optimum liegt hier bei den Einstellungen „Primärluft -5 %“, bzw. „O<sub>2</sub> Soll -2 %/Primärluft -5 %“, allerdings liegt das Niveau der Staubemissionen erheblich höher als für die Vollastversuche, teilweise mit 10-facher Überschreitung des Grenzwertes der 1. BImSchV. Es fällt auf, dass das Niveau der Staubemissionen für Brennstoff B<sub>4</sub> deutlich niedriger ist als für Brennstoff B<sub>3</sub>, obwohl auch in diesem Fall der Staub-Grenzwert mit allen Einstellungen überschritten wird.

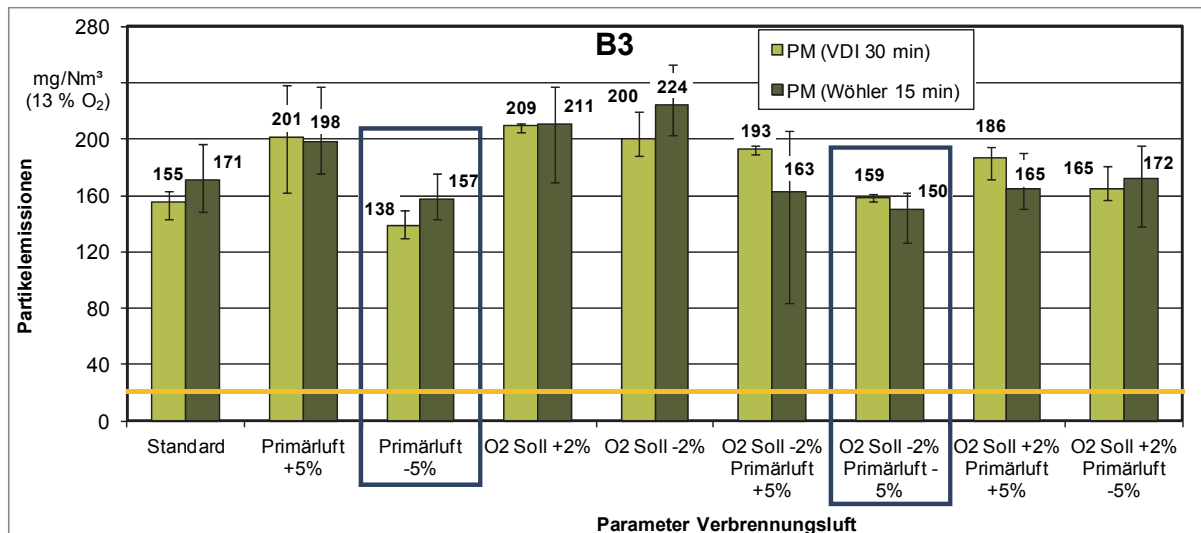


Abbildung 25: Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B<sub>3</sub> (P<sub>31</sub>S, WG7%, FG2,5%) bei Teillast

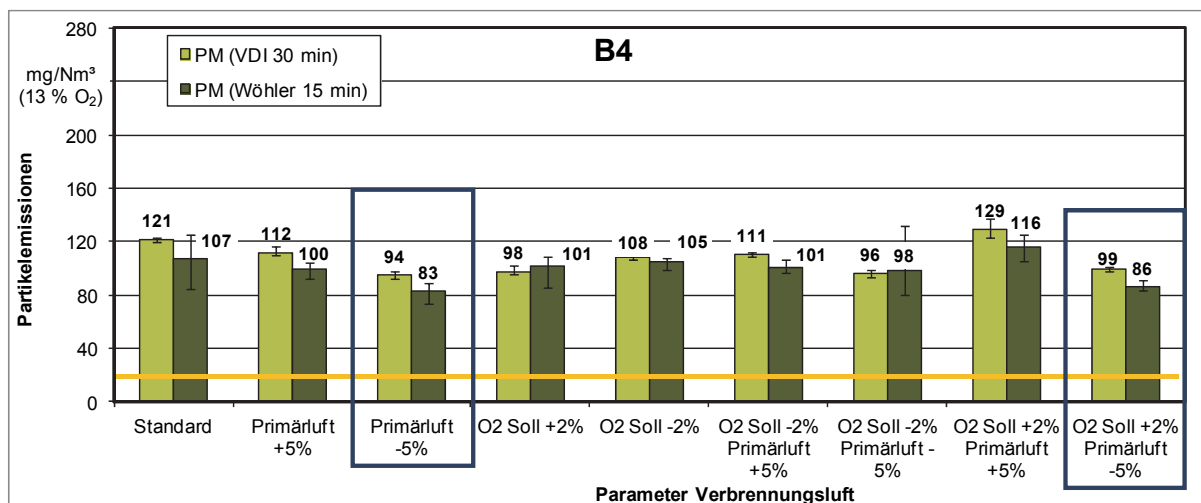
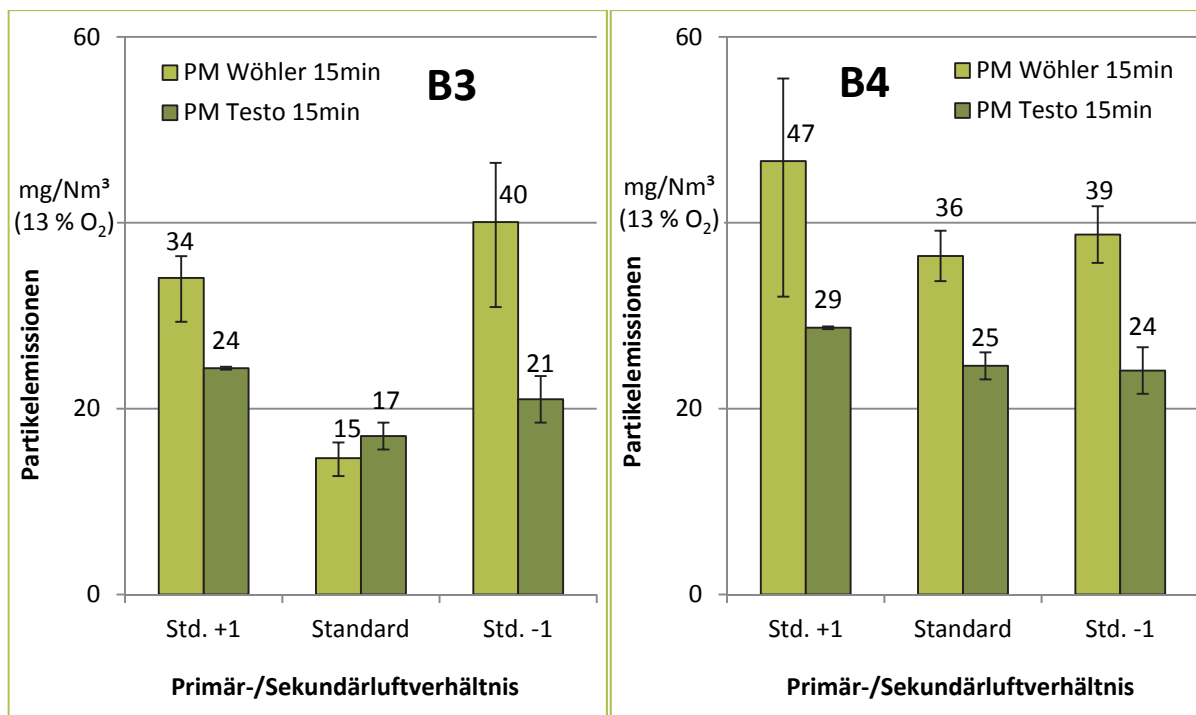


Abbildung 26: Vergleich der Staubemissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B<sub>4</sub> (P<sub>31</sub>S, WG23%, FG3,2%) bei Teillast

Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse der Staubmessungen an der 75 kW-Feuerungsanlage mit dem Wöhler SM 87 und dem Testo 380 bei empfohlenem Primär-/Sekundärluftverhältnis (Standard), und der nächsthöheren (Std. +1) bzw. nächstniedrigeren (Std. -1) Einstellung im Volllastbetrieb. Verwendet wurden Brennstoff B<sub>3</sub> (Abbildung 27, links) mit der Größenklassifikation P<sub>31</sub>S, einem mittleren Wassergehalt von 7 m-% und einem Feingutanteil von 3,2 m-% sowie Brennstoff B<sub>4</sub> (P<sub>31</sub>S, WG 23 m-%, FG 3,2 m-%) (Abbildung 27, rechts).

Vergleicht man die Ergebnisse für beide Brennstoffe, fällt auf, dass bei den Versuchen mit Brennstoff B<sub>3</sub> tendenziell niedrigere Staubemissionen entstanden sind als mit Brennstoff B<sub>4</sub>.

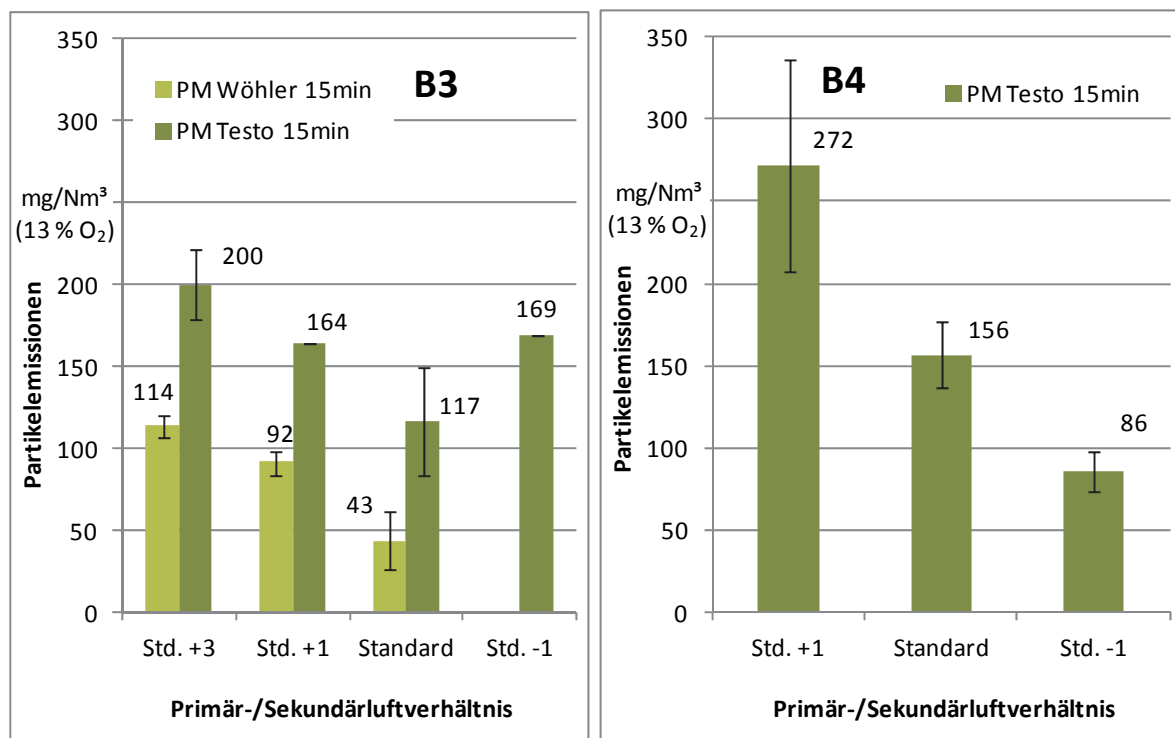


**Abbildung 27: Vergleich der Staubemissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär-/Sekundärluftverhältnis und veränderter Einstellung ( $\pm 1$  Stufe) bei Volllast: Brennstoff B3 (P31S, WG7%, FG2,5%) (links) Brennstoff B4 (P31S, WG23%, FG3,2%) (rechts)**

Bei der herstellerseitig empfohlenen Einstellung des Verbrennungsluftverhältnisses (Standard) weist die Verbrennung des Brennstoffs B3 die geringste Staubemission auf. Mit  $15 \text{ mg/Nm}^3$  (Wöhler) bzw.  $17 \text{ mg/Nm}^3$  (Testo), jeweils bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13 %, wird der Grenzwert von  $20 \text{ mg/Nm}^3$  unterschritten. Erhöht man die Einstellung um eine Stufe, steigen die Staubemissionen auf  $34$  bzw.  $24 \text{ mg/Nm}^3$ , setzt man sie um eine Stufe herab, steigen die Staubemissionen ebenfalls, auf  $40$  bzw.  $21 \text{ mg/Nm}^3$  (jeweils Wöhler- bzw. Testo-Werte).

Der zweite Brennstoff B4 liefert ein ähnliches Ergebnis, wenn auch der Grenzwert nicht eingehalten wird (Abbildung 27, rechts). Der Unterschied zum vorher betrachteten Brennstoff B3 besteht im erhöhten Wassergehalt von im Mittel 23 m-% (gegenüber 7 m-%), die Größenklassifikation P31S stimmt bei beiden Brennstoffen überein und auch der Feingutanteil ist mit 3,2 m % sehr ähnlich. Der Staubmessung mit dem Wöhler-Gerät nach zu urteilen, ist wieder die Standardeinstellung zu favorisieren. Die Werte vom Testo-Gerät liegen nahe beieinander, der niedrigste Wert ( $24 \text{ mg/Nm}^3$ ) ergibt sich hier bei der um eins erniedrigten Einstellung gegenüber dem Werte von  $36 \text{ mg/Nm}^3$  bei Standardeinstellung, gemessen mit dem Wöhler-Gerät. Jedoch streuen die Testo-Werte bei Standardeinstellung weniger stark als bei „Std. -1“, weswegen nur der Mittelwert des Testo eine leichte Tendenz in Richtung niedrigerer Einstellung zeigt. Nicht untersucht wurde, ob die Staubemissionen bei niedrigstmöglicher Einstellung ebenfalls wieder ansteigen.

Abbildung 28 zeigt die Ergebnisse der Staubmessungen bei Standard-Primär-/ Sekundärluftverhältnis sowie bei veränderten Einstellungen (Standard +3, +1 und Standard -1) für den Brennstoff B<sub>3</sub> (links) und B<sub>4</sub> (rechts) im Teillastbetrieb. Während bei Volllast (100 %) die Staubemissionen zumindest bei einem der untersuchten Brennstoffe unterhalb des Grenzwertes lagen, steigen die Staubmengen im Teillastbetrieb deutlich an. Selbst bei Betrachtung der durchweg niedrigeren Werte des Wöhler-Gerätes für Brennstoff B<sub>3</sub> wurde der Grenzwert für Staubemissionen um mehr als 100 % überschritten (43 mg/Nm<sup>3</sup> bis 114 mg/Nm<sup>3</sup>). Für die Einstellung „Std. -1“ stehen in Abbildung 28 (links) leider keine „Wöhler“-Daten zur Verfügung, weshalb nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, ob sich der Trend in Richtung niedrigerer Primärluftanteile fortsetzt oder, wie bei den Testo-Messwerten für Brennstoff B<sub>3</sub>, einen erneuten Trend nach oben ausweist – die zeitgleich aufgenommenen CO-Emissionswerte (Abbildung 33 links) zeigen allerdings für die Einstellung „Std. -1“ bereits wieder einen Trend nach oben, was auf eine Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen hinweist und höhere Staubemissionswerte erwarten lässt. Die zusätzlich betrachtete Einstellung „Std. +3“ zeigt auf der anderen Seite, dass vom Verbrennungsoptimum in Richtung höherer Primärluftzufuhr ebenfalls eine Zunahme der Emissionen aufgetreten ist, d. h. mit beiden Messsystemen war eine steigende Staubemission um fast ein Viertel zu verzeichnen. Hier stützen die Daten die These, dass im Bereich der Standardeinstellung das Optimum für das Primärluft/Sekundärluftverhältnis liegt und die Staubemissionen bei Abweichungen von diesem Verhältnis ansteigen.



**Abbildung 28: Vergleich der Staubemissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär/ Sekundärluftverhältnis im Teillastbetrieb sowie veränderter Einstellung (Stufen +3, +1 und -1) für**  
 links: Brennstoff B<sub>3</sub> (P<sub>31</sub>S, WG7%, FG2,5%)  
 rechts: Brennstoff B<sub>4</sub> (P<sub>31</sub>S, WG23%, FG3,2%)

An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Lastzustand von 30 % der Maximalleistung einen extremen Betriebspunkt darstellt und im realen Betrieb äußerst selten vorkommen dürfte. Bei Einsatz eines Pufferspeichers liegt der Modulationsbereich des Kessels dauerhaft im Bereich von 60% - 100%. Ohne Pufferspeicher würde der Kessel unter Umständen häufiger in niedrigere Leistungsbereiche kommen – gemäß der Herstellerspezifikation ist der Lastbetrieb bis 30 % möglich. Wie die Messungen zeigen, erhöhen sich in diesem Lastbereich die Emissionen deutlich. Für die Zielsetzung des Projekts - bestehende oder zukünftige Grenzwerte ohne bauliche Veränderungen einzuhalten - wurde deshalb bei den Versuchsreihen der zweiten Versuchsphase weitgehend auf Teillastbetrieb verzichtet.

Nach Auswertung der Emissionsmessung aus den Versuchsreihen in Volllast wurde für den 75 kW-Kessel (Schladen) tendenziell eine Verringerung der Staubemissionen hin zu einem niedrigeren Primärluftanteil festgestellt. Die vom Hersteller empfohlene Standardeinstellung (Klappenstellung 4) wurde als optimale Einstellung identifiziert und als Standardeinstellung für die Verbrennungsversuche der zweiten Versuchsphase übernommen.

Für die 50 kW-Anlage am TFZ (Straubing) wurde analog hierzu die Einstellung „O<sub>2</sub> Soll +2 %, Primärluft -5 %“ als Verbrennungsoptimum mit niedrigen Staubemissionen identifiziert. Hier konnte mit beiden untersuchten Brennstoffen der Grenzwert eingehalten werden, an der 75 kW-Anlage traf dies nur auf den trockeneren Brennstoff B3 zu.

#### 4.1.2 Kohlenmonoxid-Emissionen

Zur Optimierung der Verbrennungsparameter wurden neben den Staubemissionen auch die CO-Emissionen betrachtet. Diese sind für die Versuche mit den Brennstoffen B3 und B4 im Voll- und Teillastbetrieb in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

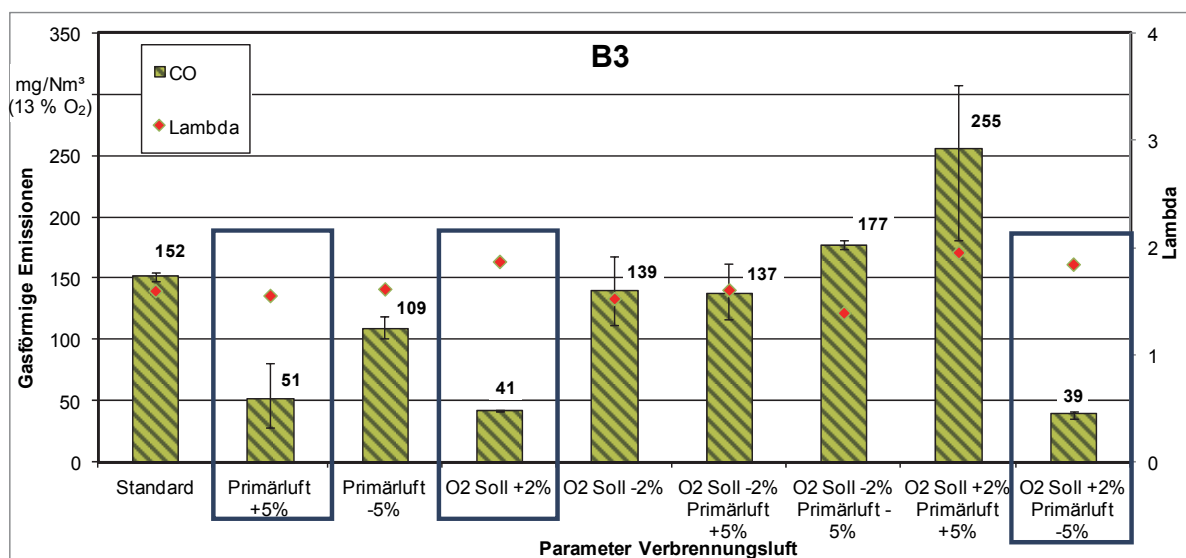
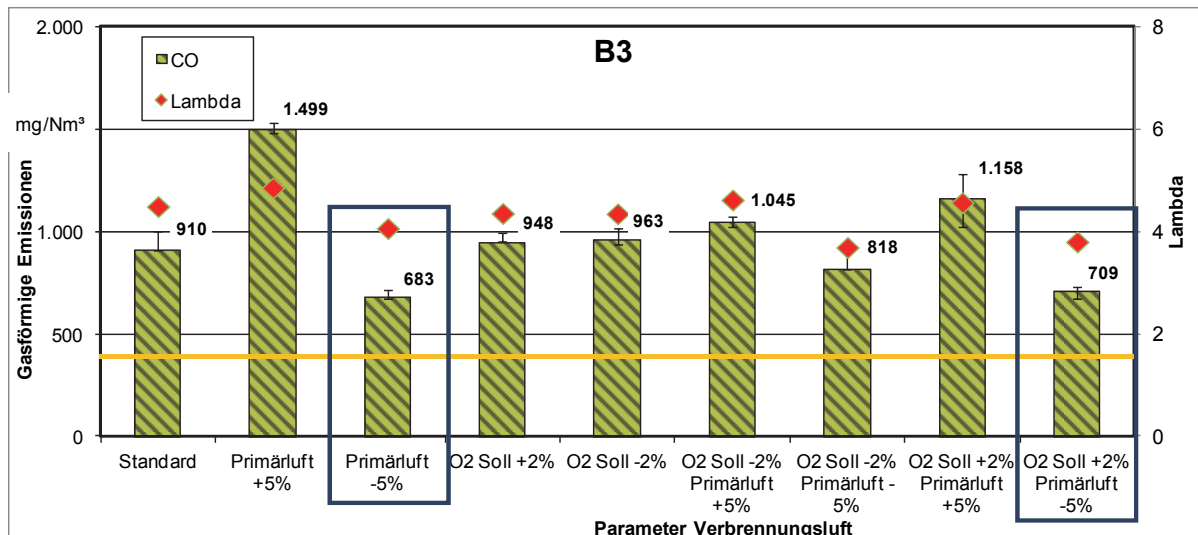
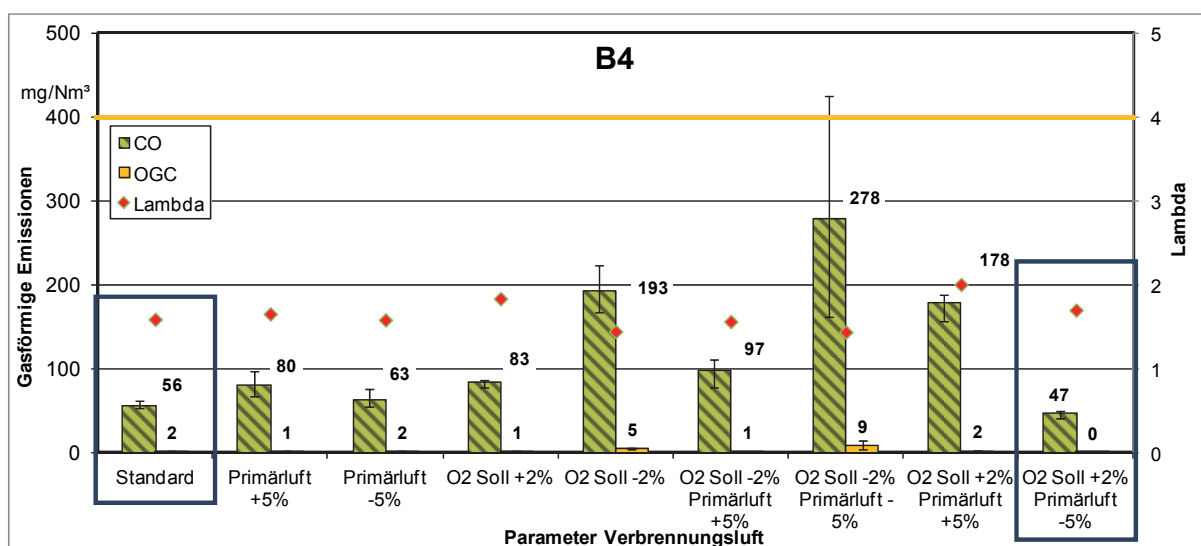


Abbildung 29: Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B3 (P<sub>31</sub>S, WG7%, FG2,5%) bei Volllast

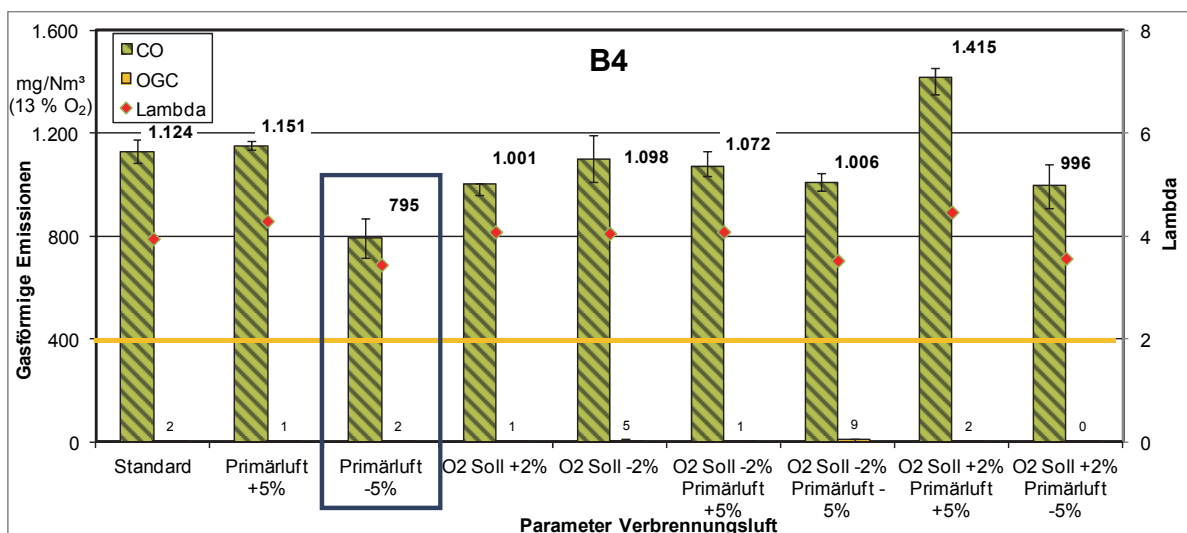


**Abbildung 30: Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B3 (P<sub>31</sub>S, WG7%, FG<sub>2,5</sub>%) bei Teillast**

Im Volllastbetrieb (Abbildung 29) wird der Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Nm<sup>3</sup> bei allen Einstellungen des Primär-/Sekundärluftverhältnisses eingehalten, wobei mit der Einstellung (O<sub>2</sub> Soll +2 %/Primärluft -5 %) die niedrigsten CO-Emissionen erzielt wurden, ähnlich niedrige CO-Emissionswerte lieferte allerdings die (O<sub>2</sub> Soll +2 %). Im Teillastbetrieb (Abbildung 30) wird der Grenzwert durchweg deutlich überschritten (683 mg/Nm<sup>3</sup> - 1.499 mg/Nm<sup>3</sup>). Für den Teillastbetrieb wäre die Einstellung (Primärluft -5 % bzw. O<sub>2</sub> Soll +2 %/Primärluft -5 %) am günstigsten. Insgesamt kann man festhalten, dass die CO-Emissionen im Teillastbetrieb um das 6- bis mehr als 15-fache über denen für den Volllastbetrieb liegen. Die Versuche mit dem Brennstoff B<sub>4</sub> (Abbildung 31 und Abbildung 32) bestätigen die Einstellung (O<sub>2</sub> Soll +2 %/Primärluft -5 %) als emissionsärmste Variante.



**Abbildung 31: Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B<sub>4</sub> (P<sub>31</sub>S, WG<sub>23</sub>%, FG<sub>3,2</sub>%) bei Volllast**



**Abbildung 32: Vergleich der CO-Emissionen an der 50 kW-Anlage bei Standardeinstellung und Variation des Primärluftanteils und des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas für Brennstoff B<sub>4</sub> (P<sub>31</sub>S, WG<sub>23</sub>%, FG<sub>3,2</sub>%) bei Teillast**

Abbildung 33 zeigt die CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage für den Brennstoff B<sub>3</sub> bei Standard-Primär-/Sekundärluftverhältnissen sowie veränderter Einstellung. Da die Messungen mit zwei Geräten parallel durchgeführt wurden (ABB und Testo 380), sind die entsprechenden Ergebnisse im Vergleich dargestellt. Im Volllastbetrieb (linke Seite der Abbildung) wird der Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Nm<sup>3</sup> bei allen Einstellungen des Primär-/Sekundärluftverhältnisses eingehalten, wobei mit der Standardeinstellung die niedrigsten CO-Emissionen (106 mg/Nm<sup>3</sup> bzw. 62 mg/Nm<sup>3</sup>, gemessen mit dem ABB- bzw. Testo-Gerät) erzielt wurden. Im Teillastbetrieb (rechte Bildseite) wird der Grenzwert bei der Einstellung „Standard +3“ nur knapp und bei Standardeinstellung und „Standard + 1“ deutlicher überschritten (477 mg/Nm<sup>3</sup> – 562 mg/Nm<sup>3</sup>). Für den Teillastbetrieb wäre also die Einstellung „Standard +3“ die optimal in Bezug auf die Minimierung der CO-Emissionen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die CO-Emissionen im Teillastbetrieb um das 4- bis 10-fache über denen für den Volllastbetrieb liegen.

Abbildung 34 zeigt die CO-Emissionen an der 75 kW Anlage für den Brennstoff B<sub>4</sub> mit höherem Wassergehalt bei Standard-Primär-/Sekundärluftverhältnissen sowie veränderter Einstellung. Im Volllastbetrieb (linke Seite der Abbildung) wurde nur mit der Standardeinstellung und mit dem Testo-Gerät ein Messwert (381 mg/Nm<sup>3</sup>) erzielt, mit dem der Grenzwert von 400 mg/Nm<sup>3</sup> knapp eingehalten wurde. Die Messung mit dem ABB-Gerät ergab abweichend davon 698 mg/Nm<sup>3</sup>. Im Teillastbetrieb (rechte Seite der Abbildung) wird der Grenzwert wieder knapp (Messung bei Standardeinstellung mit dem Testo-Gerät) bzw. bis fast um das Doppelte (Standard -1; Wöhler-Messgerät) überschritten. Während der vermutete Anstieg der Emissionen bei dem Wechsel auf Teillastbetrieb für den Brennstoff B<sub>4</sub> nicht zu beobachten war, lagen die CO-Emissionen für diesen Brennstoff insgesamt höher als für den Brennstoff B<sub>3</sub>.



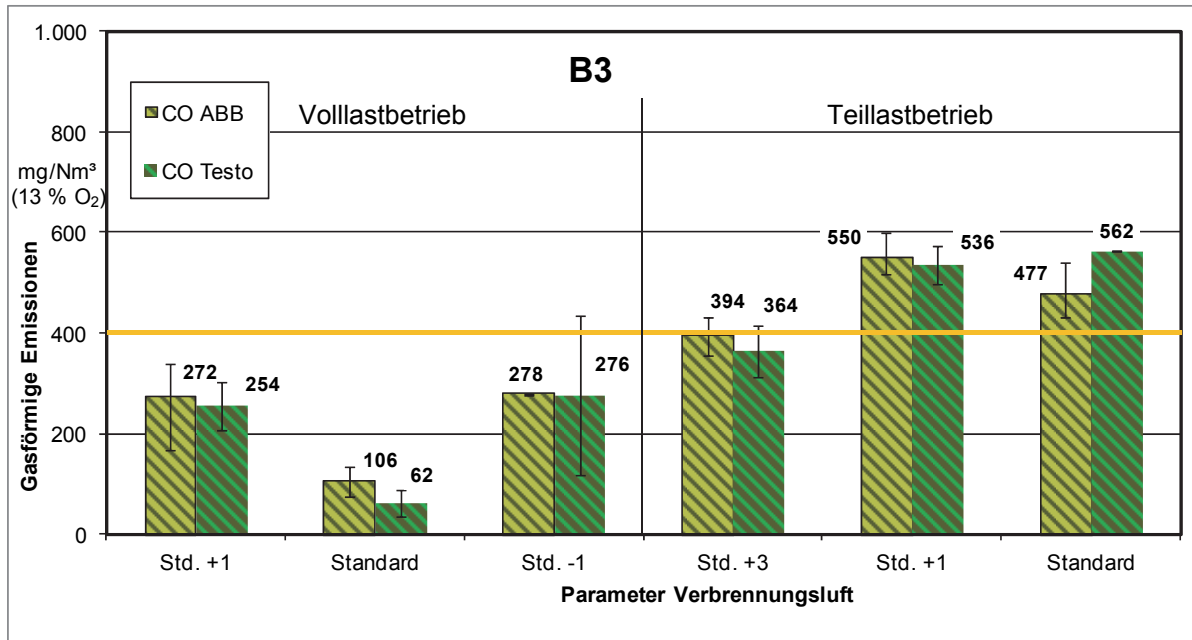


Abbildung 33: Vergleich der CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär-/ Sekundärluftverhältnis sowie veränderter Einstellung (Stufen +3, +1 und -1) für Brennstoff B3 (P31S, WG7%, FG2,5%) im Voll- und Teillastbetrieb

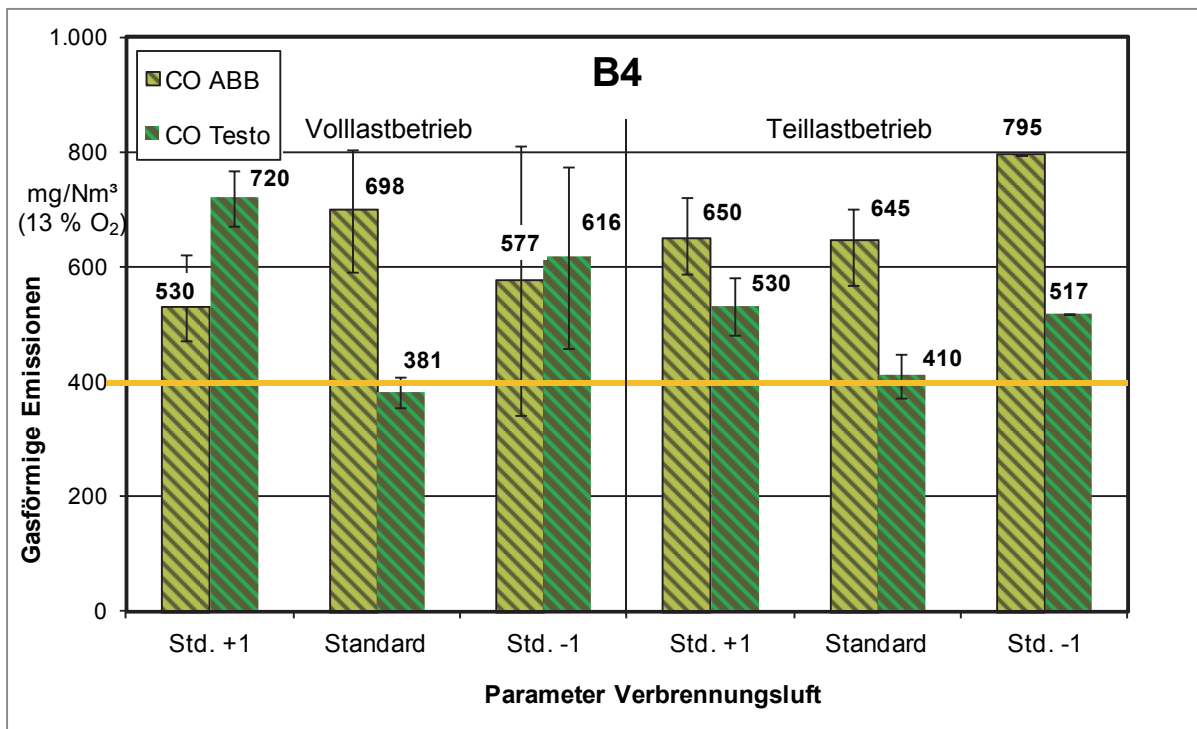


Abbildung 34: Vergleich der CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage bei Standard-Primär-/ Sekundärluftverhältnis sowie veränderter Einstellung (± 1 Stufe) für Brennstoff B4 (P31S, WG23%, FG3,2%) im Voll- und Teillastbetrieb

## 4.2 Emissionen aus Feuerungsversuchen mit verschiedenen Brennstoffen

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Emissionsmessungen (Staub- und gasförmige Emissionen) mit verschiedenen Brennstoffen an der 50 kW- und der 75 kW-Feuerungsanlage mit den in der ersten Versuchsphase ermittelten optimierten Feuerungseinstellungen (vergleiche Kapitel 4.1) dargestellt. Kapitel 4.2.1 (Staubemissionen) und 4.2.2 (CO-Emissionen) geben einen Überblick für alle Brennstoffe, in den nachfolgenden Kapiteln werden ausgewählte Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf die Emissionen einzeln dargestellt. In Kapitel 4.2.3 wird der Einfluss des Feingutanteils auf Staub- und CO-Emissionen dargestellt. Die Unterschiede zwischen Teil und Volllastbetrieb werden in Kapitel 4.2.4 noch einmal näher betrachtet. In Kapitel 4.2.5 werden die Ergebnisse der Messung der NO<sub>x</sub>-Emissionen wiedergegeben, die zusätzlich zu den gemäß 1. BImSchV zu untersuchenden Parametern untersucht wurden. Im anschließenden Kapitel 4.2.6 wird untersucht, ob eine Korrelation zwischen dem Gehalt an Aerosolbildnern im Brennstoff und den entsprechenden Staubemissionen auch für relativ niedrige Staubemissionen, wie in den vorliegenden Versuchen, feststellbar ist.

Kessel- bzw. Feuerungswirkungsgrade werden im abschließenden Kapitel 4.2.7 betrachtet.

### 4.2.1 Staubemissionen

Die Abbildung 35 zeigt die Gesamtübersicht über die Ergebnisse der Partikelmessungen der ersten und zweiten Versuchsphase an der 50 kW-Feuerungsanlage im Volllastbetrieb. Wie auch in Versuchsphase 1 wurden in Versuchsphase 2 zwei gravimetrische Verfahren (Wöhler-Gerät bzw. Bestimmung nach VDI 2066) eingesetzt.

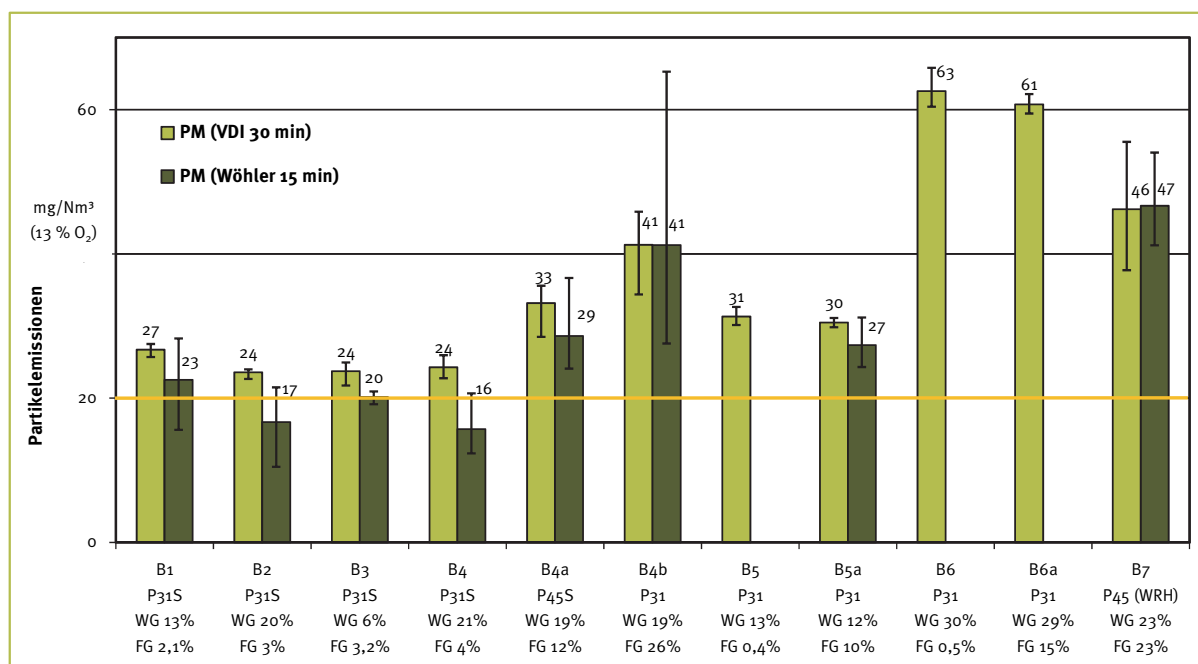
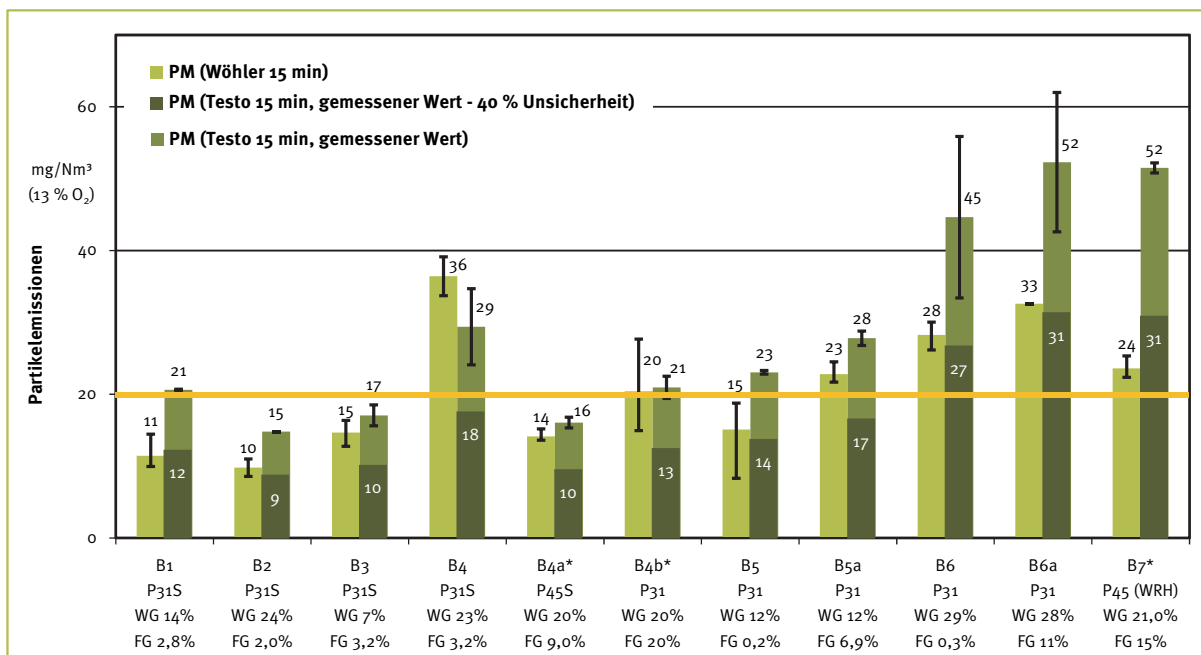


Abbildung 35: Staubemissionen aller Brennstoffe an der 50 kW-Anlage bei Volllast

Der Brennstoffvergleich zeigt: Die Brennstoffe B1 bis B4 lieferten die niedrigsten Emissionswerte. Die Wassergehalte waren nicht besonders hoch oder niedrig, der Feingutanteil gering, wie bei den übrigen Originalbrennstoffen auch. Durch die geringe Größe wurde u.U. eine sehr homogene Brennstoffversorgung der Feuerung erreicht, was eine störungsfreie optimale Verbrennung ermöglichte. Dies resultierte im Falle des Brennstoffes B2 und B4 in einer Unterschreitung und Falle des Brennstoffes B3 in der Einhaltung des Grenzwertes im Mittel (Wöhler). Dagegen erbrachte das Messverfahren nach VDI 2066 in allen Fällen eine Überschreitung des Grenzwertes (teilweise um das 2- bis 3-fache).

Die Abbildung 36 zeigt die Gesamtübersicht über die Ergebnisse der Partikelmessungen der ersten und zweiten Versuchsphase an der 75 kW-Feuerungsanlage im Vollastbetrieb. Dabei wurden die mit dem Testo-Gerät ermittelten Messwerte (Gesamtbalken in Abbildung 36) sowie die um 40 % Messunsicherheit reduzierte Werte (dunkelgrüne Balken) dargestellt. Bei dem Gerät handelt es sich nicht um ein gravimetrisches Verfahren wie bei dem Wöhler-Gerät bzw. der Bestimmung nach VDI 2066, sondern um ein Partikelzählverfahren, das von Schornsteinfegern im Rahmen der wiederkehrenden Messung gemäß der 2. Stufe der 1. BImSchV vor Ort eingesetzt werden darf und den Messwert direkt angibt. Diese Verfahren weisen im Vergleich zu gravimetrischen Verfahren eine höhere Messunsicherheit auf, die zur Beurteilung der Feuerungsanlage entsprechend der 1. BImSchV vom Messwert abzuziehen ist.



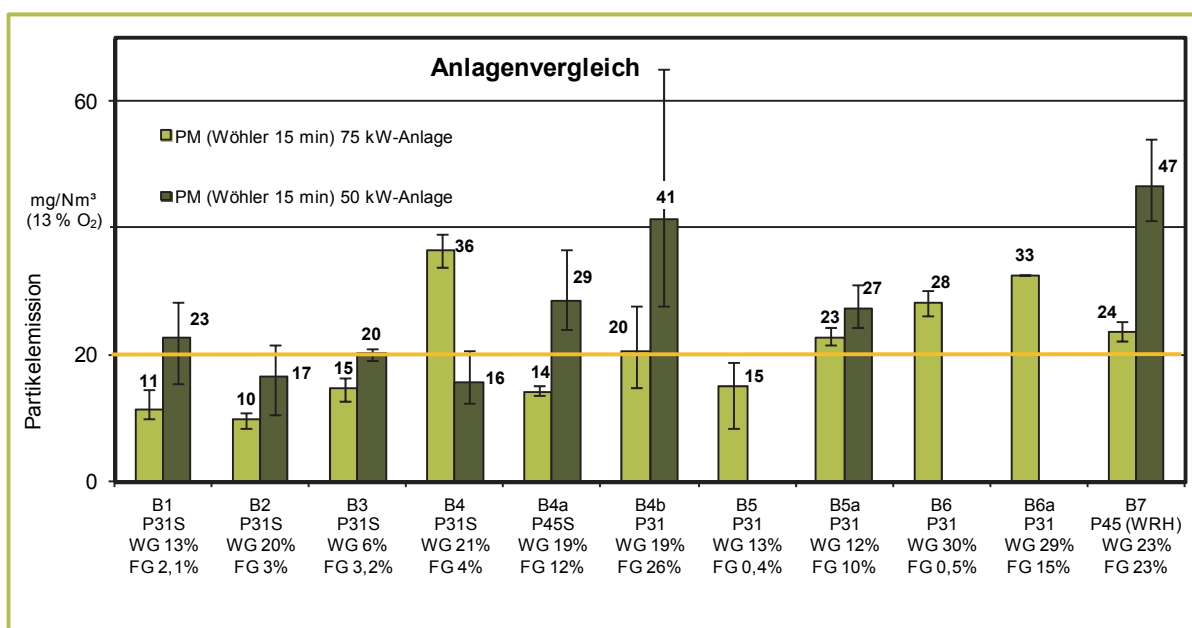
\* Primär-/Sekundärluftverhältnis betrug Std. +1, d. h. um eine Stufe gegenüber Standard-einstellung bei den übrigen Versuchen erhöht.

**Abbildung 36: Staubemissionen aller Brennstoffe an der 75 kW-Anlage bei Vollast**

Der Brennstoffvergleich zeigt: Mit den Brennstoffen B1 und B2 lieferten die kleinsten der untersuchten Hackschnitzel (P31S, deklariert als P16S) die niedrigsten Emissionswerte. Die Wassergehalte waren nicht besonders hoch oder niedrig, der Feingutanteil gering wie bei den übrigen

Originalbrennstoffen auch. Durch die geringe Größe wurde u.U. eine sehr homogene Brennstoffversorgung der Feuerung erreicht, was eine störungsfreie optimale Verbrennung ermöglichte. Dies resultierte im Falle des Brennstoffes B2 in einer Unterschreitung des Grenzwertes um im Mittel (über beide Messverfahren) die Hälfte. Darüber hinaus zeigten auch die Brennstoffe B3 und B4a eine deutliche Unterschreitung des Grenzwertes, wobei sich das verhältnismäßig gute Abschneiden der Brennstoffe B4a und B4b (mit erhöhtem Feingutanteil) gegenüber dem Brennstoff B4 mit niedrigem Feingutanteil an dieser Stelle nicht eindeutig erklären lässt. Es ist aber anzumerken, dass die Brennstoffe B4a und B4b bei einem erhöhten Primärluftanteil verbrannt wurden, außerdem stand aufgrund geringer Brennstoffmenge nur eine verkürzte Versuchsdauer zur Verfügung.

Abbildung 37 zeigt, dass die absoluten Werte der Staubbelastung bei vergleichbaren Verfahren an den unterschiedlichen Standorten stark voneinander abweichen. Die erste Aussage, dass die Brennstoffe B1 und B2 die niedrigsten Staubemissionswerte geliefert haben, kann jedoch bestätigt werden. In der 50 kW-Feuerungsanlage verbrannte außerdem Brennstoff B4 noch ähnlich emissionsarm, während dieses für den Brennstoff B5 an der 75 kW-Anlage gilt (Vergleichswerte für 50 kW-Anlage fehlen hier).



**Abbildung 37: Staubemissionen der 50 kW- und 75 kW-Anlage im Vergleich (nur Messungen mittels Wöhler-Messgerät)**

Abbildung 38 bestätigt die Beobachtung aus der ersten Versuchsphase, dass der Betrieb der 50 kW-Feuerungsanlage in Teillast (30 %) zu deutlich erhöhten Staubemissionen führt. Diese liegen je nach Brennstoff um das 3- bis 6-fache über den Emissionswerten bei Volllastbetrieb. Deutlich zu erkennen ist ebenfalls, dass im Teillastzustand mit keinem der ausgewählten Brennstoffe der Grenzwert von 20 mg/Nm³ der 1. BImSchV auch einzuhalten ist. Bei der wiederkehrenden Messung entsprechend der 1. BImSchV muss der Grenzwert im Teillastbetrieb allerdings nur gemessen und eingehalten werden, wenn kein ausreichend großer Pufferspeicher an der jeweiligen Anlage vorhanden ist.

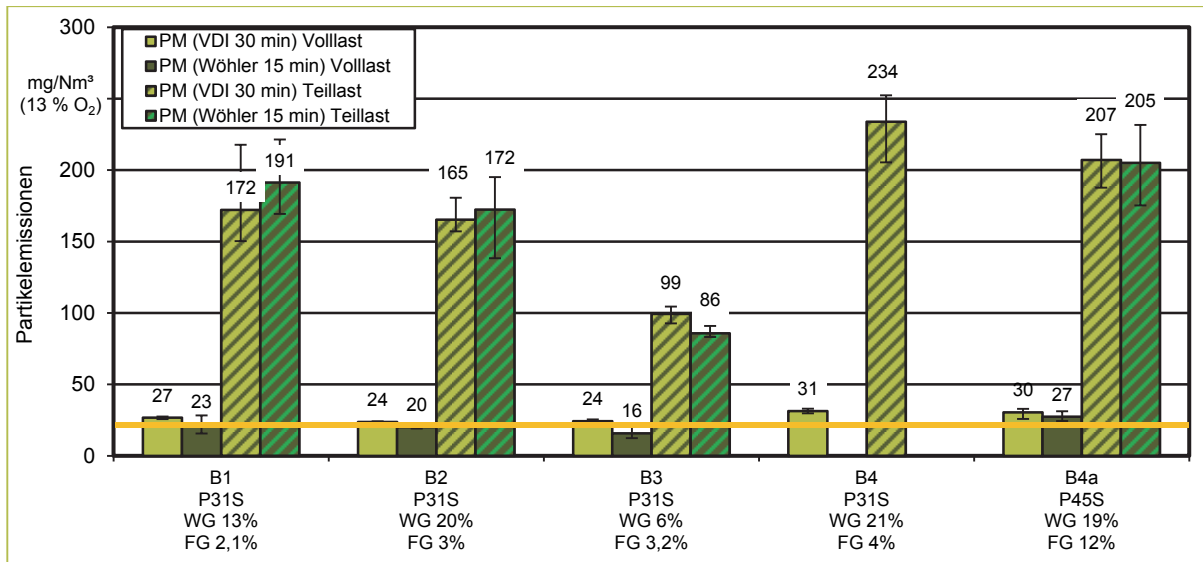


Abbildung 38: Vergleich Staubemissionen ausgewählter Brennstoffe bei Voll- und Teillast an der 50 kW-Anlage

#### 4.2.2 Kohlenmonoxid- Emissionen

Parallel zu den Staubmessungen durchgeführte Messungen der CO-Emissionen sollen den Einfluss der Brennstoff-Qualität auf die Verbrennungsgüte aufzeigen. Abbildung 39 zeigt die Messwerte für den Volllastbetrieb an der 50 kW-Feuerungsanlage. Gut zu erkennen ist der deutliche Anstieg der CO-Emissionen ab Brennstoff-Wassergehalten von ca. 30 % (Brennstoff B6 und B6a). Auch ein erhöhter Feingutanteil scheint zu einer Erhöhung der CO-Emissionen zu führen. Einen signifikant negativen Einfluss auf die Verbrennungsgüte hat jedoch der Teillastbetrieb wie Abbildung 40 zeigt. Hier ist ein ähnliches Verhalten wie bei den Staubemissionen festzustellen.

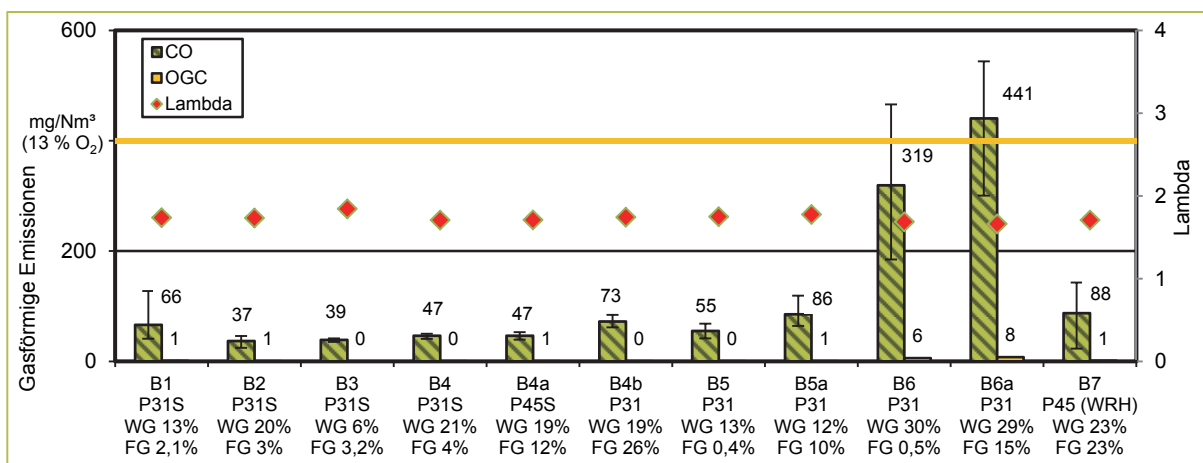


Abbildung 39: Emissionen von CO und organischen Kohlenwasserstoffen (OGC) aller Brennstoffe an der 50 kW-Anlage bei Volllast

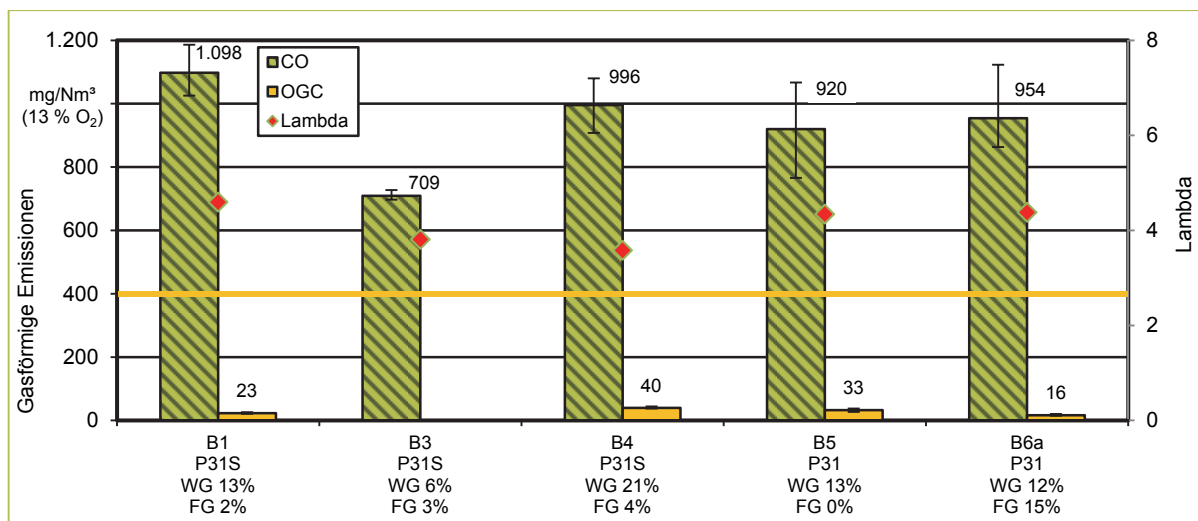


Abbildung 40: Emissionen von CO und organischen Kohlenwasserstoffen (OGC) ausgewählter Brennstoffe im Teillast-Betrieb an der 50 kW-Anlage

Abbildung 41 zeigt die Messwerte für den Volllastbetrieb an der 75 kW-Feuerungsanlage. Man erkennt einen deutlichen Anstieg der CO-Emissionen ab Brennstoff-Wassergehalten von ca. 30 % (Brennstoff B6 und B6a). Brennstoffe mit moderaten Wasser- und Feingutgehalten (B1, B3 und B5 sowie auch B5a) zeigen niedrige CO-Emissionswerte, bei deutlicher Unterschreitung des Grenzwertes. Eine Erhöhung des Wassergehaltes auf Werte > 20 % gepaart mit einer signifikanten Erhöhung des Feingutanteils lässt eine deutliche Erhöhung der CO-Emissionswerte erkennen. Einen unverkennbar negativen Einfluss auf die Verbrennungsgüte hat jedoch der Teillastbetrieb wie Abbildung 42 zeigt. Hier ist ein ähnliches Verhalten wie bei den Staubemissionen festzustellen.

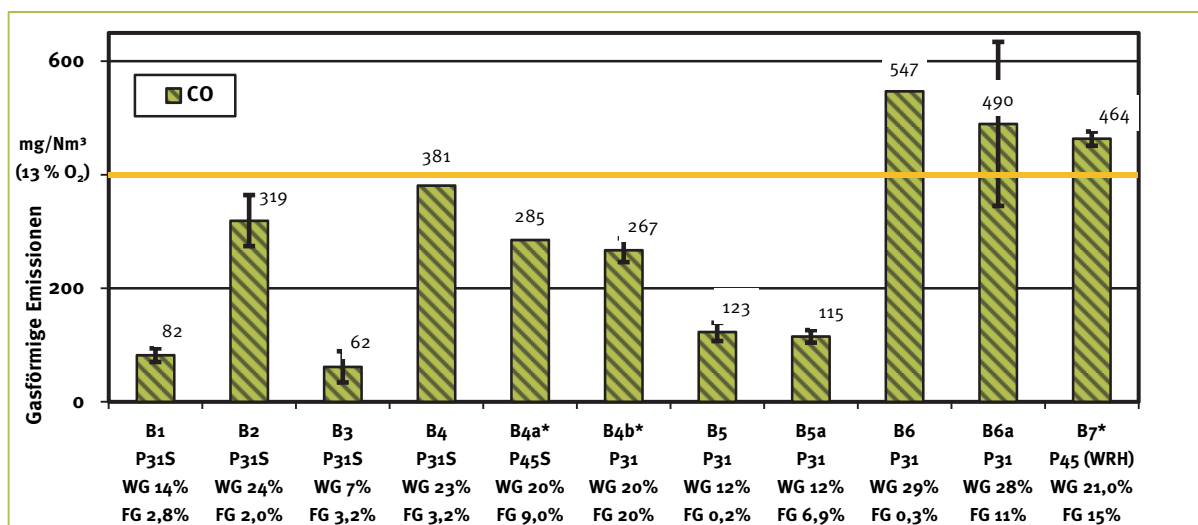


Abbildung 41: CO-Emissionen aller Brennstoffe an der 75 kW-Anlage bei Volllast

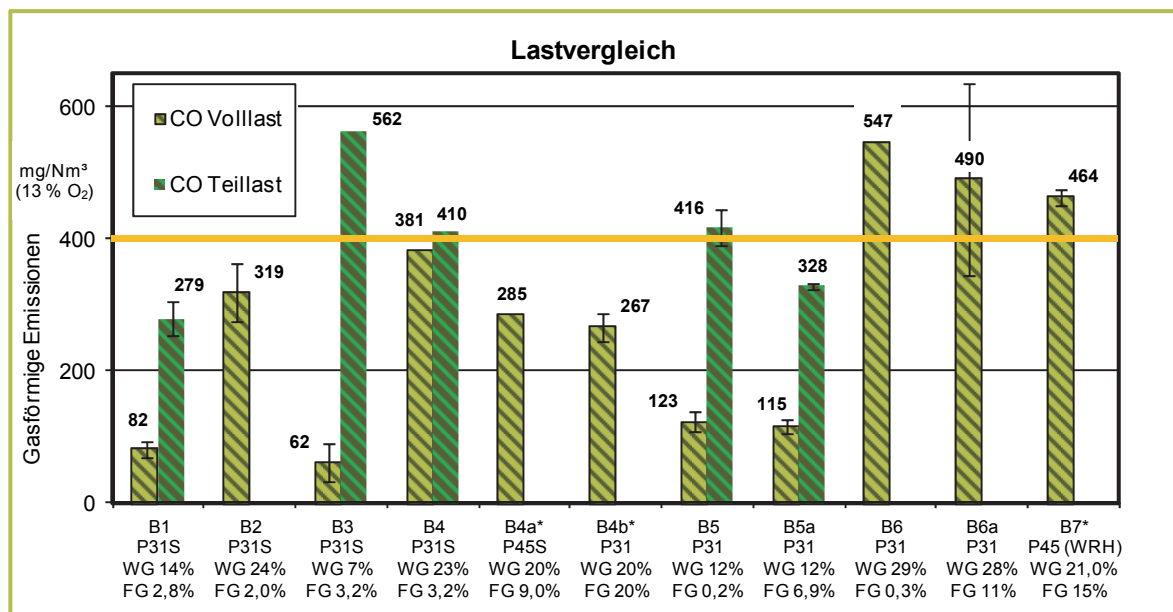


Abbildung 42: Vergleich der CO-Emissionen an der 75 kW-Anlage bei Voll- und Teillast

#### 4.2.3 Einfluss des Feingutanteils auf Staub- und CO-Emissionen

Im Folgenden wurde der Einfluss des Feingutanteils im Brennstoff auf die Staub- und CO-Emissionen untersucht. Den Brennstoffen B4, B5 und B6 wurde dafür Feingut zugesetzt, um ausschließlich den Einfluss der Partikelgröße auf die Emissionen zu untersuchen (vergleiche auch Kapitel 2.1.2). Es wurde versucht, den Wassergehalt möglichst konstant zu halten, um mögliche Veränderung der Staub- und gasförmigen Emissionen eindeutig den erhöhten Feingutanteilen zugeordnet zu können.

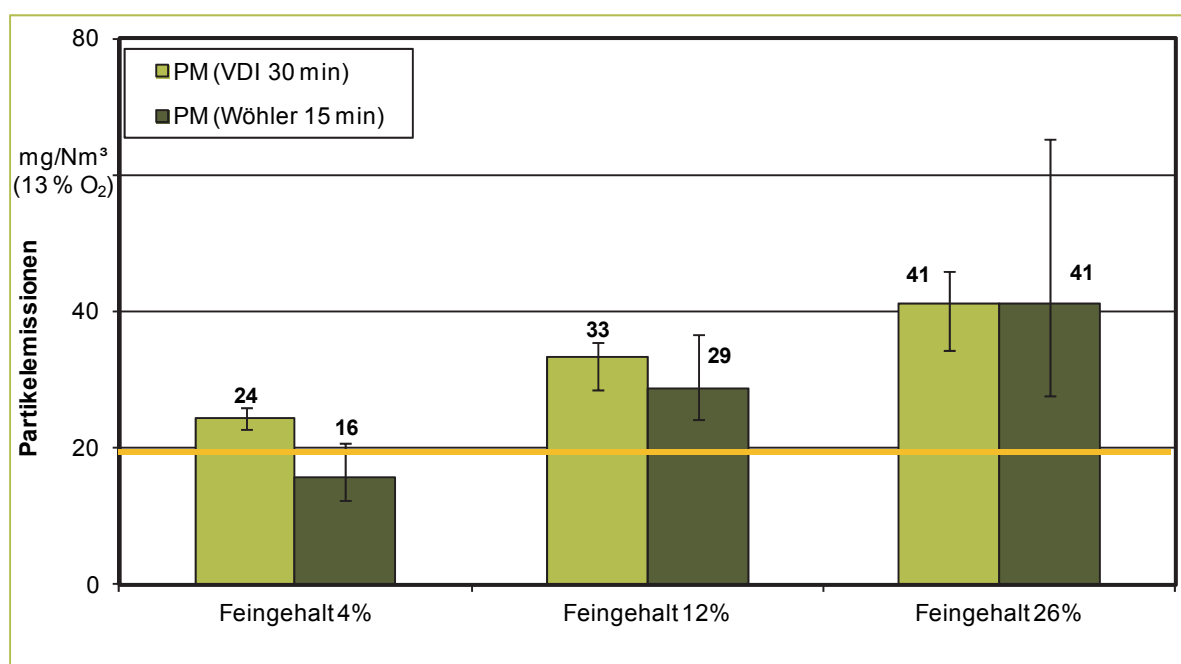
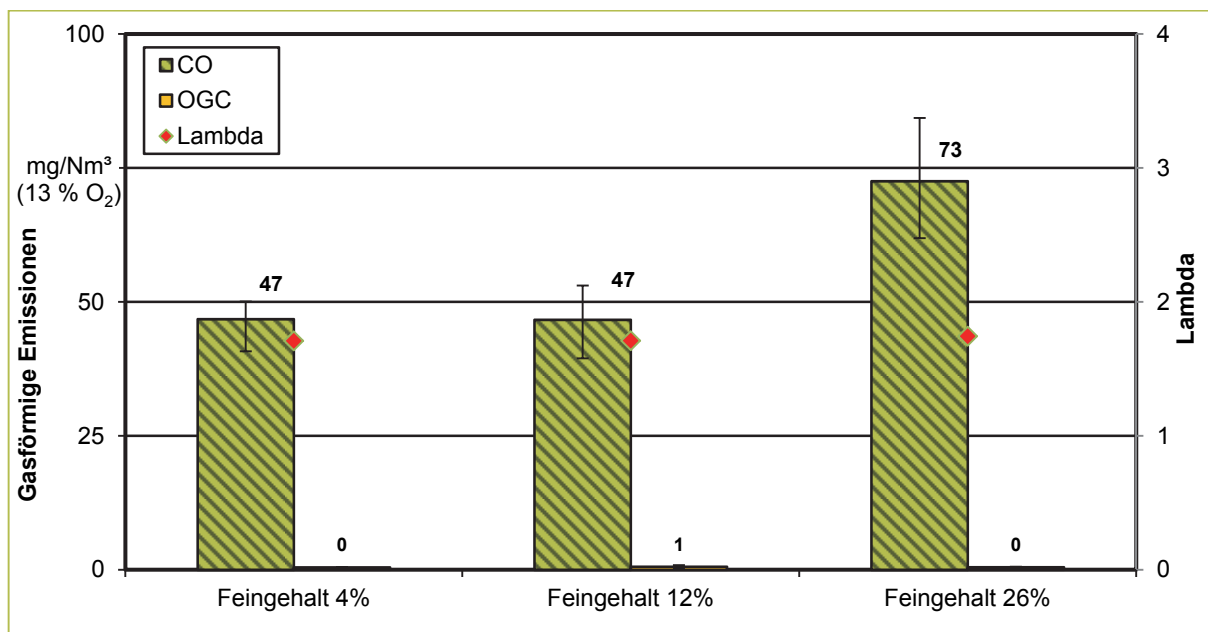


Abbildung 43: Partikelemissionen aus Brennstoff B4 (P31S, WG23%, FG1,7%) ohne/mit zugewetztem Feingutanteil an der 50 kW-Anlage

Abbildung 43 zeigt die Staubemissionen aus dem Brennstoff B4 ohne und mit zugesetztem Feingut an der 50 kW-Feuerungsanlage. Mit Erhöhung des Feingutanteils wurde ein relativ gleichmäßiger Anstieg der Staubemissionen mit beiden Messverfahren festgestellt. Aufgrund der Streuung der Werte (besonders mit dem Wöhler-Gerät) sollte jedoch nur von einer Tendenz der Zunahme gesprochen werden.

Im Falle der CO-Emissionen, die in Abbildung 44 dargestellt sind, stagniert der Messwert zunächst, der Anstieg kommt dann allerdings mit der Zumischung von 26 % Feingutanteil.



**Abbildung 44: Gasförmige Emissionen aus Brennstoff B4 (P31S, WG23%, FG4%) ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 50 kW-Anlage**

Für die 75 kW-Anlage sind die Staubemissionen der Brennstoffe B5, B6 sowie B5a und B6a (Originalbrennstoffe und Brennstoffe mit zugesetztem Feingutanteil) in Abbildung 45 dargestellt. Die Größenklassifikation P45S stellt die größte untersuchte Klassifizierung dar (mit Ausnahme von Waldrestholz). Der Wassergehalt des Brennstoffs B6 war mit 30 % fast doppelt so hoch wie der von Brennstoff B5 (12,5 %). Die Erhöhung des Feingutanteils scheint offensichtlich dazu zu führen, dass verstärkt Staub emittiert wird. Einzig der trockenere Brennstoff B5 mit geringeren Feingutanteil (entsprechend der geforderten Güteklasse) konnte entsprechend des mit dem Wöhler-Gerät ermittelten Wertes den Grenzwert unterschreiten.

Auch scheint der höhere Wassergehalt des Brennstoffs B6 eine verstärkte Staubemission zu verursachen, hier sei jedoch angemerkt, dass die Charge bezüglich der Holzart nicht der geplanten Qualität entsprach (es befand sich ein Anteil an Laubholz in der zugegebenen Brennstoffmenge), weswegen nicht eindeutig auf den Einfluss des Wassergehaltes als alleinige Ursache geschlossen werden kann.



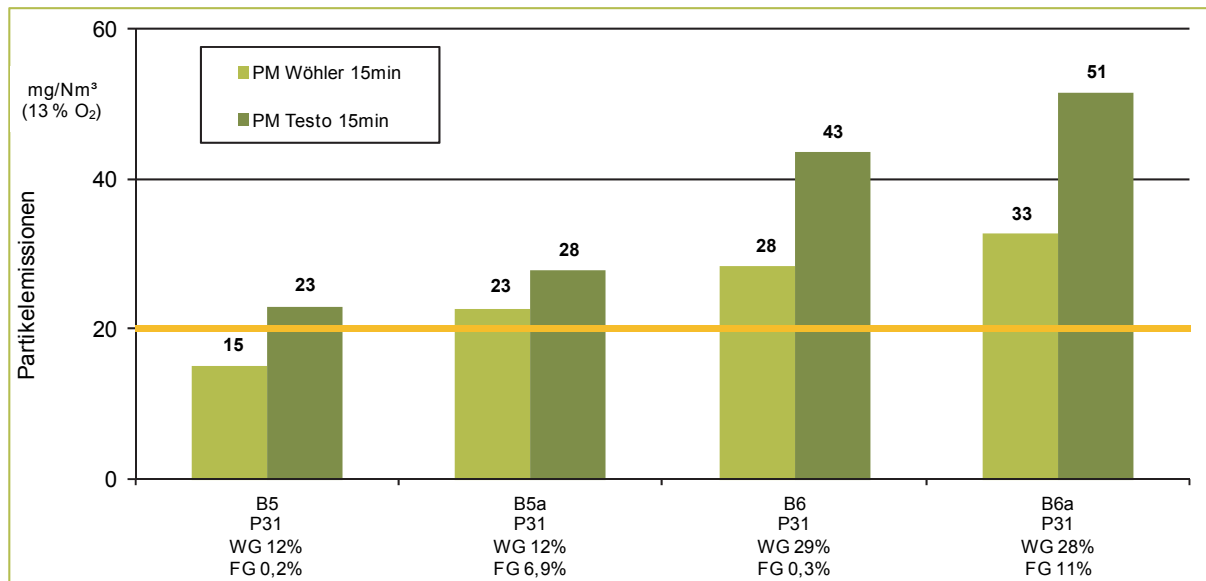


Abbildung 45: Partikelemissionen der Brennstoffe B5 und B6 ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 75 kW-Anlage

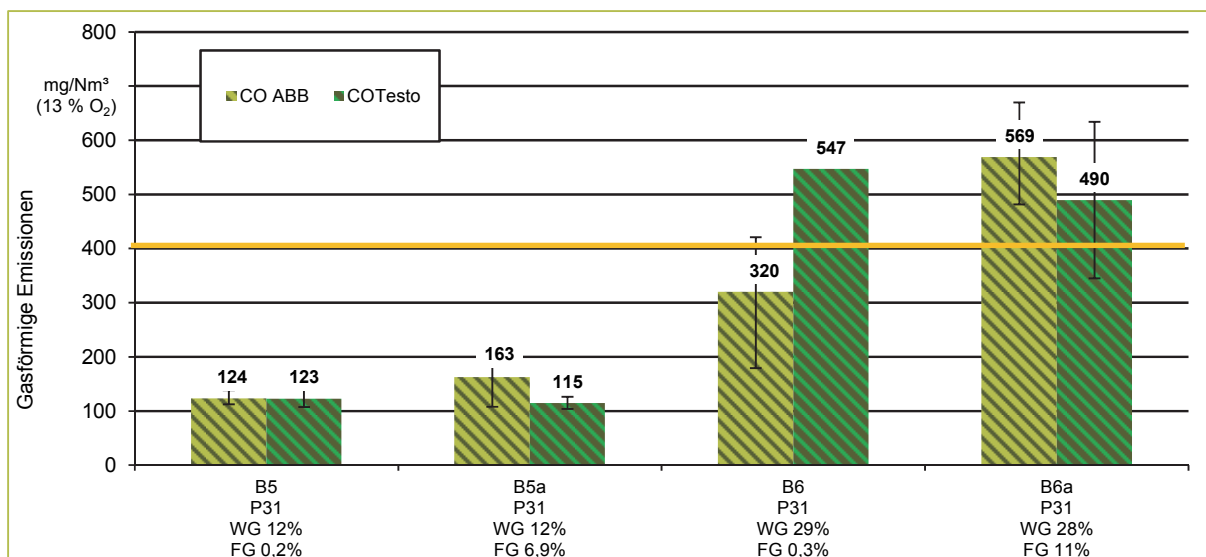


Abbildung 46: CO-Emissionen der Brennstoffe B5 und B6 ohne/mit zugesetztem Feingutanteil an der 75 kW-Anlage

Der zuvor beschriebene Anstieg der Staubemissionen bei Erhöhung des Feingutanteils kann in Abbildung 46 zumindest bei Betrachtung der Durchschnittswerte der ABB-Messungen ebenfalls beobachtet werden. Die mit dem Testo-Gerät ermittelten Werte zeigen hingegen nur sehr geringe Veränderungen durch den zugesetzten Feingutanteil.

#### 4.2.4 Vergleich der CO-Emissionen im Teil- und Volllastbetrieb

Wie bereits im Zusammenhang mit Abbildung 42 für die 75 kW-Anlage beschrieben, hat der Teillastbetrieb auch an der 50 kW-Anlage einen unverkennbar negativen Einfluss auf die Verbrennungsgüte. Hier ist tendenziell ein ähnliches Verhalten wie bei den Staubemissionen festzustellen (siehe Abbildung 47). Zu erklären ist dies mit der einhergehenden Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen im Teillastbetrieb. Dieser bedingt eine deutliche Reduzierung der Verbrennungstemperaturen einerseits durch Abnahme der durch den Verbrennungsprozess gelieferten Wärmestromdichte als auch durch eine Verdoppelung des Luftverhältnisses, wie Abbildung 29 und Abbildung 30 belegen.

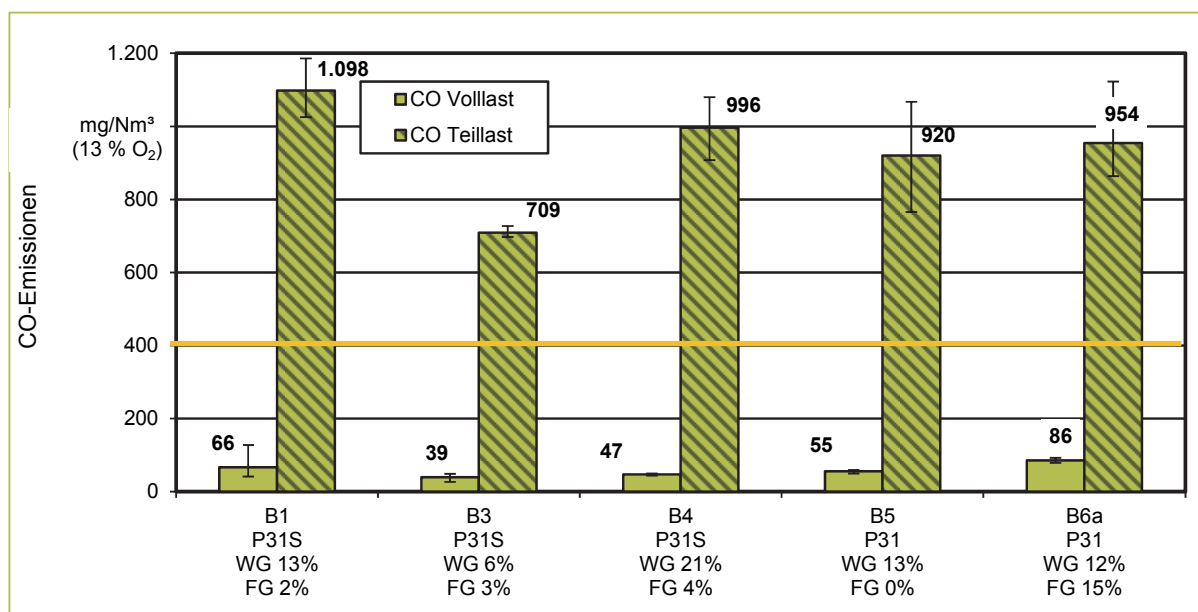


Abbildung 47: CO-Emissionen ausgewählter Brennstoffe im Teil- und Volllast-Betrieb an der 50 kW-Anlage

#### 4.2.5 NO<sub>x</sub>-Emissionen

Die Versuche zur Optimierung der Verbrennungsführung zeigten, dass der Einfluss der in Kapitel 2.5 aufgeführten Veränderungen (z. B. Änderung der Primär-Sekundärluftmenge) auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen an der 50 kW-Anlage relativ klein war. Die Werte bewegen sich für die beiden untersuchten Brennstoffe B3 und B4 im Teil- und Volllastbetrieb zwischen 108 mg/Nm<sup>3</sup> und - 159 mg/Nm<sup>3</sup>. Wie der Wert von 403 mg/Nm<sup>3</sup> für Brennstoff B7 (Waldrestholz) in Abbildung 48 zeigt, ist der Einfluss des Stickstoffgehaltes deutlich größer. Im Vergleich zu Brennstoff B7 mit einem Stickstoffgehalt von 0,39 m-% lag dieser für die übrigen Brennstoffe mit Werten im Bereich von 0,04 m-% bis 0,11 m-% deutlich niedriger.

Im Teillastbetrieb liegen die NO<sub>x</sub>-Emissionen für die untersuchten Brennstoffe um ca. 25 % niedriger als im Volllastbetrieb, wie ein Vergleich der in Abbildung 48 und Abbildung 49 dargestellten Werte zeigt. Dies entspricht aufgrund der im Teillastbetrieb niedrigeren Wärmestromdichte im Brennraum auch den Erwartungen.

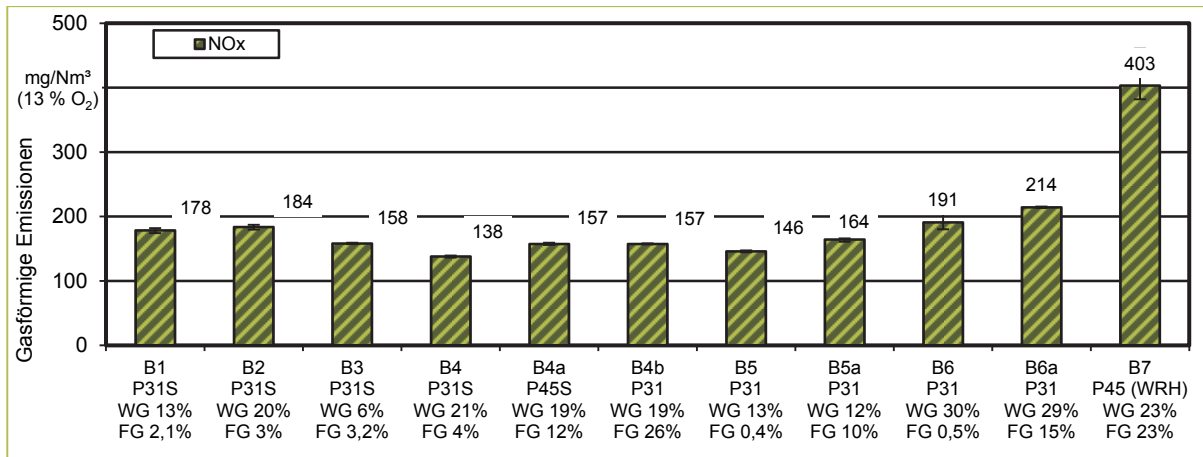


Abbildung 48: Übersicht NO<sub>x</sub>-Emission aller Brennstoffe der 50 kW-Anlage bei optimierter Einstellung und Vollast

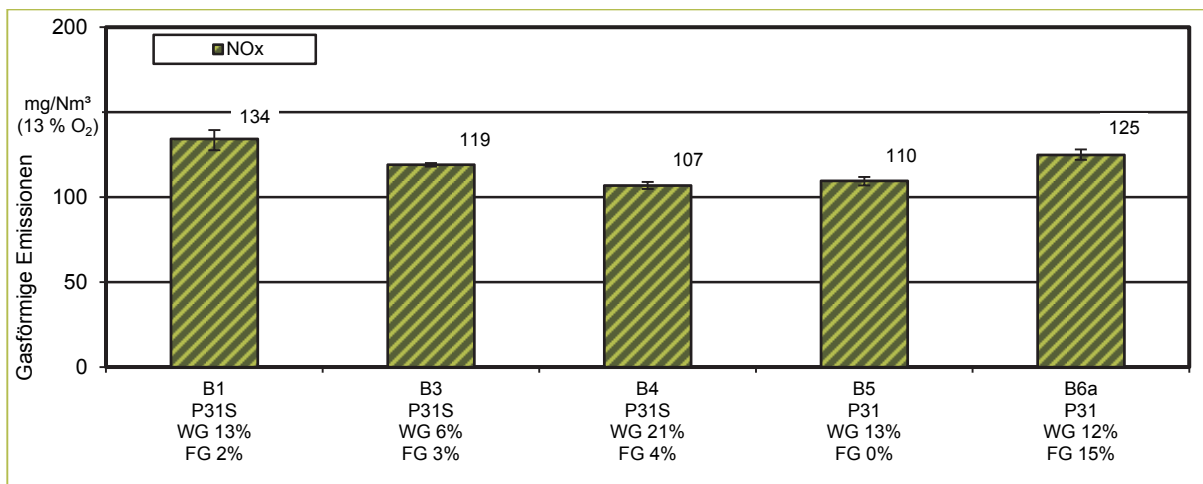


Abbildung 49: Übersicht NO<sub>x</sub>-Emission ausgewählter Brennstoffe der 50 kW-Anlage bei optimierter Einstellung und Teillast

Die an der 75 kW-Anlage im Vollastbetrieb durchgeführten NO<sub>x</sub>-Messungen zeigen im Vergleich zu den NO<sub>x</sub>-Messungen an der 50 kW-Anlage ein deutlich niedrigeres Niveau (zwischen 22 mg/Nm<sup>3</sup> und 79 mg/Nm<sup>3</sup>, siehe Abbildung 50). Dies kann anlagenspezifische Gründe haben, die z.B. in einer niedrigeren Wärmestromdichte und veränderten lokalen Reaktionsbedingungen in der Verbrennungszone begründet sein können. Um hier belastbarere Aussagen treffen zu können, müssten weitere Verbrennungsparameter (z. B. lokale Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen) erfasst werden. Verwertbare NO<sub>x</sub>-Emissionswerte für den Teillastbetrieb der 75 kW-Anlage liegen leider nicht vor.

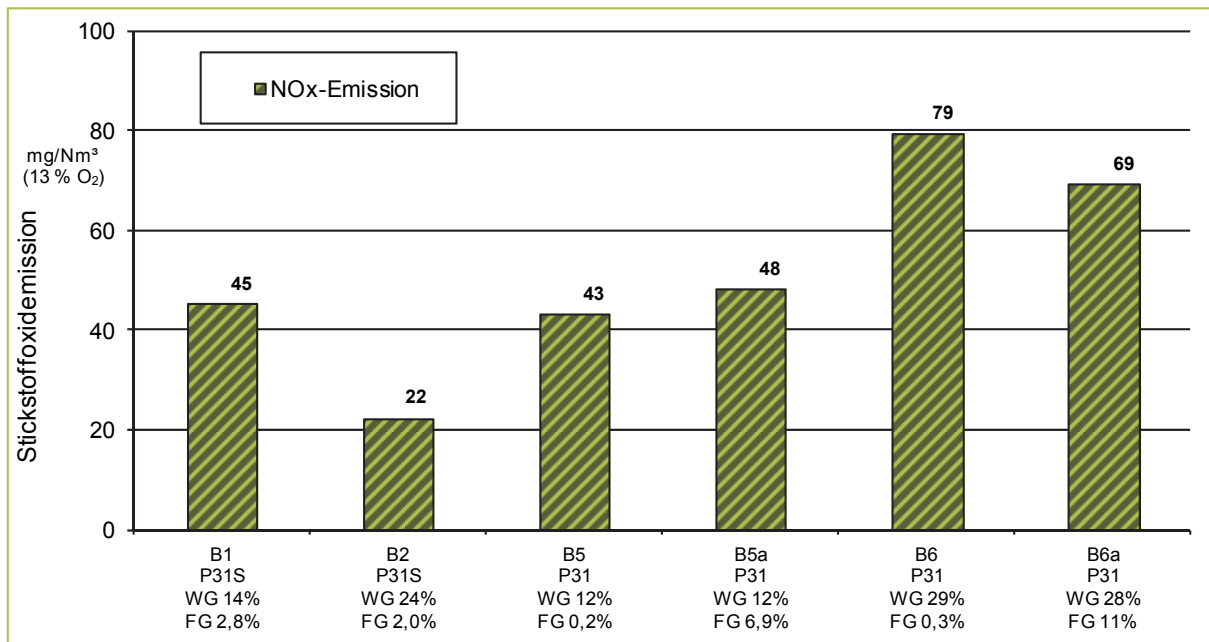


Abbildung 50: NOx-Emissionen ausgewählter Brennstoffe der 75 kW-Anlage bei optimierter Einstellung und Volllast

#### 4.2.6 Korrelation zwischen Aerosolbildnern im Brennstoff und Staubemissionen

Bei einer vollständigen Verbrennung bestehen die Staubemissionen weitgehend aus anorganischen Partikeln, die sich überwiegend aus den Oxiden der aerosolbildenden Elemente zusammensetzen. Daher ist die Frage nach einer Korrelation (siehe Abbildung 51) zwischen der Menge der Aerosolbildner im Brennstoff und den Staubemissionen interessant. Für die Staubemissionen wurden die Mittelwerte aus den Messungen beider Verfahren, die an den einzelnen Anlagen eingesetzt wurden.

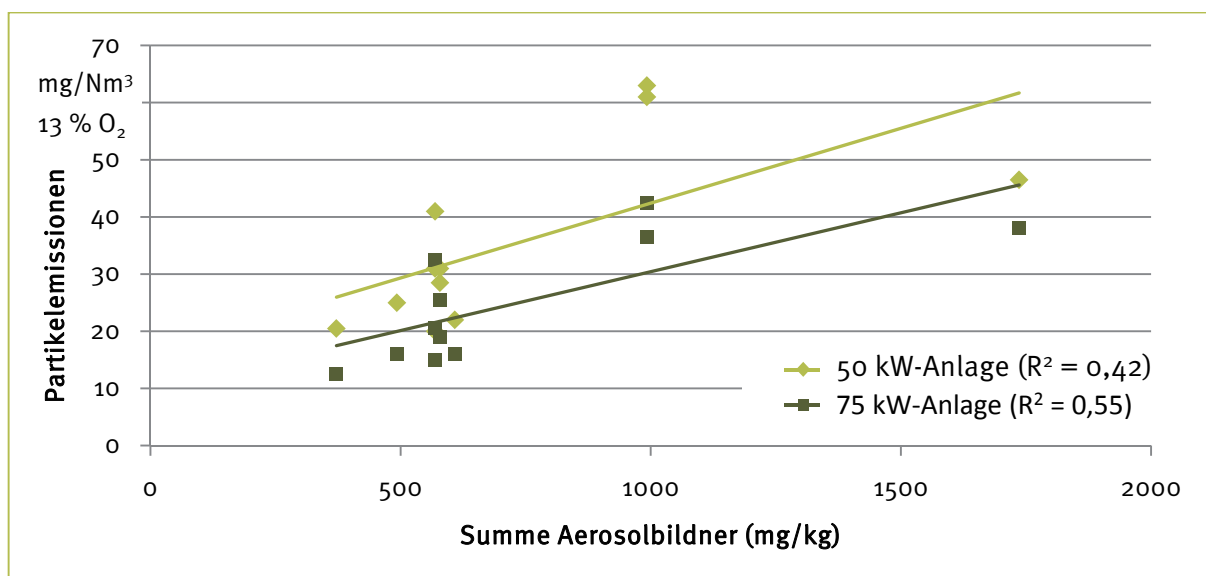


Abbildung 51: Korrelation zwischen Aerosolbildnern im Brennstoff und Staubemissionen (Volllastbetrieb)

Der größte Teil der eingesetzten Brennstoffe wies Gehalte an Aerosolbildnern zwischen 372 und 608 mg/kg auf, die Werte für die Brennstoffe B6 (und B6a) und B7 liegen bei 992 mg/kg bzw. 1736 mg/kg. Korreliert man die Konzentrationen der Aerosolbildner mit den Staubemissionen, so ergeben sich für die 50 kW- bzw. 75 kW-Feuerungsanlage Bestimmtheitsmaß von 0,42 bzw. 0,55. Für die jeweils 11 Messwerte kann man in beiden Fällen von einem signifikanten Zusammenhang sprechen. Lässt man die beiden höchsten Werte für Aerosolbildner (B6/B6a und B7) weg, ändern sich die Werte für das Bestimmtheitsmaß auf 0,13 bzw. 0,21 und stellen keinen signifikanten Zusammenhang mehr dar.

Bei einem erhöhten Primärluftanteil wird das Glutbett stärker mit Luft durchströmt, wodurch die Möglichkeit besteht, dass Partikel mitgerissen werden oder eine höhere Ausgasung flüchtiger Bestandteile wie z. B. aerosolbildender Elemente verbunden ist. Ein Vergleich zwischen dem in den Feuerungsversuchen eingestellten Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärluft an der 75 kW-Anlage und den Kaliumgehalten in der Rostasche zeigte allerdings keine Korrelation. Für Brennstoff B1 wurde mit steigendem Primärluftanteil ein geringerer Kaliumgehalt in der Rostasche festgestellt. Für Brennstoff B2 waren die Verhältnisse umgekehrt und für die übrigen Brennstoffe war keine einheitliche Tendenz auszumachen.

#### 4.2.7 Leistung

Neben den Emissionsmessungen wurden an der 50 kW-Anlage auch die Wärmeleistung bzw. der Wirkungsgrad bestimmt. Exemplarisch dargestellt sind die Feuerungsversuche mit dem Brennstoff B3 in der ersten Versuchsphase im Volllastbetrieb bei einer Wärmeleistung von 41,3 kW – 56 kW (siehe Abbildung 52). Der dabei erreichte Kesselwirkungsgrad lag zwischen (87,4 % und 93,7 % (siehe Abbildung 53). Derartige Leistungs- und Wirkungsgradbestimmungen wurden an der 75 kW-Anlage aus messtechnischen Gründen nicht durchgeführt.

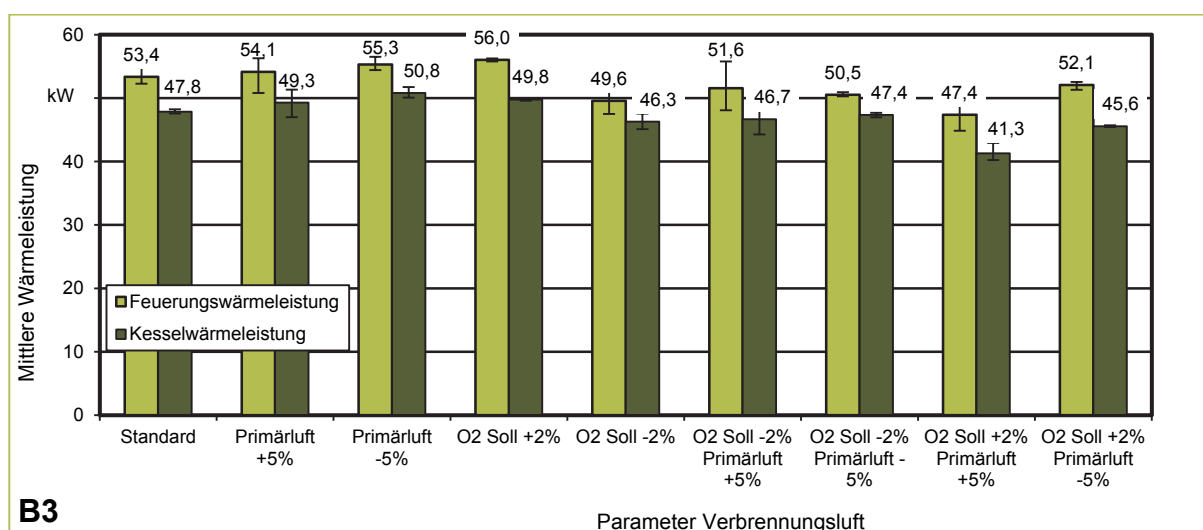
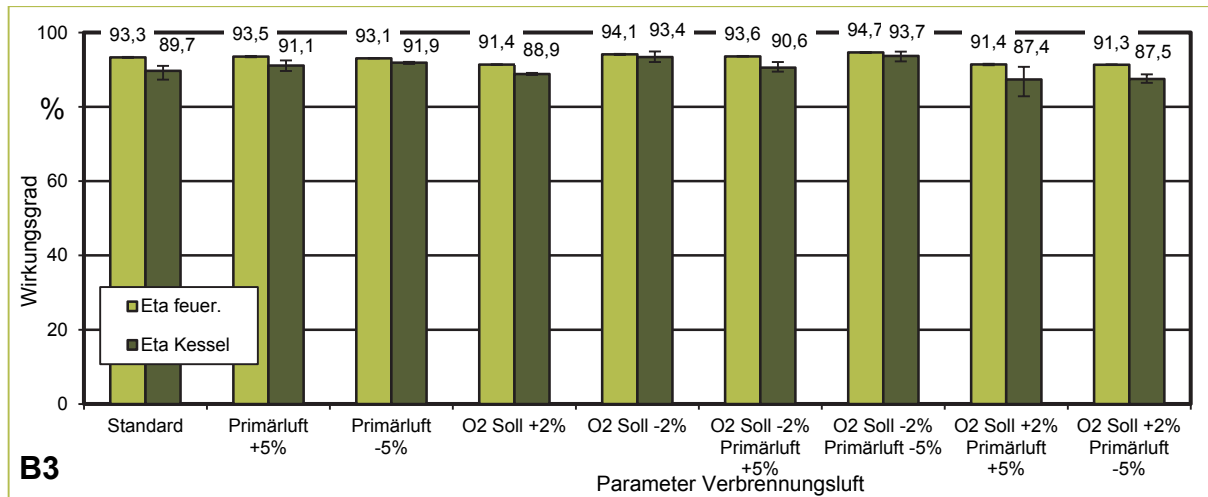


Abbildung 52: Vergleich Feuerungs-/Kesselwärmeleistung bei Standardeinstellung und verändertem Primärluftanteil/O<sub>2</sub>-Gehalt bei Volllast an der 50kW-Anlage, Brennstoff B3



**Abbildung 53: Vergleich von Feuerungs-/Kesselwirkungsgrad bei Standardeinstellung und verändertem Primärluftanteil/O<sub>2</sub>-Gehalt bei Volllast an der 50 kW-Anlage, Brennstoff B3**

## 5 Fazit und Empfehlungen für den Betrieb von Hackschnitzel-Kleinfeuerungen

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurden folgende Hauptziele verfolgt, um der Frage nachzugehen, unter welchen Bedingungen mit Hackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen ohne zusätzliche Staubminderungsmaßnahmen die Emissionsgrenzwerte der 2. Stufe der 1. BImSchV eingehalten werden können:

- Optimierung der Verbrennungssteuerung von Hackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen,
- Auswahl geeigneter Brennstoffe und Untersuchung des Emissionsverhaltens unter den optimierten Bedingungen und unter verschiedenen Lastzuständen
- Chemisch-physikalische Charakterisierung der Brennstoffe zur Identifizierung der spezifischen Einflüsse auf das Emissionsverhalten.

Aus den Ergebnissen der Feuerungsversuche und den Brennstoffanalysen, die dazu vorgenommen wurden, lassen sich eine Reihe von Fazits ziehen, von denen sich Empfehlungen für den Betrieb von Hackschnitzelkleinfeuerungsanlagen ableiten lassen.

Für die Auswahl und Spezifizierung der Brennstoffe konnten folgende Feststellungen getroffen werden:

- Brennstoffe der Qualität A1 gemäß DIN EN ISO 17225-4 mit sehr niedrigem Aschegehalt ( $< 1 \text{ m-\%}$ ) und niedrigen bis mäßigen Wassergehalten sind am Markt verfügbar.
- Bei gesiebter Ware weisen einige Chargen einen sehr geringem Feinanteil (z. T.  $< 1 \text{ m-\%}$ ) auf.
- Durch technische Trocknung werden dabei Hackschnitzel unterschiedlicher Wassergehalte angeboten, die z. B. als  $< 15 \text{ m-\%}$ ,  $20 \text{ m-\%}$  oder  $30 \text{ m-\%}$  deklariert sind. Bei der Untersuchung zeigte sich häufig ein von der Deklaration abweichender Wassergehalt. Insbesondere bei niedrigen Wassergehalten war der tatsächliche Wert z.T. deutlich kleiner als angegeben.
- Bei der Partikelgrößenverteilung fiel auf, dass die Klassifikation gemäß DIN EN ISO 17225-4 in der Regel um eine Stufe höher lag, als dies nach Zuordnung entsprechend der Hauptfraktion bzw. gemäß der Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-1 der Fall war.
- Bei den Versuchen zur Optimierung der Verbrennungseinstellungen konnten Veränderungen der Staub- und CO-Emissionen festgestellt werden. Im Volllastbetrieb konnte an der 50 kW-Feuerungsanlage eine leichte Verringerung der Emissionen durch eine Reduktion der Primärluft um 5 % sowie eine Erhöhung des Restsauerstoffgehaltes bei minimaler Brennstoffmenge um 2 % erreicht werden. An der 75 kW-Anlage stellte sich heraus, dass die Emissionen bei der herstellerseitig empfohlenen Standardeinstellung für das Primär-/Sekundärluftverhältnis am niedrigsten war.
- Im Teillastbetrieb lagen sowohl die Staub- als auch die CO-Emissionen für alle untersuchten Einstellungen der Verbrennungssteuerung deutlich über den Werten für den Volllastbetrieb, z.T. um mehr als den Faktor 10.

- Der Vergleich des Emissionsverhaltens verschiedener Brennstoffe bei den optimierten Feuerungseinstellungen im Volllastbetrieb zeigt, dass mit einigen Brennstoffen die Grenzwerte der 1. BImSchV (Staub: 0,02 g/m<sup>3</sup>; CO: 0,4 g/m<sup>3</sup>) eingehalten werden können. Die niedrigsten Werte wurden mit Brennstoffen mit einem Aschegehalt < 1 m-%, Wassergehalten bis ca. 20 %, sehr niedrigem Feingutanteil und einer relativ kleinen Partikelgrößenklasse (P16 bzw. P31 S) erreicht.
- Ursachen für höhere Staubemissionen waren ein höherer Aschegehalt (Waldrestholz-hackschnitzel, B7), ein höherer Wassergehalt (ca. 30 m-%) und auch ein erhöhter Feingutanteil, wobei die jeweiligen Auswirkungen bei den beiden Feuerungsanlagen unterschiedlich stark ausgeprägt waren.
- Das Waldrestholz verursachte durch den deutlich höheren Stickstoffgehalt im Brennstoff an der 50 kW-Anlage NO<sub>x</sub>-Emissionen, die um mehr als den Faktor 2 über dem Durchschnitt der Emissionen aus den stickstoffarmen Brennstoffen lagen.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich einige Empfehlungen für den Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen und die Brennstoffauswahl ableiten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen dieses Projektes lediglich 2 verschiedene Feuerungsanlagen und nur eine beschränkte Anzahl von Brennstoffen untersucht werden konnte. Bei der Übertragung der Erkenntnisse auf andere Anlagen müssen die jeweiligen Spezifikationen und örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

- Vor der Installation einer Kleinfeuerungsanlage sollte sichergestellt werden, dass örtlich passende Brennstoffe für den Betrieb der ausgewählten Anlage verfügbar sind.
- Der Betrieb in Teillast an der unteren Grenze (30 %) sollte vermieden werden. Eine Voraussetzung dafür ist in der Regel der Einsatz eines ausreichend groß dimensionierten Pufferspeichers.
- Bei der Installation ist auf eine fachgerechte und optimal auf den Brennstoff ausgerichtete Einstellung der Verbrennungssteuerung zu achten. Im Betrieb ist anschließend auf eine gleichbleibende Brennstoffqualität zu achten.
- Zur Vermeidung erhöhter Staub- und CO-Emissionen sollte der Wassergehalt des Brennstoffs deutlich unterhalb der für die Anlage angegebenen Obergrenze liegen. Allerdings sollte auch der minimale Wassergehalt für den Betrieb der jeweiligen Anlage beachtet werden. Bei technisch getrockneten Hackschnitzeln sollte kontrolliert werden, dass keine Unterschreitung dieses Wertes auftritt.
- Ein geringer Feinanteil kann zu einer Verringerung der Staubemissionen beitragen. In erster Linie ist das auf die normalerweise damit verbundene Verringerung des Aschegehaltes zurückzuführen. Aber auch der kleinere Anteil feiner Partikel kann die Staubemissionen reduzieren.

Weitere Aspekte, die Einfluss auf die Feuerung und damit auf die Emissionen haben können sind der Wartungszustand der Feuerungsanlage sowie weitere Einstellmöglichkeiten für den Betrieb der Anlage, wie z. B. die Optimierung der Zuggeschwindigkeit des Abgaszuges, die Vor-



schubgeschwindigkeit des Treppenrostes oder allgemein die Glutbetthöhe. Diese und weitere Einflussfaktoren konnten im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht untersucht werden, sollten aber in zukünftigen Vorhaben bzw. im Rahmen der weiteren Produktentwicklung von Feuerungsanlagen berücksichtigt werden.

## 6 Darstellung und Verwertung der Ergebnisse

### 6.1 Zielgruppenorientierte Darstellung der Ergebnisse

Die Erkenntnisse ermöglichen es Anlagenbetreibern von Hackschnitzel-Kleinfeuerungen eine geeignete Auswahl von Brennstoffen zu treffen, dass sie die Anlagen ohne zusätzliche sekundäre Filtermaßnahmen unter Einhaltung der Grenzwerte der 1. BImSchV betreiben können. Dies ist ein wichtiger Beitrag in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen, da gerade bei kleinen Anlagen die Kosten für Staubfilter überproportional hoch sind. Diese Informationen können Anlagenbetreibern in verschiedenen Formen zur Verfügung gestellt werden, u. a. über die Beratungstätigkeit des Kompetenzzentrums Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e. V. und über die in Kapitel 6.3 beschriebenen Publikationswege.

Hackschnitzelhersteller erhalten mit der detaillierten Charakterisierung der Brennstoffe die Möglichkeit, die Spezifizierung ihrer Brennstoffe genauer vorzunehmen und damit den Kunden präzisere Angaben zur Verfügung zu stellen bezüglich der Eignung für deren jeweilige Feuerungsanlage. Daneben bietet die genaue Kenntnis der Brennstoffeigenschaften auch die Option, die Aufbereitung der Hackschnitzel so zu verbessern, dass die aktuell gültigen Klassifikationen besser eingehalten werden.

In Zusammenhang mit den Ergebnissen der Emissionsmessungen des Teilvorhabens 2 stehen Herstellern von Hackschnitzel-Feuerungsanlagen Informationen zur Verfügung, die für die Optimierung der Verbrennungsführung für jeweils genau charakterisierte Brennstoffe in Bezug auf niedrigere Emissionen verwendet werden können. Außerdem bieten die Ergebnisse die Möglichkeit, dass Anlagenhersteller präzisere Spezifikationen in Bezug auf die einzusetzenden Brennstoffe machen können.

Die Erkenntnisse über die Charakterisierung der Brennstoffe können dafür genutzt werden, die internationalen Klassifikationsnorm für Holzhackschnitzel in der kommenden Revision dahingehend zu überprüfen und ggf. zu ändern, dass sie den Betrieb emissionsarmer Feuerungen noch besser unterstützen. Z. B. sollte die Spezifikationen der Partikelgrößenklassen auf ihre Praktikabilität im Alltag überprüft werden und ggf. angepasst.

### 6.2 Schornsteinfeger-Fachgespräch

Am 09.06.2016 fand in Wolfenbüttel ein Fachgespräch mit Vertretern des Landesinnungsverbands des Schornsteinfegerhandwerk Niedersachsen statt, in dem die vorläufigen Ergebnisse des Vorhabens vorgestellt wurden.

Bei den niedersächsischen Schornsteinfegern liegen bereits einige Erfahrungen zu Staubmessungen an Hackschnitzelkesseln vor. Es werden grundsätzlich alle Messgeräte eingesetzt, für die eine VDI-Zulassung vorliegt. Ein großer Anteil der Kessel erfüllt die neuen Anforderungen. Wenn Grenzwerte überschritten werden, tritt dies vor allem bei den Staubgehalten auf, z.T. in Verbindung mit zu hohen CO-Gehalten, weniger jedoch allein bei den CO-Gehalten. Bei handbeschickten Kesseln ist das Gegenteil zu beobachten. Die Abweichungen sind in den meisten Fällen erheblich, ihnen liegt eine Vielzahl von Ursachen zugrunde. Hierzu zählen vor allem die

Brennstoffqualität, fehlerhafte Luftzufuhr (z.B. durch verschmutzte Zuluftkanäle oder defekte Lüfter) und fehlende Pufferspeicher, die einen häufigen Teillastbetrieb zur Folge haben. Bei älteren Anlagen (Inbetriebnahme vor 1995) ist die Quote der Nichterfüllung deutlich höher als bei neueren Anlagen. Hier ist kein wesentlicher Unterschied zwischen Kesseln zu beobachten, die nach 2005 oder nach 2010 in Betrieb gegangen sind (Alter 2016).

Den abschließenden Teil des Fachgesprächs bildeten Überlegungen, wie die Projektergebnisse in die Praxis getragen werden können. Dazu sind Handlungsempfehlungen für die einzelnen Zielgruppen erforderlich, die sich auf die wesentlichen Ergebnisse konzentrieren, klar formuliert sind und sich ohne wesentlichen Zusatzaufwand umsetzen lassen. Zu den relevanten Zielgruppen zählen die Anlageninstallateure, die Brennstoffherzeuger und die Anlagenbetreiber. Schornsteinfeger haben als beratende und kontrollierende Instanz der Betreiber als Multiplikatoren große Bedeutung und sind an den Projektergebnissen sehr interessiert.

### 6.3 Weitere Veröffentlichungen

Präsentation der Ergebnisse des Verbundprojektes mit einem Vortrag „OptiChip - Optimierung der Emissionen von Holzhackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen durch geeignete Brennstoffauswahl und Verbrennungsführung“ auf der FNR-Veranstaltung „Weniger Luftbelastungen durch moderne Biomasseheizungen“ am 15.11.2016 im Rahmen der Messe EnergyDecentral in Hannover.

Darstellung der Ergebnisse des Verbundprojektes auf der Mitteleuropäischen Biomassekonferenz am 18. – 20.01.2017 in Graz mit einem Poster „Emissions reduction from small wood chip boilers by optimization of combustion control and fuel selection“.

Schön, C., et al., Influence of wood chip quality on emission behaviour in small scale wood chip boilers, Biomass Conversion and Biorefinery, in press

Es ist geplant, die wichtigsten Ergebnisse, die als Handlungsempfehlungen für Betreiber von Kleinfeuerungsanlagen dienen können, in die nächste Überarbeitung der FNR-Broschüre „Hackschnitzel-Heizungen – Was muss aktuell beachtet werden?“ einfließen zu lassen.

Es ist außerdem vorgesehen, die Ergebnisse des Vorhabens im Zusammenhang mit Ergebnissen der parallel laufenden Vorhaben Hackzert und qualiS in einer gemeinsamen umfangreicheren Publikation der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Dabei sollen die Ergebnisse der Verbrennungsversuche im Vordergrund stehen, wobei die im vorliegenden Teilvorhaben 1 vorgenommenen Qualitätsuntersuchungen der Brennstoffe die Grundlage für die Korrelation zwischen Brennstoff und Emissionsverhalten darstellen.

## Zusammenfassung

Ein wichtiger Baustein in der Energieerzeugung aus regenerativen Quellen ist die Nutzung von Biomasse, insbesondere die Nutzung von Holz in kleinen Feuerungsanlagen. Um die durch die vermehrte Holznutzung auftretenden Emissionen zu minimieren, wurden in der 1. BImSchV strenge Grenzwerte festgelegt, wobei besonders der seit dem 01.01.2015 für Neuanlagen gültige Wert für Staubemissionen von  $20 \text{ mg/m}^3$  eine technische Herausforderung für Holzhackschnitzelfeuerungen darstellt. Dies gilt insbesondere für kleine Anlagen, für die der zusätzliche Einbau von Filteranlagen eine überproportional hohe finanzielle Belastung darstellt. Ziel des Verbundvorhabens war, passende Brennstoffe sowie Verbrennungseinstellungen an den Kleinf Feuerungsanlagen zu finden, mit denen die Anforderungen der 1. BImSchV in der 2. Stufe erfüllt werden können und den Einfluss der verschiedenen Brennstoffparameter auf die Emissionen darzustellen.

Zunächst erfolgte die Auswahl und Charakterisierung von verschiedenen Qualitätsholzhackschnitzeln sowie einer Waldhackschnitzelcharge. Bei ausgewählten Chargen wurde Feingutanteil zugemischt, der aus dem ursprünglichen Material hergestellt worden war, um den Einfluss der Partikelgröße unabhängig von einem veränderten Ascheanteil zu untersuchen. Über die Bestimmung der verbrennungstechnisch wichtigsten Parameter Wasser- und Aschegehalt sowie Partikelgrößenverteilung hinaus wurden verschiedene chemische Parameter einschließlich der Aerosolbildner untersucht, u. a. um deren mögliche Korrelation zu den Emissionen bei den Feuerungsversuchen zu erfassen.

In Feuerungsversuchen wurden an zwei Kleinf Feuerungsanlagen (50 kW-Anlage mit Seiteneinschub und Kipprost und 75 kW-Anlage mit Seiteneinschub und Treppenrost) mit Hackschnitzeln durchgeführt, wobei in einer ersten Versuchsphase die Optimierung der Verbrennungsparameter (Luftverhältnis, Primär-/Sekundärluftaufteilung sowie Lastzustand) anhand zweier verschiedener Brennstoffe vorgenommen wurden und in einer zweiten Phase der Einfluss verschiedener Brennstoffe auf das Emissionsverhalten untersucht wurde.

Die in den Feuerungsversuchen eingesetzten Holzhackschnitzel deckten die Partikelgrößenklassen P16S bis P45S sowie den Wassergehalts-Bereich von 6,6 m-% bis 28,6 m-% ab. Der höchste Wassergehalt von 28,6 m-% lag leicht oberhalb der Spezifikation für die 50 kW-Anlage und unterhalb des Wertes 35 m-% für die 75 kW-Anlage. Mit Ausnahme der Waldrestholz-Hackschnitzel (14,6 %) wiesen alle anderen Originalproben sehr geringe Feingutanteile auf, die im Bereich von 0,2 % - 3,2 % lagen. Die Anteile in den Proben mit zugemischtem Feingutanteil lagen zwischen 6,9 % und 19,6 %. Alle Brennstoffe wiesen sehr geringe Aschegehalte ( $\leq 0,7 \%$ ) auf mit Ausnahme des Waldrestholzes mit einem Gehalt von 3,4 %. Dort deutet der hohe Siliziumgehalt auf eine mineralische Kontamination der Hackschnitzel hin. Die Untersuchung der aerosolbildenden Elemente zeigte, dass keine Korrelation zwischen ihnen und dem Aschegehalt besteht.

Ein auffälliges Ergebnis für die Klassifikation der Partikelgrößenverteilung war, dass sich die Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 und die Zuordnung der Hauptfraktion bzw. die Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-1 meist um mindestens eine Klasse unterschieden. Um alle

Kriterien der entsprechenden Klasse einzuhalten, wurden für die untersuchten Brennstoffe offensichtlich Hackschnitzel hergestellt, deren Hauptfraktion eine Stufe niedriger einzuordnen sind als die die angestrebte Klasse, d. h. ein P<sub>31</sub>S-Hackschnitzel entsprach in der Hauptfraktion einem P<sub>16</sub>-Material und P<sub>45</sub>-Hackschnitzel waren nach DIN EN ISO 17225-4 oft nicht mehr klassifizierbar.

Bei den Versuchen zur Optimierung der Verbrennungseinstellungen wurden Veränderungen der Staub- und CO-Emissionen festgestellt. Im Volllastbetrieb wurde an der 50 kW-Feuerungsanlage eine leichte Verringerung der Emissionen durch Reduktion der Primärluft sowie eine Erhöhung des Restsauerstoffgehaltes erreicht. Die Emissionen an der 75 kW-Anlage waren bei der herstellerseitig empfohlenen Standardeinstellung für das Primär-/Sekundärluftverhältnis am niedrigsten. Daraus folgt, dass sich die Verbrennungseinstellungen gegenüber den Herstellervorgaben in Bezug auf die Emissionsminderung z. T. optimieren lassen, in jedem Fall aber sorgfältig auf den jeweiligen Brennstoff einzustellen sind.

Die Feuerungsversuche mit 11 verschiedenen Brennstoffen bei den optimierten Feuerungseinstellungen im Volllastbetrieb zeigten, dass mit einigen Brennstoffen die Grenzwerte der 2. Stufe der 1. BImSchV (Staub: 0,02 g/m<sup>3</sup>; CO: 0,4 g/m<sup>3</sup>) eingehalten werden können. Die niedrigsten Werte wurden mit Brennstoffen mit einem Aschegehalt < 1 m-%, Wassergehalten bis ca. 20 %, sehr niedrigem Feingutanteil und einer relativ kleinen Partikelgrößenklasse (P<sub>16</sub> bzw. P<sub>31</sub> S) erreicht. Ursachen für höhere Staubemissionen waren ein höherer Aschegehalt (Waldrestholz hackschnitzel), ein höherer Wassergehalt (ca. 30 m-%) und auch ein erhöhter Feingutanteil, wobei die jeweiligen Auswirkungen bei den beiden Feuerungsanlagen unterschiedlich stark ausgeprägt waren. Das Waldrestholz verursachte durch seinen deutlich höheren Stickstoffgehalt an der 50 kW-Anlage außerdem NO<sub>x</sub>-Emissionen, die um mehr als den Faktor 2 über den durchschnittlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen aus den stickstoffarmen Brennstoffen lagen. Eine Korrelation zwischen Staubemissionen und dem Gehalt von Aerosolbildnern konnte nur unter Einbeziehung der Ergebnisse für die beiden Brennstoffe mit Aerosolbildnergehalten ab etwa 1000 mg/kg festgestellt werden.

Im Teillastbetrieb an der unteren Spezifikationsgrenze (30 %) lagen sowohl die Staub- als auch die CO-Emissionen für alle untersuchten Einstellungen der Verbrennungssteuerung und alle untersuchten Brennstoffe deutlich über den Werten für den Volllastbetrieb, z.T. um mehr als den Faktor 10 und damit für die Staubemissionen durchgehend oberhalb der Grenzwerte der 1. BImSchV.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass mit optimierten Verbrennungseinstellungen und geeigneten Brennstoffen ein emissionsarmer Betrieb und die Einhaltung der Grenzwerte der 2. Stufe der 1. BImSchV ohne nachgeschaltete Emissionsminderungsmaßnahmen möglich ist.

## Literaturverzeichnis

1. BImSchV (26.01.2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV). Fundstelle: BGBl I, S. 38.

3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016): Feuerstättenzählung Niedersachsen 2015 für holzbefeuerte Anlagen im Geltungsbereich der 1. und 4. BImSchV. Göttingen.

Alter, Nils (2016): Aktuelle Erfahrungen aus der Überwachung von Kleinf Feuerungsanlagen, 20. Sitzung des Arbeitskreis Holzfeuerung, Technologie und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Straubing, 01.06. 2016.

Deutsches Biomasse Forschungszentrum e. V. (DBFZ): Feinstaubminderung in Kleinf Feuerungsanlagen, aktuelles BMU-Projekt, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1999): DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW; Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Berlin: Beuth Verlag

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN EN 304: Heizkessel – Prüfregele für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern. Berlin: Beuth Verlag

KOMMISSION ZUR REINHALTUNG DER LUFT (KRDL) IM VDI UND DIN-NORMENAUSSCHUSS (2006): VDI 2066, Blatt 1: Messen von Partikeln; Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung; Übersicht, 11/2006. Berlin: Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2014): DIN EN ISO 17225-1 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2014): DIN EN ISO 17225-4 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN 14778 Feste Biobrennstoffe – Probenahme. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN 14780 Feste Biobrennstoffe – Probenherstellung. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2010): DIN EN 14774-2 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung –Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2012): DIN EN 14775 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2010): DIN EN 14918 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN 15149-1 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 1: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 1 mm und darüber. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2010): DIN EN 15103 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN 15289 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2009): DIN EN ISO 10304-1 Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie – Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN 15290 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Hauptelemente – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, Ti. Berlin, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): DIN EN 15297 Feste Biobrennstoffe – Bestimmung von Spurenelemente – As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V und Zn. Berlin, Beuth Verlag

Döhling, Frank (2012): Wärme aus Holz - Feinstaubemissionen: Brennstoffeinfluss, Nutzer, Feuerungs-Wettbewerb, Sekundärmaßnahmen, Charakterisierung und Toxizität. Deutsches BiomasseForschungsZentrum. Leipzig.

Hartmann, Hans (2014a): Stand der Technik und Qualitätsparameter fester Bioenergieträger, mögliche emissionsrechtliche Probleme bei Kleinfeuerungen der 1. BImSchV in der Praxis – Schwerpunkt: Holzhackschnitzel. FNR-Fachgespräch „Nutzung fester Biomasse im Rahmen der 1. BImSchV“. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. FNR. Berlin, 14.05.2014.

Hartmann, Ingo (2014b): Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen. Deutsches BiomasseForschungsZentrum. Leipzig.

Hartmann, Ingo (2014c): Feste Bioenergieträger – Aspekte zu Qualitätsmanagement, Normung und zusätzlichen Anforderungen zur Beseitigung schwankender Qualitätsparameter – Holzpellets. FNR-Fachgespräch „Nutzung fester Biomasse im Rahmen der 1. BImSchV“. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. FNR. Berlin, 14.05.2014.

Lenz, Volker; Thrän, Daniela; Hartmann, Hans; Turowski, Peter; Ellner-Schuberth, Frank; Gerth, Joachim (2010): Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen. Deutsches BiomasseForschungsZentrum. Leipzig (DBFZ Report, 1).

Mantau, Udo (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland. Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Hamburg.

Obernberger, Ingwald; Brunner, Thomas; Biedermann, Friedrich (2012): Future Low Emission Biomass Combustion Systems (FutureBioTec). Graz.





