



Berichte aus dem TFZ

Partikelemissionen aus Kleinf Feuerungen für Holz

und Ansätze für
Minderungsmaßnahmen



Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen



Partikelemissionen aus Klein- feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen

Autoren:

Frank Ellner-Schuberth
Dr. Hans Hartmann
Peter Turowski
Paul Roßmann

Mitarbeiter:

Mitarbeit (Prüfstand, Labor):
Stephan Winter
Rainer Dadlhuber
Alexander Marks

Berichte aus dem TFZ 22

Straubing, März 2010

Titel: Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen

Autoren/Bearbeiter: Frank Ellner-Schuberth, Dr. Hans Hartmann, Peter Turowski, Paul Roßmann

Projektleiter: Dr. Hans Hartmann

in Kooperation mit: Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig
Technische Universität Hamburg-Harburg - Institut für Energiewirtschaft und Umwelttechnik, Hamburg

Die wesentlichen Teile des vorliegenden Berichts stellen einen thematisch abgegrenzten und eigenständigen weitgehend wortgleichen Auszug aus einem Gesamtbericht dar, der vom TFZ im Unterauftrag des Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in 2008 erarbeitet wurde. Dieser Bericht trägt den Titel „Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen“.

Zusätzlich zum oben genannten Bericht wurden Auswertungen hinzugefügt (Kapitel 4), die im Rahmen eines vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes mit dem Titel „Saubere Biomasseverbrennung in Zentralheizungsanlagen: Bestimmung der Partikelgrößen, Probenahme und physikochemisch-toxikologische Charakterisierung“ durchgeführt wurden.

Die Verantwortung für den Inhalt der hier vorliegenden Veröffentlichung liegt bei den oben genannten Autoren.

© 2010
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

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

ISSN: 1614-1008

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

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr. Hans Hartmann
Verlag: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2010
Gestaltung: Dr. Hans Hartmann, Frank Ellner-Schuberth

Fotonachweis: Bosch Thermotechnik GmbH - Buderus Deutschland (9), Fröling Heizkessel- und Behälterbau Ges.m.b.H. (8), HDG Bavaria GmbH (7), Kálmán System Ltd. (3, 4), KWB - Kraft und Wärme aus Biomasse Ges.m.b.H. (6), TFZ (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	13
1 Einleitung und Zielsetzung.....	17
2 Auswahl der Feuerungen	19
2.1 Identifikation bedeutender Bauformen	19
2.2 Auswahl der zu messenden Feuerungen.....	24
3 Material und Methoden	27
3.1 Aufbau des Versuchsstandes	27
3.1.1 Abgasmessstrecke.....	27
3.1.2 Wärmeleistungsmessstrecke	28
3.1.3 Brennstoffverbrauch.....	29
3.2 Mess- und Analyseverfahren	29
3.2.1 Kontinuierlich erfasste Messgrößen	29
3.2.2 Diskontinuierlich erfasste Messgrößen	31
3.2.2.1 Gesamtstaub	31
3.2.2.2 Korngrößenverteilung (Impaktor)	32
3.3 Vor- und Nachbehandlung der Abscheidemedien	37
3.4 Beschreibung der Versuchsanlagen	38
3.4.1 Feuerungen	38
3.4.2 Anlagen zur Abgasnachbehandlung und -kondensation	48
3.5 Versuchsvarianten und Versuchs Brennstoffe.....	50
3.6 Versuchsdurchführung	57
3.7 Auswertungen	62
4 Ergebnisse zu versuchstechnischen Fragestellungen	65
4.1 Wirkung der Abgasverdünnung auf die Gesamtstaubmessung	65
4.2 Schwellenwerte für erhöhte Kohlenwasserstoffkonzentrationen	68
4.3 Gesamtstaubbezug bei Impaktormessungen	69
5 Ergebnisse der Einzelversuche	71
5.1 Messungen am Pelletkessel.....	71
5.1.1 Lasteinfluss.....	71
5.1.2 Einfluss der Pelletqualität (Feingehalt).....	72
5.2 Messungen am Holzhackschnitzelkessel	73
5.2.1 Lasteinfluss.....	73

5.2.2	Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt	74
5.2.3	Einfluss des Feingehalts	76
5.2.4	Einfluss des Brennstoffwassergehalts	77
5.3	Messungen am Scheitholzessel.....	78
5.3.1	Charakterisierung der Abbrandphasen.....	78
5.3.2	Lasteinfluss	80
5.3.3	Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt	82
5.3.4	Einfluss der Brennstoffaufbereitung	83
5.3.5	Einfluss des Brennstoffwassergehalts	85
5.3.6	Einfluss der Zugbedingungen.....	87
5.4	Messungen am Heizölkessel	89
5.4.1	Einfluss der Lastvariation	89
5.4.2	Einfluss des Schwefelgehaltes	90
5.5	Messungen an einem Kachelofenheizeinsatz	91
5.5.1	Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt	91
5.5.2	Einfluss der Brennstoffaufbereitung	93
5.5.3	Einfluss der Auflagemenge	95
5.5.4	Einfluss des Brennstoffwassergehalts	96
5.5.5	Einfluss der Zugbedingungen.....	98
5.5.6	Anwendereinflüsse (Fehlbedienung & Regelung).....	100
5.6	Messungen an einem Kaminofen.....	101
5.6.1	Charakterisierung der Abbrandphasen.....	102
5.6.2	Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt	103
5.6.3	Einfluss der Brennstoffaufbereitung	105
5.6.4	Einfluss der Auflagemenge	107
5.6.5	Einfluss des Brennstoffwassergehalts	108
5.6.6	Einfluss der Zugbedingungen.....	110
5.6.7	Anwendereinflüsse (Fehlbedienung & Regelung).....	111
6	Ergebnisse zu den Sekundärmaßnahmen.....	113
6.1	Elektrostatischer Abscheider	113
6.2	Kondensationswärmetauscher	114
7	Gegenüberstellung der untersuchten Feuerungsanlagen	119
7.1	Gesamtstaub und Korngrößenverteilungen.....	119
7.2	Gasförmige Abgaskomponenten	121
7.3	Wirkungsgrad	124
7.4	Emissionen bezogen auf den Brennstoffeinsatz	125
7.5	Ergebnisse der Prüfstandsmessungen bei der Typenprüfung.....	126
8	Zusammenfassung	129
9	Quellenverzeichnis	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau des Verdünnungstunnels am TFZ.....	27
Abbildung 2:	Prinzip der Impaktion	33
Abbildung 3:	Kaskadenimpaktor Kalman KS 220 im messbereiten Zustand (links), im Querschnitt (mitte) und im zerlegten Zustand mit Prallplattenhaltern und Impaktorkammern (rechts) (Bilder: Kalman)	36
Abbildung 4:	<i>Schema des Messaufbaus mit Impaktor KS 220 mit Steuergerät und Integration weiterer Messsignale für CO₂, O₂ und H₂O zur automatischen Kompensation eintretender Viskositätsänderung des Abgases (Bild: Kalman).....</i>	36
Abbildung 5:	Fließbild zur Vor- und Nachbehandlung der Prallplatten und des Endfilters für die Impaktion sowie der Filtermedien für die Gesamtstaubmessung (Trocknung erfolgt ohne Umluft)	37
Abbildung 6:	Pelletkessel Easyfire USP 25 (Bild: KWB).....	38
Abbildung 7:	Hackschnitzelkessel Compact 50 (HDG) (Bild: HDG)	40
Abbildung 8:	Scheitholzessel FHG Turbo 3000-30 (Fröling) (Bild: Fröling)	42
Abbildung 9:	Heizölfeuerung Logano G125-21 BE ECO (Buderus) (Bild: Buderus)	44
Abbildung 10:	Kachelofen-Einsatz HKD 5.1 der Ulrich Brunner GmbH, mit Gussnachheizfläche und elektronischer Verbrennungsluftregelung	46
Abbildung 11:	Kaminofen KK 50 F („Moon“) der Firma Wodtke	47
Abbildung 12:	Sekundärer Abgaswärmetauscher zur Rauchgaskondensation von Kleinanlagen ("Ein-Block-Typ" aus Graphitkeramik, Hersteller: SGL Carbon AG). Gesamtansicht (links) und Ansicht der Rauchgaskanäle (rechts)	49
Abbildung 13:	Prototyp eines sekundären Staubabscheiders ("Kleinst-Elektrofilter"). Hersteller: Spanner Re ² GmbH, Neufahrn n. Niederbayern links: Gesamtansicht, rechts: Einblick in Elektrodenhalterung mit Belüftungseinrichtung	50
Abbildung 14:	Pellets mit definiertem Feingehalt (Fraktion 1, jeweils links oben: <2 mm; Fraktion 2, jeweils links unten: 2 bis 3,15 mm)	52
Abbildung 15:	Siebung der gehackten Fichtenrinde	53
Abbildung 16:	Versuchsbrennstoffe für die Bestimmung des Aschegehaltseinflusses, Größenklassen nach Siebanalyse mit 3,15 mm, 8 mm und 45 mm Sieb	54
Abbildung 17:	Normalgroße und kleingespaltene Fichtenscheite (jeder Haufen entspricht ca. eine Brennstoffauflage)	55
Abbildung 18:	(von links nach rechts) 4 Buchenscheite á 1,125 kg (33 cm), 2 Holzbriketts á 2 kg und 2 Buchenscheite á 2,25 kg (33 cm) im Vergleich	56

Abbildung 19: Prüfstands Aufbau mit Scheitholzkessel und elektrostatischem Abscheider	59
Abbildung 20: Prüfstands Aufbau bei den Einzelfeuerstätten	61
Abbildung 21: Aufbau und Probenahme position im verwendeten Verdünnungstunnel für die Staubprobennahme am TFZ	66
Abbildung 22: Anstieg der gemessenen absoluten Staubemission im verdünnten Abgas gegenüber dem unverdünnten Abgas in Abhängigkeit von der Kohlenwasserstoffkonzentration (angegeben als Ges.-C, gemessen im unverdünnten Abgas). Auswertung von 95 Parallelmessungen an einem Kaminofen und einem Kachelofen mit verschiedenen Holzbrennstoffen	67
Abbildung 23: Relative Zunahme des Staubmesswertes im verdünnten Abgas gegenüber dem unverdünnten Abgas in Abhängigkeit von der Kohlenwasserstoffkonzentration (angegeben als Ges.-C, gemessen im unverdünnten Abgas). Auswertung von 95 Parallelmessungen an einem Kaminofen und einem Kachelofen mit verschiedenen Holzbrennstoffen	67
Abbildung 24: Zusammenhang zwischen CO und Gesamt-C-Emissionen, gemessen in Feuerungsversuchen an Einzelfeuerstätten (1 Kaminofen und 1 Kachelofenheizeinsatz) für Stückholzbrennstoffe	68
Abbildung 25: Gesamtstaubbestimmung mittels Summe der Impaktorstufen (Kalman KS220) verglichen mit der direkten Gesamtstaubbestimmung mit Planfilter gemäß VDI Richtlinie 2066 (Referenzmessung). Häufigkeit von Mehr- bzw. Minderbefunden der Impaktormessung gegenüber der Planfiltermethode bei insgesamt 53 Vergleichsmessungen (links) und Darstellung aller Einzelabweichungen (rechts). Alle Messungen im verdünnten Abgas. Die Referenzmessungen stellen Mittelwerte aus jeweils zwei parallel durchgeführten Planfiltermessungen dar (zum Messaufbau vgl. Abbildung 21).....	69
Abbildung 26: Vergleich zweier identischer Gesamtstaubmessungen bei hintereinander angeordneten Probenahmestellen im verdünnten Abgas: Häufigkeit von Mehr- bzw. Minderbefunden der zweiten (unteren) Probenahme position verglichen mit der ersten Messposition (Referenzmessung oben) in insgesamt 87 Vergleichsmessungen (links) und Darstellung aller Einzelabweichungen (rechts). Halbstündige Messungen mit Planfilter gemäß VDI- Richtlinie 2066	70
Abbildung 27: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas).....	71
Abbildung 28: Staub-Gesamtgehalt und -Korngrößenverteilung beim Einsatz unterschiedlicher Pelletqualitäten. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets mit < 0,5 % / 10 % / 20 % Feinanteil bei 3,15 mm Siebdurchmesser (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)	72

Abbildung 29: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas).....	74
Abbildung 30: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffen. Feuerung: Compact 50 (HDG). Bei Fichtenhackschnitzel ohne Rinde, Fichtenrinde und Buchenhackschnitzel Messung im unverdünnten Abgas (n = Anzahl Messungen)	75
Abbildung 31: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Feinanteilen im Brennstoff (mit und ohne Windsichtung). Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas).....	76
Abbildung 32: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel mit w = 22 % / 33 % / 38 % (n = Anzahl Messungen verdünnten Abgas)	77
Abbildung 33: Versuch 1: Gesamtstaub- und CO-konzentration während zweier Abbrände. Jeder Messpunkt entspricht einem 20-Minuten-Mittelwert einer Messung im verdünnten Abgas. Abbrand 1: halbe Kesselfüllung, Kessel kalt; Abbrand 2: volle Kesselfüllung, vorgeheizt. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000. (Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm).....	79
Abbildung 34: Versuch 2: Gesamtstaub- und CO-konzentration während zweier Abbrände. Jeder Messpunkt entspricht einem 15-Minuten-Mittelwert einer Messung im verdünnten Abgas. Abbrand 1: halbe Kesselfüllung, Kessel kalt; Abbrand 2: volle Kesselfüllung, vorgeheizt. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). (Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm).....	79
Abbildung 35: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas).....	81
Abbildung 36: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichten-, Birken-, Buchenscheitholz und Fichtenscheitholz ohne Rinde, Scheitlänge 50 cm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas).....	82
Abbildung 37: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Brennstoffaufbereitung als Scheite bzw. als Grobhackschnitzel. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenholz als normale / kleine / große Scheite, ungespalten als Rundling und gehackt (P63) (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas).....	84
Abbildung 38: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten bei Scheitholz und Grobhackgut. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm, Wassergehalt 12 % / 23 % /	

	31 % und Grobhackgut P63, Wassergehalt 12 % / 23 % (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)	86
Abbildung 39:	Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Förderdrücken (-10 Pa / -30 Pa / -50 Pa). Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)	88
Abbildung 40:	Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)	89
Abbildung 41:	Gesamtstaubgehalt und Schwefeldioxidkonzentration bei unterschiedlichen Brennstoffen. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL bzw. Heizöl schwefelarm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)	90
Abbildung 42:	Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchen-, Birken-, Fichtenscheitholz, Fichtenscheitholz ohne Rinde und Holzbriketts, Scheitlänge 33 cm	92
Abbildung 43:	Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg (n = Anzahl Messungen)	94
Abbildung 44:	Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 2,25 kg / 4,5 kg / 9 kg (n = Anzahl Messungen)	95
Abbildung 45:	Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 18 % / 23 % / 30 % Wassergehalt. (n = Anzahl Messungen).....	97
Abbildung 46:	Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Förderdrücken (-14 Pa / -24 Pa / -34 Pa). Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg (n = Anzahl Messungen)	99
Abbildung 47:	Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Steuerungsvarianten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg (n = Anzahl der Messungen)	100
Abbildung 48:	Verlauf von Sauerstoff-, Gesamtstaub-, Kohlenmonoxid- und Ges.-C-Konzentration während drei Abbränden. Jeweils 10-Minuten-Mittelwerte. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg	102

Abbildung 49: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg (n = Anzahl Messungen)	104
Abbildung 50: Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg (n = Anzahl Messungen)	106
Abbildung 51: Gesamtstaubgehalt bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchen-/Fichtenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg / 2,8 kg (n = Anzahl Messungen).....	107
Abbildung 52: Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 20 % / 30 % Wassergehalt (n = Anzahl Messungen)	109
Abbildung 53: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Förderdrücken (-12 Pa / -22 Pa / -32 Pa). Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg.....	111
Abbildung 54: Gesamtstaubgehalt und Staub-Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Einstellung des Sekundärluftschiebers. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg	112
Abbildung 55: Abscheidung in einem elektrostatischen Abscheider in Kombination mit einem Scheitholzkessel. Darstellung einzelner Wertepaare. Abscheider: Fa. Spanner Re ² . Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling).	113
Abbildung 56: Wirkung des elektrostatischen Abscheiders auf die Korngrößenverteilung in den Stäuben. Mittelwerte aus je 2 Wiederholungsmessungen. Abscheider: Fa. Spanner Re ² . Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling).	114
Abbildung 57: Staubabscheidung in einem kondensierenden Sekundärwärmetauscher ("Brennwertnutzung") in Kombination mit einem Hackschnitzelkessel (HDG Compact 50). Hier: Abscheidung bezogen auf die Staubkonzentration im Abgas. Darstellung aller einzelnen Wertepaare aus jeweils vier Wiederholungsmessungen, Brennstoffwassergehalte bei 16 bis 23 % und Rücklauftemperatur bei 25 °C (WT Wärmetauscher)	115
Abbildung 58: Staubabscheidung in einem kondensierenden Sekundärwärmetauscher ("Brennwertnutzung") in Kombination mit einem Hackschnitzelkessel (HDG Compact 50). Hier: Abscheidung bezogen auf die Netto-Wärmeerzeugung. Darstellung aller einzelnen Wertepaare aus jeweils vier Wiederholungsmessungen, Brennstoffwassergehalte bei 16 bis 23 % und Rücklauftemperatur bei 25 °C (WT Wärmetauscher)	116

Abbildung 59: Wirkung des Sekundärwärmetauschers mit kondensierender Wirkung ("Brennwertnutzung") auf die Korngrößenverteilung in den Stäuben (WT Wärmetauscher). Mittelwerte aus je 2 Wiederholungsmessungen	117
Abbildung 60: Mittlere Staubemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen).....	120
Abbildung 61: Korngrößenverteilung der Staubemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40.....	121
Abbildung 62: Mittlere Kohlenmonoxidemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen)	122
Abbildung 63: Mittlere Emissionen an organischen Stoffen (angegeben als Ges.-C) der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen; n.b. = nicht bestimmt)	123
Abbildung 64: Mittlere Stickoxidemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 ..	124
Abbildung 65: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40.....	125
Abbildung 66: Emissionen von Gesamtstaub, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und organischen Komponenten der untersuchten Holzfeuerungen bezogen auf den Brennstoffeinsatz für die Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen; n.b. = nicht bestimmt)	126
Abbildung 67: Emissionen von Gesamtstaub, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und organischen Komponenten der untersuchten Holzfeuerungen bei der Typenprüfung und bei den Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen; n.b. = nicht bestimmt)	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verzeichnis der wichtigsten Holzfeuerungen für den häuslichen Bereich in Deutschland mit Unterscheidung nach Bauarten sowie Nennung von baugleichen Anlagen.....	20
Tabelle 2:	Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte	30
Tabelle 3:	Anbieter von Kaskadenimpaktoren für Abgasmessungen an Feuerungen.....	35
Tabelle 4:	Anlagentechnische Merkmale KWB Easyfire USP 25	39
Tabelle 5:	Anlagentechnische Merkmale HDG Compact 50	41
Tabelle 6:	Technische Merkmale Scheitholzkessel Fröling FHG Turbo 3000-30	43
Tabelle 7:	Technische Merkmale Heizölfeuerung Buderus Logano G125-21 BE ECO	44
Tabelle 8:	Anlagentechnische Merkmale Kachelofen-Einsatz Brunner HKD 5.1	46
Tabelle 9:	Anlagentechnische Merkmale Wodtke Kaminofen KK 50 F („Moon“)	48
Tabelle 10:	Heizwert, Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff-, Schwefel- und Aschegehalt der verwendeten Versuchsbrennstoffe	51
Tabelle 11:	Weitere Elementgehalte der eingesetzten Versuchsbrennstoffe	51
Tabelle 12:	Mittlere Masse und mittlerer Durchmesser der beim Scheitholzkessel eingesetzten Scheite	54
Tabelle 13:	Typische Prozesskenndaten bei den Versuchen mit Verdünnungstunnel (Versuche mit Kaminofen)	65
Tabelle 14:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets	72
Tabelle 15:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Pelletqualitäten. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets mit < 0,5 % / 10 % / 20 % Feinanteil.....	73
Tabelle 16:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel.....	74
Tabelle 17:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffen und Aschegehalten. Feuerung: Compact 50 (HDG). Bei Fichtenhackschnitzeln ohne Rinde, Fichtenrinde und Buchenhackschnitzeln: Messung im unverdünnten Abgas.....	76
Tabelle 18:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Feinanteilen im Brennstoff (mit und ohne Windsichtung). Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackgut (n = Anzahl der Messungen)	77

Tabelle 19:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel mit $w = 22 \% / 33 \% / 38 \% \dots$	78
Tabelle 20:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm	81
Tabelle 21:	Übersicht der Messwerte bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichten-, Birken-, Buchenscheitholz und Fichtenscheitholz ohne Rinde, Scheitlänge 50 cm.....	83
Tabelle 22:	Übersicht der Messwerte bei unterschiedlicher Brennstoffaufbereitung. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenholz als normale / kleine / große Scheite, ungespalten als Rundling und gehackt (P63).....	84
Tabelle 23:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten bei Scheitholz und Grobhackgut. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm, Wassergehalt 12 % / 23 % / 31 % und Grobhackgut P63, Wassergehalt 12 % / 23 %	87
Tabelle 24:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Förderdrücken (-10 Pa / -30 Pa / -50 Pa). Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm.....	88
Tabelle 25:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL ($n = \text{Anzahl der Messungen}$)	90
Tabelle 26:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffen. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL bzw. Heizöl schwefelarm.....	91
Tabelle 27:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchen-, Birken-, Fichtenscheitholz, Fichtenscheitholz ohne Rinde und Holzbriketts, Scheitlänge 33 cm	93
Tabelle 28:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg	94
Tabelle 29:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 2,25 kg / 4,5 kg / 9 kg.....	96

Tabelle 30:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 18 % / 23 % / 30 % Wassergehalt98	98
Tabelle 31:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Förderdrücken (-14 Pa / -24 Pa / -34 Pa). Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg.....99	99
Tabelle 32:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Steuerungsvarianten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg.....101	101
Tabelle 33:	Charakterisierung der Abbrandphasen - Mittelwerte über jeweils einen Abbrand. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg.....103	103
Tabelle 34:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg105	105
Tabelle 35:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg.....106	106
Tabelle 36:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchen-/ Fichtenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg / 2,8 kg108	108
Tabelle 37:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 20 % / 30 % Wassergehalt110	110
Tabelle 38:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Förderdrücken (-12 Pa / -22 Pa / -32 Pa). Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg111	111
Tabelle 39:	Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Einstellung des Sekundärluftschiebers. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg112	112
Tabelle 40:	Übersicht der bei der Gegenüberstellung der einzelnen Feuerungsanlagen berücksichtigten Versuchsvarianten119	119

1 Einleitung und Zielsetzung

Bei der Holzverbrennung kommt es zu Partikelemissionen, die zur allgemeinen Feinstaubbelastung der Atmosphäre beitragen. Vor allem die häuslichen Holzheizungen, d. h. Einzelfeuerstätten und kleine Zentralheizungen für Scheitholz, Hackschnitzel oder Pellets, werden in letzter Zeit vermehrt als Verursacher angesehen. Viele grundsätzliche Fragen – von den Einflussmöglichkeiten und Minderungsmöglichkeiten bis hin zur Beschaffenheit und Gefährlichkeit dieser Stäube im Vergleich zu anderen Stäuben wie z. B. Dieselruß sind derzeit noch kaum erforscht und daher zur unzureichend zu beantworten.

Deshalb wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ein umfangreiches Forschungsprojekt gefördert, in welchem die Partikelemissionen aus verschiedenen Holzfeuerungen und unter verschiedenen Einflüssen untersucht und bewertet werden sollten. Ziel war es dabei, in reproduzierbaren Messungen an repräsentativen Holzfeuerungen ein genaueres Bild über den Stand sowie die Einfluss- und Minderungsmöglichkeiten für die Feinstaubemission zu erhalten. Dazu sollte zusätzlich auch eine Charakterisierung der anfallenden Stäube erfolgen. An insgesamt 6 Feuerungen – vom Kaminofen bis zur Holzpellet-Zentralheizung – wurden die Einflüsse und Ursachen für überhöhte Feinstaub- und gasförmige Emissionen bestimmt und Maßnahmen zur deren Minderung (z. B. Filter) untersucht.

Der vorliegende Bericht stellt einen thematischen Auszug aus einem umfangreichen Verbundprojekt zur Feinstaubproblematik dar. In diesem Projekt wurden die Feuerungsversuche und Abgasuntersuchungen vom TFZ durchgeführt, während die abgeschiedenen Stäube von den weiteren Projektpartnern analysiert und bewertet wurden. Hierbei bestand eine intensive Zusammenarbeit mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) und dem Institut für Energiewirtschaft und Umwelttechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Im vorliegenden Bericht werden jedoch die Fragen der Staubcharakterisierung weitgehend ausgeblendet. Lediglich die feuerungs-, bedienungs- und brennstofftechnischen Einflüsse sowie die Korngrößenbestimmung der Stäube werden hier betrachtet. Diese Aspekte sind vor allem vor dem Hintergrund der soeben novellierten und in 2010 in Kraft tretenden 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung von Belang. Somit soll die vorliegende Arbeit vornehmlich bei der generellen Bewertung und Einordnung der Gesamtstaubemissionen und sonstigen gasförmigen Schadstoffe hinsichtlich der verschärften Emissionsbegrenzungen in Deutschland dienen.

2 Auswahl der Feuerungen

Die Auswahl der Feuerungsarten soll vorrangig die wichtigsten Verbrennungsprinzipien und Bauarten für Holzfeuerungen abbilden. Mit der Beschränkung auf je eine Anlage zu jeder Bauart kann jedoch kein repräsentativer Querschnitt der anbietenden Hersteller und der am Markt vorhandenen technischen Varianten erzielt werden. Vielmehr sollen marktübliche typische Feuerungen ausgewählt werden, an denen die im Versuchsplan dargestellten Einflussgrößen und generellen Unterschiede untersucht werden. Bei der Anlagenauswahl soll allerdings der Grundsatz gelten, dass es sich um Anlagen handelt, die den derzeitigen Stand der Technik von neu verkauften Anlagen repräsentieren. Es wird nicht der Versuch unternommen, den vorhandenen Bestand an Feuerungen abzubilden, beispielsweise indem auf Anlagen ohne Turbulatoren zur Reinigung der Wärmetauscher oder ohne Abgasregelung zurückgegriffen wird.

2.1 Identifikation bedeutender Bauformen

Um die Häufigkeit der verschiedenen Bauarten im derzeitigen Angebot von Neuanlagen abschätzen zu können, wurde eine nach Bauarten unterschiedene Herstellerliste erarbeitet (Tabelle 1), wobei die Zuordnung der Produkte auf Basis von Produktunterlagen oder durch direkte Beurteilung von Anlagenmustern in der Anlagenausstellung am TFZ in Straubing erfolgte.

Bei den Pelletfeuerungen werden – wie bei den Hackschnitzelanlagen – Unterschub- und Quereinschubfeuerungen unterschieden, hinzu kommt das Prinzip der Abwurf- feuerung. Vereinfachend werden hierunter die Schalenbrenner, Tunnelbrenner oder Kipprost- feuerungen subsummiert [1]. In Tabelle 1 wird eine Übersicht über die bei Scheitholz-, Hackschnitzel- und Pelletfeuerungen am häufigsten realisierten Verbrennungsprinzipien gegeben. Sie dient als Basis für eine Eingrenzung der für die vorgesehenen Messungen in Frage kommenden Anlagen.

Bei den Hackschnitzelkesseln wird nach dem Unterschubfeuerungsprinzip sowie dem Quereinschubfeuerungsprinzip mit und ohne Rost unterschieden. Vereinfachend werden weitere Untergruppen der Rostfeuerungen (z. B. Drehrost-, Walzenrost- oder Vorschub- rostfeuerungen) hier nicht weiter differenziert.

Bei den Scheitholz- kesseln werden hierbei die Verfahren des seitlichen Unterbrandes und des Sturzbrandes unterschieden. Das frühere Durchbrandprinzip ist heute bei Zentral- heizungskesseln nicht mehr Stand der Technik und hat daher bei neuen Scheitholz- kesseln inzwischen lediglich eine untergeordnete Bedeutung. Dieses Prinzip wird deshalb hier nicht weiter betrachtet, zumal es sich dabei auch nicht um förderfähige Anlagen nach dem Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien handelt.

Tabelle 1: Verzeichnis der wichtigsten Holzfeuerungen für den häuslichen Bereich in Deutschland mit Unterscheidung nach Bauarten sowie Nennung von baugleichen Anlagen

Fabrikat / Vertrieb	Bereich Nenn- wärme- leistung (kW)	Scheit- holzkessel		Hackschnitzel- kessel			Pelletkessel		
		seitlicher Unterbrand	Sturzbrand	Unterschub- feuerung	Quereinschub- feuerung m. Rost	Quereinschub- feuerung o. Rost	Unterschub- feuerung	Quereinschub- feuerung	Abwurf- feuerung
Arca Regovent 02 (= Harreither TS)	20 - 45	X							
Arca Regovent PK (= Biotech PZ)	12 - 35								X
Atmos DC (= Ferro Turbo)	23 - 49		X						
Baxi Multi Heat	15 - 40							X	
Baxi Multi Heat	15 - 40					X			
Biotech PZ (= Arca Regovent PK)	12 - 35								X
Buderus Logano SP251 (= En-Tech Fire Fox PK)	15 - 25						X		
Buderus Logano SX231 (= Fischer GA-TX)	28 - 33	X							
Buderus Logano SH (= Eta Hack)	20 - 89				X				
Eder Biovent (= Wolf HVG)	20 - 48	X							
Eder Pellevent (= Wolf Pellevent)	17							X	
Eder Pellevent-M	15 - 30						X		
EnTech Fire Fox PK (= Buderus Logano SP251)	15 - 47						X		
Eta SH	20 - 60		X						
Eta Hack (= Buderus Logano SH)	20 - 90				X				
Eta PE	15 - 30							X	
Ferro Biomat	11 - 193							X	
Ferro Biomat	19 - 160					X			
Ferro Turbo (= Atmos DC)	23 - 49		X						
Fischer Pelletra S	14								X
Fischer Ixtra	22 - 33	X							
Fischer TX 38 F	32 - 43	X							
Fischer VX	23 - 30		X						
Fröling FHG Turbo 3000	20 - 70		X						
Fröling Turbomatic	28 - 110				X				
Fröling P3	10								X
Fröling P2	15 - 25						X		
Gerlinger Biokompakt AWK	25 - 130			X					
Gilles Pelletkessel	5 - 60							X	
Gilles HPK-RA	10 - 145				X				
Grimm Pellino	15								X
Guntamatic Biostar	12 - 23								X
Guntamatic BMK	20 - 50	X							
Guntamatic Synchro	31 - 44	X							
Hargassner HSV	12 - 22							X	
Hargassner WTH	25 - 45							X	
Hargassner HSV	25 - 100				X				
Harreither TS (= Arca Regovent 02)	20 - 45	X							

Fabrikat / Vertrieb	Bereich Nenn- wärme- leistung (kW)	Scheit- holzkessel		Hackschnitzel- kessel			Pelletkessel		
		seitlicher Unterbrand	Sturzbrand	Unterschubfeuerung	Quereinschub- feuerung m. Rost	Quereinschub- feuerung o. Rost	Unterschubfeuerung	Quereinschub- feuerung	Abwurfteuerung
HDG Compact	15 - 200				X				
HDG Pelletmaster	15 - 25							X	
HDG Euro	30 - 50	X							
Heizomat HSK-RA	30 - 500				X				
Herlt HV	15 - 145		X						
Herz Pelletstar	15 - 35								X
Herz Pelletfire	15 - 35								X
Herz Firematic	30 - 150			X					
Herz Firestar	25 - 50		X						
Hoval Agrolyt	20 - 50		X						
Hoval Biolyt	15 - 25								X
Köb Pyromat	24 - 120	X							
Köb Pyromat	35 - 90				X				
Künzel PL	15 - 25								X
Künzel HV-BT	15 - 50		X						
KWB USP	10 - 30						X		
KWB USV	15 - 100			X					
KWB SHV (= Fröling FHG Turbo 3000)	20 - 50		X						
Lopper Drummer	15 - 800	X							
Lopper Turner	40 - 450				X				
Ökofen PE	8 - 32						X		
P & H Energy PH	12 - 47							X	
Perhofer PK	15							X	
Reka RS	20 - 60				X				
Rennergy Pelletkessel (= Hargassner HSV)	12 - 22							X	
Rennergy HS-Kessel (= Hargassner HSV)	25 - 100				X				
Rennergy SH-Kessel (= Fröling FHG Turbo)	20 - 50		X						
Sonnig (= Strebel Deutschland)	14 - 30								X
Solarfocus Therminator	20 - 60		X						
Solarfocus Pellettop	15								X
sht Thermocomfort PN	15 - 30							X	
sht Thermosolid VN	11 - 55		X						
Sommerauer & Lindner SL	30 - 150			X					
Sommerauer & Lindner SL-P	15 - 25						X		
Strebel Thermostrom Thermotec	15								X
Strebel Thermostrom Turbotec	20 - 70		X						
Viessmann Vitolic 200 (= Windhager HMX)	26 - 40	X							
Viessmann Vitolic 300 (= Windhager PMX)	15								X
Windhager HMX (= Viessmann Vitolic 200)	22 - 40	X							
Windhager PMX (= Viessmann Vitolic 300)	15 - 26								X
Wolf HVG (= Eder Biovent)	20 - 48	X							
Wolf Pellevent (= Eder Pellevent)	15							X	
Gesamtanzahl		14	14	4	11	2	7	13	15
Anteil der Nennungen		50%	50%	24%	65%	12%	20%	37%	43%

Pelletkessel. Zu den am häufigsten realisierten Verbrennungsprinzipien für Holzpellets zählt die Abwurfffeuerung; sie wird bei 43 % der angebotenen Typen verwendet. Das Prinzip ist mit relativ wenig baulichem Aufwand zu realisieren und kommt deshalb auch als Zusatz- bzw. Ersatzbrenner an Scheitholz- oder Ölfeuerungen zum Einsatz. Bei vielen erst in jüngster Zeit neu auf dem Markt eingeführten Feuerungstypen wird auch das Quereinschubfeuerungsprinzip verwendet. Die zahlenmäßig größte Gruppe bei den Verkaufszahlen wird aber – trotz der kleineren Anzahl von baulichen Varianten (vgl. Tabelle 1) – bei den Unterschubfeuerungen vermutet. Diese Feststellung wurde auf der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses getroffen; sie lässt sich auch aus der Tatsache ableiten, dass es sich hierbei um eine langjährig eingeführte Bauform und somit um ein Pelletverbrennungsprinzip "der ersten Stunde" handelt. Anders als beispielsweise die Abwurfffeuerungen wird das Unterschubprinzip meist in "reinen" Pelletkesseln, d. h. weniger häufig in Kombinationsbrennern (z. B. mit Scheitholzkessel) verwendet. Da dem Prinzip der Unterschubfeuerung auch durch die Stiftung Warentest (test 08/2005) gute Werte bescheinigt wurden, sollte diesem Prinzip der Vorzug gegeben werden.

Hackschnitzelkessel. Bei den angebotenen Verbrennungsprinzipien für Hackschnitzelkessel überwiegen Rostfeuerungen, die nahezu von zwei Dritteln aller Hersteller angeboten werden. Unterschubfeuerungen machen dagegen nur ca. 25 % der angebotenen Varianten aus, Quereinschubfeuerungen ohne Rost werden mit ca. 12 % der Feuerungstypen noch seltener verwendet (Tabelle 1). Diese Angaben erlauben zwar keine Aussage über den Anlagenbestand oder die abgesetzten Stückzahlen, sie zeigen aber, wie häufig die jeweiligen Verbrennungsprinzipien realisiert wurden und geben Anhaltspunkte über deren Bedeutung. Die Zahlen legen nahe, dass eine Quereinschubfeuerung mit Rost für die hier durchzuführenden Messungen verwendet werden sollte, zumal damit auch – wie in der Praxis oft gefordert – ein hinsichtlich Brennstoffart und Brennstofffeuchte relativ breites Brennstoffsortiment verwendet werden kann (z. B. Brennstoffe mit größerer Feuchte oder höheren Aschegehalten bzw. zur Verschlackung neigende Brennstoffe).

Scheitholzkessel. Das Ergebnis in Tabelle 1 zeigt, dass bei den Scheitholzkesseln etwa gleich viele Anbieter das seitliche Unterbrand- und das Sturzbrandprinzip verwenden, wobei die baugleichen Anlagen hier als eigenständig mitgezählt wurden. In Tabelle 1 werden hierzu sowohl technisch vollkommen identische Produkte erfasst, die sich lediglich in optischen Details (Lackierung, Form der Verkleidung etc.) unterscheiden, als auch Produkte, bei denen das Feuerungsprinzip eines anderen Herstellers verwendet wird, das mit eigenen Komponenten (z. B. Regelung, Entaschung) ergänzt wird. Dabei ist unerheblich, ob die Feuerung als funktionale Einheit vom ursprünglichen Hersteller bezogen oder in Lizenz gefertigt wird.

Aus den Angaben in Tabelle 1 kann allerdings keine Aussage über die eingesetzten bzw. aktuell verkauften Anlagenzahlen getroffen werden. Daher sind weitergehende Überlegungen erforderlich, die die erwartete zukünftige Entwicklung und die prinzipiellen Vor- und Nachteile dieser Prinzipien betreffen. Für das Prinzip des seitlichen Unterbrandes ist hierzu festzustellen, dass es sich um eine asymmetrische Brenngasführung im Primärverbrennungsbereich (Glutbett) handelt. Die Brenngasdüse, über die die Brenngase in

die Sekundärbrennzone eintreten, ist seitlich angeordnet, wodurch die vier Winkel des meist rechteckigen Brennraumbodens unterschiedlich stark von Primärluft angeströmt werden. Dies hat zur Folge, dass der Ausbrand des Kohlerückstandes am Ende des Chargenabbrandes gelegentlich nicht ganz vollständig ist. Dieser technische Nachteil wird in Kauf genommen, weil das Verbrennungsprinzip eine kompaktere Bauart mit geringerer Bauhöhe ermöglicht und der Füllschacht (Holzvorrat) bei gleicher Bauhöhe etwas größer ausgeführt werden kann als bei Sturzbrandfeuerungen. Außerdem kann eine einfache Entaschung über den hier stets vorhandenen Rost erfolgen.

Sturzbrandfeuerungen besitzen dagegen eine in der Mitte des Feuerraumbodens symmetrisch eingelassene Brenngasdüse (z. T. auch als länglicher Schlitz), so dass sich über die Glutbodenfläche relativ gleichmäßige Verbrennungsbedingungen einstellen. Die direkt darunter liegende Brennkammer limitiert die Bauhöhe des Vorratsschachtes. Dennoch ist damit zu rechnen, dass dieses Prinzip zumindest bei Kleinfeuerungsanlagen zukünftig vermehrt eingesetzt wird. Diese Auffassung wurde auch auf der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses vertreten. Somit ist bei der Anlagenauswahl diesem Anlagentyp der Vorzug zu geben.

Ölkessel. Um die aus den Versuchen mit den Biomassefeuerungen gewonnenen Ergebnisse im Vergleich mit Anlagen für fossile Brennstoffe einordnen zu können, soll während des Messprogramms auch ein Vertreter dieser Feuerungsanlagen untersucht werden. Da bei einer Gasfeuerung keine messbaren Staubemissionen zu erwarten sind, wurde beschlossen, einen Heizölkessel zu verwenden. Dieser sollte auf dem neusten Stand der Technik sein, aber wegen der noch geringen Verbreitung keine Brennwertnutzung beinhalten. Zudem muss der auszuwählende Kessel repräsentativ für den Markt sein.

Kachelofenheizeinsatz. Der Kachelofenheizeinsatz ist vor allem interessant, weil er systematisch anders betrieben wird als beispielsweise ein Kaminofen. Das liegt daran, dass die große Speichermasse eine größere Brennstoffbeladung bzw. längere Feuerungszyklen erlaubt. Hinzu kommt, dass der Betreiber – insbesondere bei fehlender Sichtscheibe – nicht so leicht zu einem gedrosselten Betrieb verleitet wird. Letzteres kann bei allen Bauformen gegeben sein, die durch eine Sichtscheibe, eine in der Regel für den Aufstellungsraum überdimensionierte Wärmeleistung, eine zu geringe Speichermasse oder eine fehlende Wärmeableitung in einen Puffer gekennzeichnet sind, der Betreiber aber während seines Beiseins das Flammenspiel aufrecht erhalten oder aus anderen Gründen den Abbrandzyklus verlängern möchte.

Kaminofen. Kaminöfen, d. h. Einzelfeuerstätten mit Sichtscheibe, stellen bei den Anlagenverkäufen heute die mit Abstand bedeutendste Bauart in Deutschland dar. Von den 360.265 Einzelfeuerstätten, die in 2004 abgesetzt wurden, stellen sie mit 244.150 Stück einen etwa 68 %-igen Anteil, während Kamine (Heizkamine und offene Kamine) mit 61.575 (17 %), Öfen (Grund-, Warmluft- und Kombiöfen) mit 43.050 (12 %) und Einsätze für Öfen und Kamine (z. B. Kaminkassetten) mit 11.490 (3 %) zu Buche schlagen [2].

Wegen der dargestellten großen Bedeutung soll in den hier durchzuführenden Messungen auch ein Kaminofen als Vertreter der Einzelfeuerstätten zum Einsatz kommen. Es handelt sich hierbei um eine Bauartengruppe, bei der fast ausschließlich das Durchbrandfeuerungsprinzip Anwendung findet. In den meisten Fällen besitzen die Feuerungen einen Rost, durch den insbesondere beim Anheizen ein Teil der Primärluft zugeführt wird und über den auch eine Entaschung erfolgen kann. Seltener wird auf einen Rost verzichtet, zumal dann die Entaschung schwierig ist und der größte Teil der Asche über den Abgasweg ausgetragen werden muss.

Für die durchzuführenden Versuche soll daher auf die übliche Feuerungsvariante mit Rost zurückgegriffen werden. Hinzu kommt, dass es sich um eine Anlage handeln sollte, die den besonderen Anforderungen des DIN_{plus}-Gütesiegels genügt, zumal dieses bei neueren Feuerungen inzwischen einen allgemeinen technischen Standard darstellt, der von den meisten Anlagen erfüllt werden kann. Diese Anforderungen betreffen die Abgasemissionen und den Wirkungsgrad und sind nachfolgend für Kaminöfen aufgelistet [3], wobei sich die Emissionsangaben auf Abgas im Normzustand bei 13 % Sauerstoffgehalt beziehen.

- $\text{CO} \leq 1.500 \text{ mg/Nm}^3$
- $\text{NO}_x \leq 200 \text{ mg/Nm}^3$
- $\text{Ges.-C} \leq 120 \text{ mg/Nm}^3$
- $\text{Staub} \leq 75 \text{ mg/Nm}^3$
- $\text{Wirkungsgrad} \geq 75 \%$

Bei Kamineinsätzen gelten die gleichen DIN_{plus}-Anforderungen, lediglich für den Wirkungsgrad wird differenziert (mindestens 78 % für Feuerungen mit Nachheizfläche und mindestens 72 % für Feuerungen ohne Nachheizfläche) [4]. Für Kachelofenheizeinsätze sind die Anforderungen beim Staubausstoß leicht verschärft (höchstens 65 mg/Nm^3) und auch beim Wirkungsgrad gelten mit mindestens 80 % höhere Anforderungen [5].

2.2 Auswahl der zu messenden Feuerungen

Auf Basis der in Kapitel 2.1 eingegrenzten Produktauswahl wird vorgeschlagen, die nachfolgenden Feuerungen für die Messungen zu verwenden.

Pelletkessel. Als Pelletkessel kommt eine Unterschubfeuerung der Firma KWB (St. Margarethen, Österreich), Typ "Easyfire USP 25" mit 25 kW Nennwärmeleistung zum Einsatz. Baugleichheit besteht zu den Pelletkesseln der Firmen Ökofen (Lembach, Österreich), Paradigma (Karlsbad, Deutschland), Solvis (Braunschweig, Deutschland) und pro solar (Ravensburg, Deutschland); bei den beiden erstgenannten Anbietern handelt es sich um die am längsten mit dieser Technik etablierten Hersteller, die hierfür auch als Urheber gelten können. Die Tatsache der Baugleichheit mit weiteren Anbietern (teilweise nur Unterschiede in der Verkleidung und in der Regelung) weist auf eine hohe Bedeutung dieses Pelletkessels im Markt hin. Die bereits oben erwähnte Stichprobenerhebung

im Bezirk Niederbayern [6] ist aufgrund der geringen Anlagenanzahl hier nicht aussagekräftig.

Der gewählte Kessel ist mit Abgasturbulatoren ausgestattet und wird automatisch gezündet. Die Verwendung von Getreidekörnern als Brennstoff ist hier bauartbedingt – wie bei den meisten Pelletkesseln – nicht möglich. Die Nennwärmeleistung von 15 kW entspricht dem Leistungsbedarf von modernen Einfamilienhäusern. Aus messtechnischen Überlegungen ist es hier jedoch sinnvoll, dem Kessel mit 25 kW den Vorzug zu geben, da mit diesem Kessel größere Abgasmassenströme und damit eine erhöhte Messgenauigkeit erreicht werden. In jüngster Zeit ist außerdem zu beobachten, dass Pelletfeuerungen wegen der gestiegenen Heizölpreise auch bei größeren Leistungen verstärkt nachgefragt werden.

Hackschnitzelkessel. Die Messungen an einem Hackschnitzelkessel wurden an einer Anlage der Firma HDG (Massing, Deutschland), Typ "Compact 50" mit 50 kW Nennwärmeleistung durchgeführt. Dieser Kessel verfügt über einen Rost und wird im Quereinschub beschickt. Er stellt eine neue Generation eines seit vielen Jahren im Markt eingeführten Kessels dar und repräsentiert den heutigen Stand der Technik. Die bereits oben erwähnte Stichprobenerhebung im Bezirk Niederbayern [6] lässt den Schluss zu, dass der Hersteller HDG aktuell einen hohen Marktanteil besitzt, da er bei den Erstmessungen mit 56 von 258 Anlagen hinter dem österreichischen Anbieter Sommerauer und Lindner rangiert, der allerdings ein Unterschubverbrennungsprinzip anwendet. Auch bei den wiederkehrenden Messungen in Niederbayern rangiert der Hersteller HDG mit 191 von 1884 Nennungen unter den ersten 5 von insgesamt 74 Herstellern. Der ausgewählte Kessel wird deutschlandweit vertrieben und ist mit automatisch bewegten Abgasturbulatoren ausgestattet. Die Zündung erfolgt – wie mittlerweile praxisüblich – mittels Heißluftgebläse, so dass auf einen Gluterhaltungsbetrieb mit ungünstigen Verbrennungsbedingungen und Geruchsbelästigung verzichtet werden kann. Es wird eine Ausführung mit Lambda-Regelung verwendet. Die Nennwärmeleistung von 50 kW repräsentiert einen typischen Einsatzfall für Hackschnitzelfeuerungen im häuslich-landwirtschaftlichen und kleineren gewerblichen Bereich. Die Verwendung von Getreidekörnern als Brennstoff ist hier bauartbedingt – wie bei den meisten Hackschnitzelkesseln – nicht möglich.

Scheitholz. Als Scheitholzessel wurde ein Sturzbrandkessel der Firma Fröling (Grießkirchen, Österreich), Typ "FHG Turbo 3000 (Lambda)" mit 30 kW Nennwärmeleistung ausgewählt. Dieser Kessel ist bereits seit vielen Jahren im Markt eingeführt und repräsentiert in seiner heutigen Ausführung den Stand der Technik. Daten zum deutschlandweiten Marktanteil einzelner Hersteller sind zwar generell für Holzzentralheizungen nicht verfügbar, Anhaltspunkte lassen sich jedoch aus Stichprobenerhebungen ziehen. Einer für den Bezirk Niederbayern durchgeführten Erhebung zufolge lagen die Scheitholzessel des Herstellers Fröling (Österreich) in 2004 mit 169 von insgesamt 495 Erstmessungen in dieser Region an der Spitze, gefolgt von HDG mit 151 Stück, alle übrigen Hersteller wiesen dagegen in dieser Region weniger als 30 Stück/Jahr auf [6]. Aufgrund des großen Anteils des Absatzes von Holzkesseln in den südlichen Bundesländern kann diese Studie als repräsentativ für den Absatz an Stückholzkesseln in Deutschland angesehen werden. Der vorgeschlagene Kessel wird deutschlandweit vertrieben und ist zu-

dem baugleich mit mindestens einem weiteren Scheitholzessel (Firma KWB, Typ SHV). Der Kessel ist – wie viele Scheitholzessel – mit Abgasturbulatoren ausgestattet, die der Wirkungsgradsteigerung dienen und die über eine manuell bedienbare Einhebelmechanik auch zur Abreinigung der Wärmetauscherflächen verwendet werden können. Es wird eine Ausführung mit Lambdaregelung verwendet, die damit auch den Kriterien des Marktanzreizprogramms entspricht. Die Nennwärmeleistung von 30 kW repräsentiert einen typischen Einsatzfall in ländlichen Einfamilienhäusern.

Ölkessel. Der ausgewählte Heizölkessel war eine Feuerung der Marke Buderus (Logano G125-21 BE ECO). Es handelt sich um einen marktüblichen Kessel für Einfamilienhäuser, der in Deutschland weit verbreitet ist und den Stand der Technik im Bereich der Nutzung fossiler Brennstoffe widerspiegelt.

Kachelofenheizeinsatz. Auf Vorschlag des Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. (HKI) [7] wird ein Kachelofenheizeinsatz Typ HKD 5.1 der Firma Ulrich Brunner GmbH mit automatischer Verbrennungsluftsteuerung EOS eingesetzt. Der Kachelofenheizeinsatz kann als stellvertretend für einen modernen Kachelofenheizeinsatz angesehen werden. Er erfüllt die Anforderungen des DIN_{plus}-Gütesiegels und bietet darüber hinaus noch eine automatische Verbrennungsluftsteuerung. Diese kann zwar nicht als Standard für alle Kachelofenheizeinsätze gelten, stellt aber eine innovative Möglichkeit dar, Fehlbedienungen, wie beispielsweise zu frühes Schließen der Verbrennungsluftzufuhr, zu verhindern.

Kaminofen. Da allgemein zugängliche Zahlen über die derzeit von den einzelnen Herstellern abgesetzten Anlagen und Feuerungstypen nicht vorliegen, wurde der Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. (HKI) [7] gebeten, aus der ihm vorliegenden Marktübersicht einen Kaminofen vorzuschlagen. Bei diesem Vorschlag handelt es sich um den Typ Blueline 9 der Firma BBT Thermotechnik GmbH, der unter der Marke Buderus vertrieben wird. Da allerdings bereits ein Ölkessel der Marke Buderus während des Versuchsprogramms zum Einsatz kommt, wurde ein anderer am Markt stark vertretener Hersteller hochwertiger Kaminöfen ausgewählt. Die Wahl fiel auf den Kaminofen Typ KK 50 F Moon der Firma Wodtke GmbH, Tübingen. Die Feuerung erfüllt die Kriterien des DIN_{plus}-Gütesiegels und ist im höheren Preissegment (ca. 3.000 EUR) angesiedelt. Mit einer Nennwärmeleistung von 7 kW liegt er im typischen Bereich für Kaminöfen

.

3 Material und Methoden

3.1 Aufbau des Versuchsstandes

3.1.1 Abgasmessstrecke

Die Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in Straubing durchgeführt. Die messtechnische Ausstattung wurde entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung gewählt. Nachfolgend soll der Aufbau des für die speziellen Messaufgaben im vorliegenden Projekt benötigten Verdünnungstunnels vorgestellt werden. Für eine flexible Durchführung der Versuche in parallelen Messaufbauten wurden zwei baugleiche Verdünnungstunnel für den gleichzeitigen Betrieb zweier Feuerungen aufgebaut. Das Schema des Verdünnungstunnels zeigt Abbildung 1.

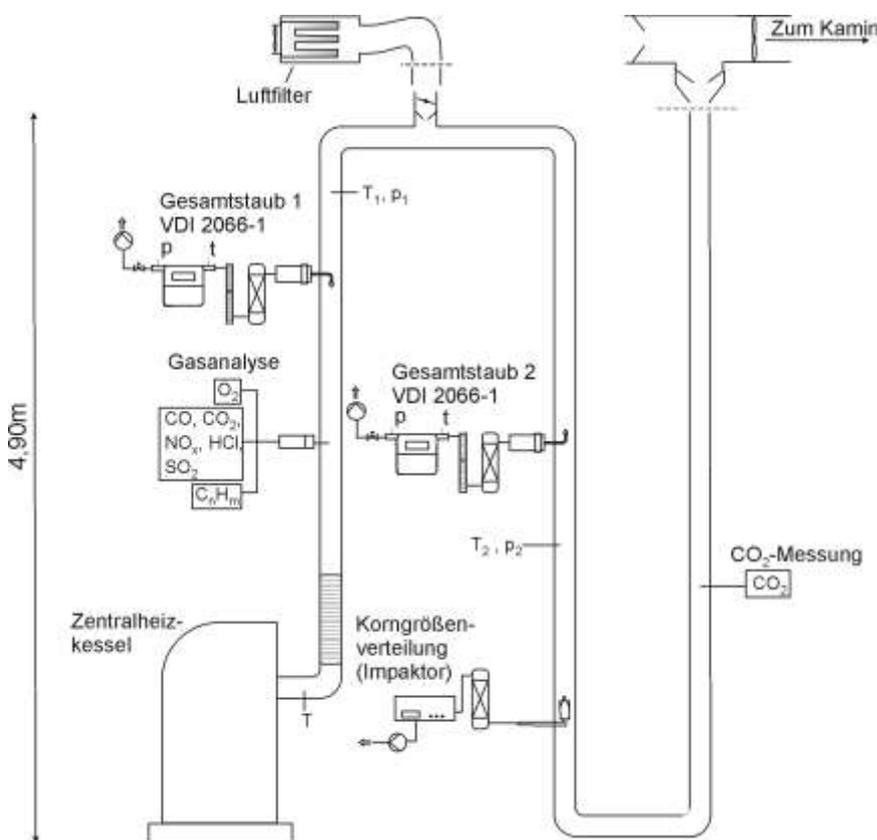


Abbildung 1: Aufbau des Verdünnungstunnels am TFZ

Die gasförmigen Bestandteile der Verbrennungsrückstände werden im vertikalen unverdünnten Abgasweg entnommen und den Gasanalysatoren zugeführt. Anschließend wird das Abgas um 90° in die Horizontale umgelenkt. In diesem horizontalen Teilabschnitt wird über ein T-Stück kalte Außenluft im Überschuss zugespeist. Die Außenluft wird zuvor mit Hilfe eines Feinfilters (Filterklasse F7, Abscheidegrad >99 % bis Partikelgröße 5 µm und 98 % bis Partikelgröße 3 µm) von eventuell vorhandenen Partikeln gereinigt und mittels eines Fördergebläses im Überschuss über den offenen Eingang des horizontalen

Abgasrohres geströmt (keine feste Verbindung). Das am Ende des Abgaswegs arbeitende Saugzuggebläse erzeugt im gesamten Abgasweg einen Unterdruck, durch den die kühle Verdünnungsluft am offenen T-Stück des Abgasrohres in den Abgasweg eingesaugt wird. Dabei wird je nach Versuchsbedingungen der bei der Verbrennung entstehende Abgasvolumenstrom zwei- bis fünffach verdünnt. Über die vor und nach der Verdünnungsluftzugabe parallel gemessene CO₂-Konzentration kann das Verdünnungsverhältnis kontinuierlich bestimmt werden.

Die Verdünnung des Abgases hat folgende mess- und versuchstechnische Vorteile:

- Das Abgas wird deutlich heruntergekühlt, so dass evtl. vorhandene kondensierbare gasförmige Bestandteile nun als Partikel vorliegen und mittels Gesamtstaubmessung und Kaskadenimpaktor erfasst werden können. Dazu wurden zum Teil sowohl in die Messstrecke des unverdünnten als auch des verdünnten Abgasstromes Gesamtstaubmessstellen eingebaut (vgl. Abbildung 1: Gesamtstaub 1 und Gesamtstaub 2).
- Die Abgasgeschwindigkeit wird erhöht, womit ein günstiger Bereich mit hoher Messgenauigkeit für die Geschwindigkeitsmessung mittels Drucksensoren und Prandtl-Staurohr erreicht wird. Vor allem bei den kleinen häuslichen Zentralheizungskesseln und den Einzelfeuerstätten lassen sich so Volumenströme und damit Gasgeschwindigkeiten erreichen, bei denen diese Messmethode für die Abgasgeschwindigkeit hinreichend genau ist.
- Es können Abgasrohre mit ausreichend großen Querschnitten verwendet werden, um einerseits das Einbringen des Impaktorkopfes problemlos zu ermöglichen und andererseits die Störung des Strömungsprofils durch den Impaktorkopf selbst zu minimieren.

Der Einsatz des Verdünnungstunnels wurde erforderlich, da bei den Vorversuchen mit der Holzpelletfeuerung insbesondere bei kleiner Wärmeleistung ein zu geringer Abgasvolumenstrom vorlag.

3.1.2 Wärmeleistungsmessstrecke

Die Kesselanlagen werden wasserseitig an einen speziellen Kühlkreislauf angeschlossen. Dieser ermöglicht die direkte Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme. Die hydraulische Messstrecke entspricht dabei den Anforderungen der DIN EN 303 Teil 5 [8] bzw. DIN EN 304 [9]. Die Bestimmung der Wärmeleistung erfolgt über die Differenztemperaturmessung zwischen Vor- und Rücklauf und über den Kesselwasserdurchfluss. Letzterer wird über die Messzeit konstant gehalten. Die Rücklauftemperatur wird über ein 3-Wege-Mischventil elektrisch geregelt. Sekundärseitig wird die Wärme über einen Wärmetauscher ins Kühlwasser abgeführt, das von einer Regenwasserzisterne gespeist wird.

3.1.3 Brennstoffverbrauch

Zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs wird der komplette Kessel oder der Vorratsbehälter für den Brennstoff auf einer Plattformwaage aufgestellt. Damit kann der Gewichtsverlust über die Versuchsdauer bestimmt werden. Die Aufzeichnung des Gewichtsverlaufs erfolgt kontinuierlich über den gesamten Messzeitraum. Bei den Einzelfeuerstätten wurde der Brennstoff zusätzlich vor dem Auflegen gewogen, um eine genauere Gewichtsbestimmung zu ermöglichen.

3.2 Mess- und Analyseverfahren

Im Rahmen des Messprogramms werden folgende Anlagenparameter und Emissionsmessgrößen erfasst:

Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:

- Kohlenstoffmonoxid (CO),
- flüchtige organische Stoffe (Ges.-C),
- Stickstoffoxide (NO_x),
- Korngrößenverteilung des Staubs und
- Gesamtstaub

Betriebsparameter der Feuerungsanlage:

- Sauerstoff (O₂),
- Kohlenstoffdioxid (CO₂),
- Abgasfeuchte (H₂O),
- Wärmeleistung und feuerungstechnischer Wirkungsgrad,
- Abgastemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen, Raum- bzw. Verbrennungslufttemperatur,
- Brennstoffverbrauch,
- Förderdruck sowie
- dynamischer Druck am Prandtl-Staurohr

Die Erfassung aller Messgrößen, mit Ausnahme des Gesamtstaubgehalts und der Korngrößenverteilung im Staub (diskontinuierliche Messung), erfolgt kontinuierlich.

3.2.1 Kontinuierlich erfasste Messgrößen

Die im Versuchsstand kontinuierlich gemessenen Parameter und die hierfür eingesetzten Messgeräte werden in Tabelle 2 zusammengestellt. Die angewandten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren und sind in den zugehörigen DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert. Alle Messdaten werden als Analog- bzw. Digitalsignale über das modulare I/O-System FieldPoint von National Instruments erfasst und von ei-

nem Personal Computer zur weiteren Verrechnung und Datenspeicherung aufgenommen. Als Messdatenerfassungssoftware wird ein am Technologie- und Förderzentrum entwickeltes Programm, programmiert in LabView 6.1, verwendet. Die Messwerte werden im Sekundentakt aufgezeichnet und als Mittelwert über jeweils 60 s gespeichert. Die Gasgeschwindigkeit wird für jedes Intervall aus den Minutenmittelwerten der Messgrößen dynamischer Druck, Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur berechnet.

Tabelle 2: *Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte*

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ -verfahren	aktiver Messbereich	¹⁾ Max. Messunsicherheit (k=2) beim Messbereichsendwert bzw. ²⁾ Fehlergrenze
Umgebungsbedingungen und Betriebsparameter				
Luftdruck	Toss Kombisensor Typ 20500	Piezoresistiver Effekt	900 - 1.100 hPa	+/- 1 hPa ²⁾
Lufttemperatur	Toss Kombisensor Typ 20500	temperaturabhängige Widerstandsänderung (Pt 1000)	-20 - 50 °C	+/- 0,2 K ²⁾
Luftfeuchte	Toss Kombisensor Typ 20500	Mehrschichtsensor	0 - 100 %	+/- 3 %-Punkte ²⁾
Abgastemperatur	Thermoelement (Typ K, Klasse 2) Fa. Philips-Thermocoax	Thermoelektrizität	0 - 1.000 °C	+/- 2,5 K ²⁾
statischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 5000	Membran mit induktivem Abgriff	-200 Pa - 200 Pa	2 Pa ²⁾
dynamischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 9000	Membran mit induktivem Abgriff	0 - 50 Pa	0,05 Pa ²⁾
Abgasbestandteile				
CO ₂	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 12,5 Vol.-% 12,5 – 20 Vol.-%	0,4 Vol.-% ¹⁾ 3,3 % vom MW ¹⁾
	BINOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0 – 20 Vol.-%	0,5 Vol.-% ¹⁾
H ₂ O	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 12,5 Vol.-% 12,5 – 20 Vol.-%	0,4 Vol.-% ¹⁾ 3,3 % vom MW ¹⁾
	Hygrophil 4220 B, Fa. Ultrakust	Psychrometrie	0 – 20 Vol.-%	0,8 Vol.-% ¹⁾
CO	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 100 ppm 100 – 5000 ppm	3 ppm ¹⁾ 3,3 % vom MW ¹⁾
	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0 – 100 ppm 100 – 500 ppm 500 – 2500 ppm 2500 – 5000 ppm	3 ppm ¹⁾ 15 ppm ¹⁾ 73 ppm ¹⁾ 147 ppm ¹⁾
NO _x ⁴⁾	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 200 ppm 200 – 2000 ppm	8 ppm ¹⁾ 3,3 % vom MW ¹⁾
	Modell 951 A, Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0 – 250 ppm 250 – 1000 ppm	6 ppm ¹⁾ 16 ppm ¹⁾
O ₂	PMA 100-L Fa. M&C Products	Paramagnetismus	0 – 21 Vol.-%	0,3 Vol.-% ¹⁾
	OXYNOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0 – 21 Vol.-%	0,5 Vol.-% ¹⁾

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/-verfahren	aktiver Messbereich	¹⁾ Max. Messunsicherheit (k=2) beim Messbereichsendwert bzw. ²⁾ Fehlergrenze
Ges.-C ³⁾ als Propan-Äquivalent	Thermo-FID Fa. Mess-&Analysetechnik GmbH	Flammenionisation	0 – 100 ppm 100 – 1000 ppm 1000 – 10000 ppm C ₃ H ₈ -Äquivalent	4 ppm ¹⁾ 39 ppm ¹⁾ 394 ppm ¹⁾
	FID 3-100, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0 – 100 ppm 100 – 1000 ppm 1000 – 10000 ppm C ₃ H ₈ -Äquivalent	4 ppm ¹⁾ 41 ppm ¹⁾ 408 ppm ¹⁾
Wärmeleistung und Wirkungsgrad				
Temperatur ⁵⁾	Widerstandsthermometer, paarweise kalibriert (PT 100, Klasse B); Fa. Thermokon	temperaturabhängige Widerstandsänderung	0 - 100 °C	+/- 0,8 K ²⁾ (Gleichlauf 0,1 K zw. Vor- und Rücklauf-temperatur)
Kühlwasserstrom	Promag 53 P Fa. Endress+Hauser	Magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem	15 – 3000 l/h	7 l/h ¹⁾
Brennstoffverbrauch	Plattformwaage Mettler Toledo KD 600	Elektromagnetische Kraftkompensation	0 – 600 kg	37 g ¹⁾
	Plattformwaage Pesa B5	2-Saiten-Messtechnik	0 – 1200 kg	63 g ¹⁾

³⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen

⁴⁾ NO_x = NO + NO₂

⁵⁾ Vor- und Rücklaufwassertemperatur, Kühlwassertemperatur, Raumtemperatur

3.2.2 Diskontinuierlich erfasste Messgrößen

3.2.2.1 Gesamtstaub

Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgt in Anlehnung an das in den VDI-Richtlinien 2066 Blatt 1 [10], Blatt 2 [11], Blatt 3 [12] und Blatt 7 [13] beschriebenen Messverfahren (Methode mit "Filterkopfgerät" und Methode mit „Planfilterkopfgerät“). Bei dieser Probenahme wird ein staubbeladener Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wird ein Glasfaserplanfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP (0,3 µm), Durchmesser 45 mm) im Filterkopfgerät eingesetzt, das außerhalb des Abgaskanals angeordnet ist. Das Absaugrohr und das Rückhaltesystem werden mit einer Heizmanschette beheizt, um eine Unterschreitung des Abgastaupunktes im Filtersystem zu vermeiden. Nach dem Filterkopfgerät gelangt das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstroms sowie des Gaszustandes (Druck und Temperatur) und einer Saugpumpe. Mit Hilfe eines Schwebekörper-Durchflussmessgerätes wird der für die isokinetische Probenahme erforderliche Volumenstrom am Bypass der Pumpe eingestellt.

Die Dauer der Gesamtstaubprobenahme ist angepasst an die jeweilige Versuchsvariante und Staubemission. Außerplanmäßig abgebrochen wird die Staubmessung wenn die

Filterbeladung so groß wird, dass die Leistungsgrenze der Absaugpumpe erreicht wird. Die Staubmasse wird nach Konditionierung der Filter gravimetrisch bestimmt. Dazu werden die Filter unbeladen und beladen mit einer Präzisionswaage gewogen.

3.2.2.2 Korngrößenverteilung (Impaktor)

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung von Staubemissionen und damit zur Bestimmung der Feinstaubanteile werden im allgemeinen Kaskadenimpaktoren eingesetzt. Diese Geräte werden seit ca. 30 Jahren an einer Vielzahl von Forschungseinrichtungen verwendet, so dass vergleichbare Messergebnisse in einer ausreichenden Anzahl veröffentlicht sind. Die Verwendung von Kaskadenimpaktoren entspricht dem aktuellen Stand der Technik und wird aufgrund ihrer weiten Verbreitung auch in den nächsten Jahren das vorherrschende Messverfahren darstellen.

Auch für die hier durchzuführenden Messungen wurde deshalb ein spezieller Kaskadenimpaktor beschafft. Nachfolgend werden dessen Funktionsprinzip erläutert und die speziellen Gründe, die für die Auswahl dieses Gerätes sprechen, dargestellt.

Funktionsweise des Kaskadenimpaktors. Die Analyse der Partikelgrößen und deren Verteilung wird in der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 5 „Staubmessung in strömenden Gasen – Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren – Kaskadenimpaktor“ [14] erläutert. Zur partikelgrößenabhängigen Auftrennung der Staubemissionen wird bei diesem Verfahren die unterschiedliche Trägheit von Partikeln unterschiedlicher Größe und Masse genutzt. Dazu wird ein repräsentativer Teilgasvolumenstrom durch eine Kaskade von Düsen- und Impaktionsplatten (Prallplatten) des Impaktors geleitet. In den Öffnungen der Düsenplatte (Bohrungen oder Ringspalte) wird der partikelbeladene Abgasstrom jeweils beschleunigt und strömt in Richtung der Prallplatte. Partikel, die auf Grund ihrer Trägheit dem Gasstrom nicht folgen können, werden auf die Prallplatte geschleudert und bleiben dort haften (Abbildung 2). In den von Stufe zu Stufe kleiner werdenden Düsenöffnungen erhöht sich die Gasgeschwindigkeit, wodurch der beprobte Staub in mehrere Fraktionen aufgeteilt wird. Als unmittelbares Ergebnis einer Impaktormessung erhält man durch Wägung die auf den einzelnen Sammelplatten impaktierten Partikelmassen.

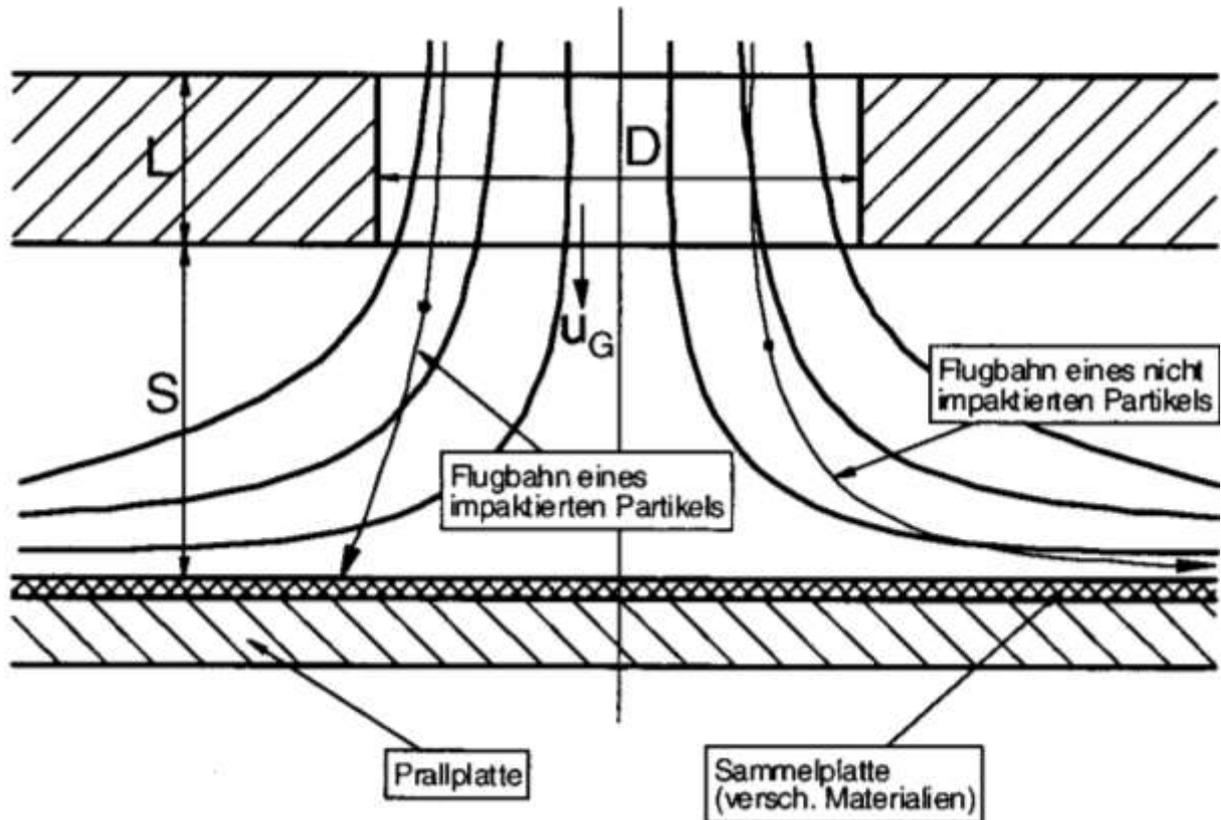


Abbildung 2: Prinzip der Impaktion

Die Impaktion der Partikel wird im Wesentlichen von deren Größe und der Gasgeschwindigkeit im Impaktor bestimmt. Aus diesem Zusammenhang ergeben sich zwei grundsätzliche Bauarten bzw. Betriebsweisen für einen Impaktor:

A. Betrieb mit konstanter Gasgeschwindigkeit im Impaktor.

Die Gasgeschwindigkeit im Impaktor wird bei allen Messungen konstant gehalten, so dass sich für die einzelnen Stufen des Impaktors immer konstante Trenngrenzen ergeben. Dadurch sind die Ergebnisse der verschiedenen Messungen gut vergleichbar. Dabei wird die für eine fehlerfreie Messung erforderliche isokinetische (geschwindigkeitsgleiche) Absaugung des Teilstromes durch die Anpassung des Düsendurchmessers erreicht, wobei eine geringfügige Abweichung der Geschwindigkeit toleriert wird.

B. Betrieb mit variabler Gasgeschwindigkeit im Impaktor.

Abhängig vom Volumenstrom des Rauchgases und dem gewählten Düsendurchmesser wird der für eine isokinetische Absaugung erforderliche Volumenstrom ermittelt. Dieser wird während einer Messung konstant gehalten. Da aber jede Messung mit einem anderen Volumenstrom und damit mit anderen Gasgeschwindigkeiten durchgeführt wird, ergeben sich folglich bei jeder Messung unterschiedliche Trenngrenzen. Diese müssen dann jeweils nach Versuchsende be-

rechnet werden. Erst durch eine Interpolation der Massenanteile zwischen zwei realen Trenngrenzen kann somit auf die Fraktion von definierten (z. B. vom Gesetzgeber festgelegten) Korngrößenklassen (z. B. $PM_{2,5}$) geschlossen werden, wobei stets lineare Zusammenhänge unterstellt werden.

Besondere Anforderungen für die vorliegende Messaufgabe. Da im hier beschriebenen Vorhaben nicht nur die Verteilung der Korngrößen bestimmt werden sollte, sondern gleichzeitig auch Staubproben für 4 festgelegte Korngrößenklassen zur weiteren Analyse gewonnen werden sollten, lagen hier besondere Anforderungen an die einzusetzende Impaktortechnik vor. Sie lassen sich wie folgt beschreiben:

- Erfassung der Korngrößenfraktionen PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_1 : Diese Klassifizierung entspricht den aktuellen Grenzwerten des Immissionsschutzrechts und ist allgemein gebräuchlich.
- Betrieb mit konstanten Trenngrenzen: Da die im Impaktor gesammelten Staubfraktionen im Labor hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe untersucht werden sollen, muss zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit sichergestellt sein, dass die einzelnen Impaktorstufen immer der gleichen Korngrößenfraktion zuzuordnen sind. Impaktoren der bei Emissionsmessungen gebräuchlicheren Bauart "B" (siehe oben) kommen daher trotz ihrer größeren Verbreitung hier nicht in Frage.
- Es wird eine Ausführung mit einer möglichst geringen Anzahl von Trennstufen (jedoch mindestens 4) benötigt. Dies ist die Voraussetzung, um eine ausreichende Mindeststaubmasse für die Laboruntersuchungen zu erhalten. Außerdem lässt sich dadurch der Aufwand zur Vorbereitung und Wägung der Prallplatten minimieren.
- Es ist eine Messung im Rauchgaskanal („In-stack-Methode“) zu bevorzugen. Dadurch lassen sich Verfälschungen der Messergebnisse durch Staubablagerungen in den Absaugrohren tendenziell eher vermeiden als bei „Out-stack“-Systemen mit Impaktion außerhalb des Rauchgasweges.

Marktrecherche. Zur Beschaffung einer Impaktortechnik, die den vorstehenden Anforderungen gerecht wird, wurde eine Marktrecherche durchgeführt, wobei auf technische Informationen aus Normen, Veröffentlichungen und aus dem Internet sowie Hinweise anderer Forschungseinrichtungen mit entsprechenden Messaufgaben (IVD, Ingenieurbüro BIOS, ZAE) zurückgegriffen wurde. In der Recherche wurden insgesamt 4 Hersteller bzw. Anbieter ermittelt, die als Kaskadenimpaktoren-Hersteller für Emissionsmessungen an Feuerungsanlagen zum Einsatz kommen. Diese Anbieter sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Anbieter von Kaskadenimpaktoren für Abgasmessungen an Feuerungen

Anbieter	Typ	Bauart	Stufen	Einbaulage
Hauke / Berner	LPI 25	konstante Trennstufen	11	out-stack
Andersen	Mark III	variable Trennstufen	8	out-stack
Gothe	Johnas	konstante Trennstufen	3	in-stack
Burger / Kálmán	KS 220	konstante Trennstufen	4	in-stack

Entscheidung. Lediglich mit dem Impaktor KS 220 der Firma Kálmán Systems Ltd. werden die oben genannten Anforderungen erfüllt. Dieser Impaktor wurde daher für die durchzuführenden Messungen beschafft. Der wesentliche Nachteil des einzigen Alternativgerätes, des Impaktors der Fa. Gothe, besteht darin, dass die Staubfraktion PM 1 nicht erfasst werden kann. Nach bisherigem Kenntnisstand fällt bei Biomassefeuerungen aber der größte Teil des erwarteten Staubausstößes in der Korngrößenklasse bis 1 Mikrometer an. Eine noch feinere Korngrößentrennung bei gleichzeitig gleichbleibenden Trenngrenzen wäre daher wünschenswert gewesen, jedoch wird diese von keinem der in Frage kommenden Hersteller bislang angeboten.

Neben der Erfüllung der hier gestellten Anforderungen bietet der ausgewählte Impaktor der Fa. Kálmán Systems Ltd. noch weitere Vorteile, durch die er sich von den übrigen Kaskadenimpaktoren unterscheidet.

- Durch die Integration von weiteren Regelsignalen für Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂) wird bei dem Kálmán Impaktor eine dynamische Anpassung der geregelten Probengasmenge durchgeführt, so dass die bei schwankender Abgaszusammensetzung (z. B. bei inhomogenem Wassergehalt der Brennstoffe) eintretende Viskositätsänderung des Abgases automatisch durch eine entsprechend angepasste Probengasabsaugung kompensiert wird. Mögliche Messfehler, die unter den gerade bei Scheitholzfeuerungen üblichen variierenden Verbrennungsbedingungen eintreten, werden so minimiert.
- Bei der Wiegung werden mit den Filterelementen auch die Prallplattenhalter und Distanzringe ausgewogen. Damit werden auch solche Staubanteile erfasst, die nicht auf der Prallplatte sondern an den Metallteilen haften. Somit lässt sich eine vermutlich wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Gesamtstaubgehalt und der Summe der Einzelfractionen erreichen.

Abbildung 3 zeigt eine Ansicht des ausgewählten Kaskadenimpaktors. Im zusammengebauten Zustand (oben links) wird das Gerät in den Abgasweg eingeführt. Rechts und links auf der Höhe der Absaugöffnung befinden sich die beiden Pitot-Rohre für die Druck- und Geschwindigkeitsmessung. An einem dritten Messpunkt (vor dem Krümmer) wird die Abgastemperatur erfasst. Ein Schema des Messaufbaus zeigt Abbildung 4.

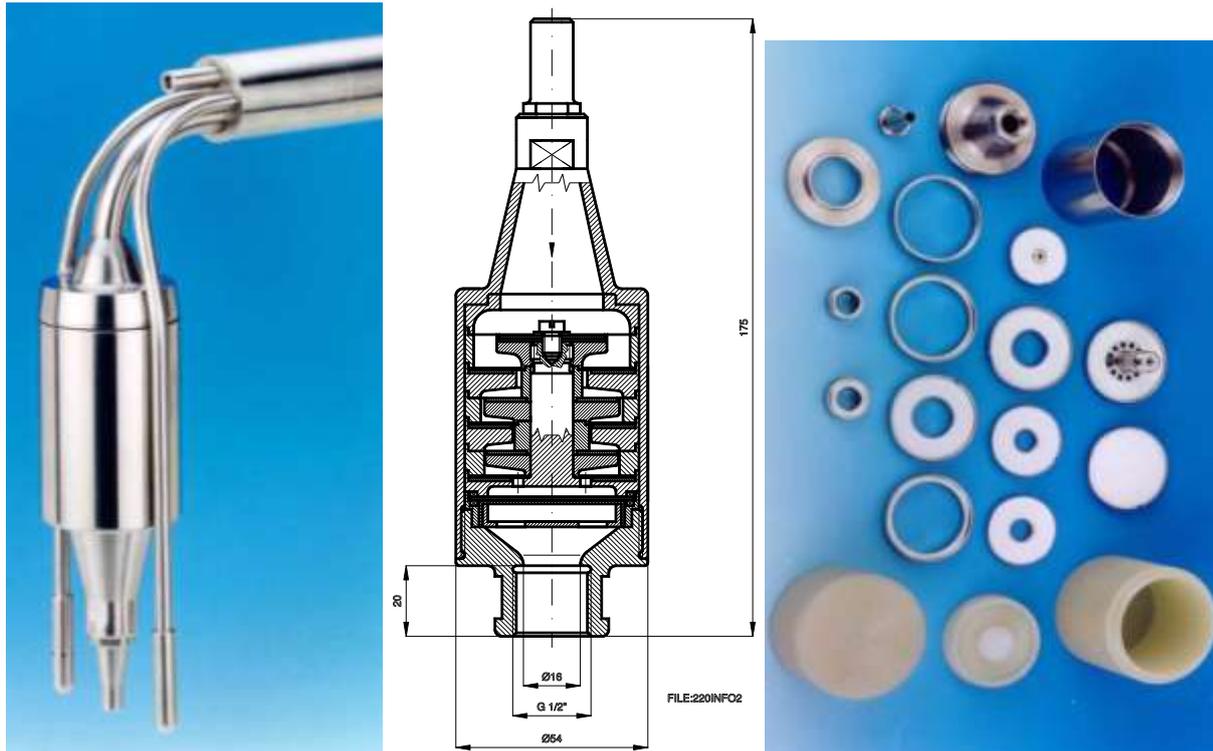


Abbildung 3: Kaskadenimpaktor Kálmán KS 220 im messbereiten Zustand (links), im Querschnitt (mitte) und im zerlegten Zustand mit Prallplattenhaltern und Impaktorkammern (rechts) (Bilder: Kálmán)

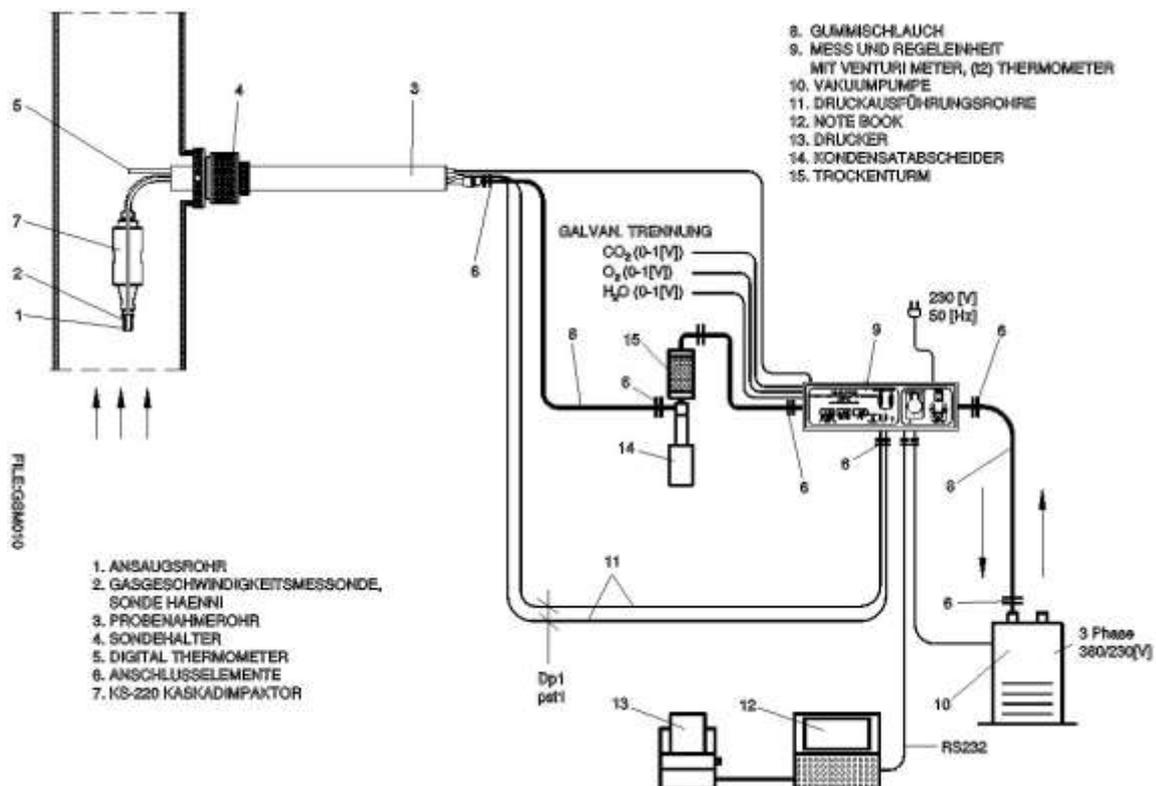


Abbildung 4: Schema des Messaufbaus mit Impaktor KS 220 mit Steuergerät und Integration weiterer Messsignale für CO₂, O₂ und H₂O zur automatischen Kompensation eintretender Viskositätsänderung des Abgases (Bild: Kálmán)

3.3 Vor- und Nachbehandlung der Abscheidemedien

Um eine mögliche Fehlerquelle bei der Bestimmung der Gesamtstaubemission und der Korngrößenverteilung auszuschließen, wurde ein einheitliches Verfahren zur Vor- und Nachbehandlung der Abscheidemedien festgelegt. Bei den Abscheidemedien handelt es sich um Quarz- oder Glasfaserringe bzw. -platten, auf deren Oberfläche die Partikel impaktiert werden. Ausgehend von eigens durchgeführten Vorversuchen wurde das in Abbildung 5 dargestellte Vorgehen festgelegt.

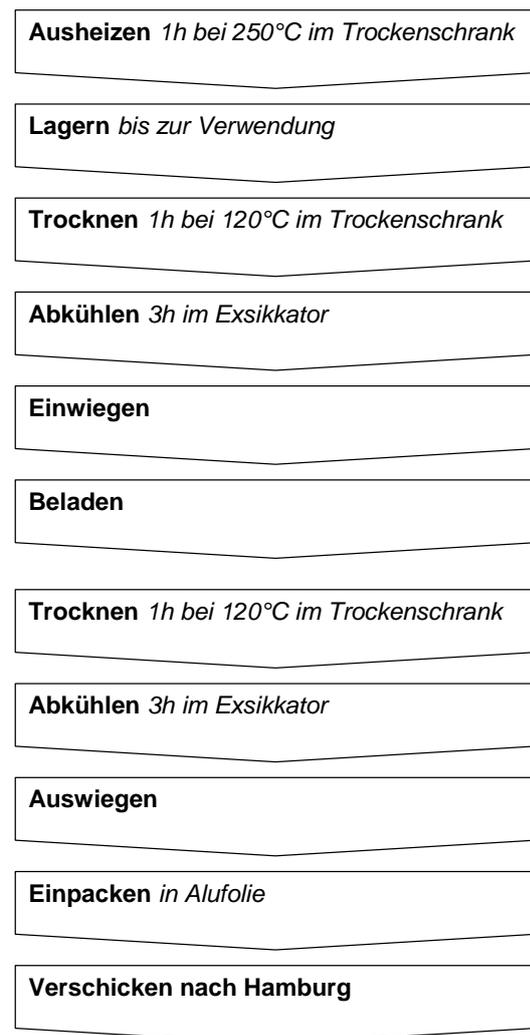


Abbildung 5: Fließbild zur Vor- und Nachbehandlung der Prallplatten und des Endfilters für die Impaktion sowie der Filtermedien für die Gesamtstaubmessung (Trocknung erfolgt ohne Umluft)

3.4 Beschreibung der Versuchsanlagen

Die für die Versuche verwendeten heiztechnischen Geräte lassen sich untergliedern in die eigentlichen Feuerungsanlagen sowie in nachgeschaltete Einrichtungen für die Abgasbehandlung (Entstaubung) bzw. Abgaskondensation. Sie werden nachfolgend vorgestellt.

3.4.1 Feuerungen

Die Auswahl der für die Versuche zu verwendenden Feuerungsanlagen wurde bereits in Kapitel 2 ausführlich beschrieben. Nachfolgend sollen die verwendeten Feuerungen vorgestellt werden. Im Berichtszeitraum wurden 6 Feuerungen verwendet.

Pelletkessel. Als Pelletkessel wurde eine Unterschubfeuerung der Firma KWB (St. Margarethen, Österreich), Typ Easyfire USP 25 verwendet (Abbildung 6). Die Nennwärmeleistung beträgt 25 kW und die minimale Kesselleistung im kontinuierlichen Betrieb liegt bei 8 kW. Der Kessel ist mit einer Lambdaregelung, einer automatischen Zündung und Abgasturbulatoren zur automatischen Reinigung der Wärmetauscherflächen ausgestattet. In der Unterschubretortenfeuerung wird der Brennstoff im Primärverbrennungsbe-
reich über eine Schneckenförderung von unten auf den Brennteller geschoben und eine geringe Strömungsgeschwindigkeit der Primärluft sorgt für ein ruhiges Brennstoffbett. Der Ausbrand der freigesetzten Gase erfolgt im aufgesetzten Nachverbrennungsring. Die Merkmale und technischen Daten der Feuerung sind in Tabelle 4 zusammengestellt.



Abbildung 6: Pelletkessel Easyfire USP 25 (Bild: KWB)

Tabelle 4: Anlagentechnische Merkmale KWB Easyfire USP 25

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Pelletfeuerung
Bauart	Feuerung in Kessel integriert
Nennwärmeleistung	25 kW mit Holzpellets
kleinste Wärmeleistung	8 kW mit Holzpellets
Feuerungsprinzip	Unterschub mit Flammrohrbrenner und Teilstromrezirkulation
Brennstoffzufuhr	automatisch über Schnecken und/oder Pneumatik
Zündung	automatisch mit Zündgebläse
Entaschung	manuell
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Rohrwärmetauscher stehend
Reinigung	automatisch
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	durch den Rost (Brennteller)
Sekundärluftzufuhr	Nachverbrennungsring im Flammrohr
Gebläse	Druckgebläse
Luftmengenregelung	Drehzahlregelung der Gebläse
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwasser- und Abgastemperatur
Stellgrößen	Brennstoff- und Verbrennungsluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Abgastemperatur
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge
<i>Betriebsdaten</i>	
Betriebsdruck	3,5 bar
Betriebstemperatur	90 °C
Wasserinhalt	104 l
Rauchrohrdurchmesser	150 mm
el. Leistungsaufnahme	max. 1983 W (einschließlich Fördersystem)

Hackschnitzelkessel. Die Messungen wurden an einem Hackschnitzelkessel vom Typ "Compact 50" der Firma HDG (Massing, Deutschland) durchgeführt (Abbildung 7). Dieser Kessel eignet sich zur Verbrennung von Hackschnitzeln, Spänen und Pellets mit einem Wassergehalt bis zu 30 %. Er verfügt über einen luftgekühlten Kipprost, eine Verbrennungs- und Leistungsregelung über Lambda-Sonde und Heißgasfühler, eine automatische Abreinigung der Wärmetauscherflächen und eine automatische Entaschung sowie eine automatische Zündung durch ein Heißluftgebläse. Die Brennstoffzufuhr erfolgt über eine Zellenradschleuse mit Stokerschnecke direkt auf den Verbrennungsrost. Primär- und Sekundärluft werden unabhängig voneinander geregelt. Durch die Zündung mittels Heißluftgebläse wird auf einen Gluterhaltungsbetrieb mit ungünstigen Verbrennungsbedingungen und die damit verbundene Geruchsbelästigung verzichtet. Automa-

tisch bewegte Abgasturbulatoren sorgen für eine Reinigung der Wärmetauscherflächen, der Kipprost befördert die Verbrennungsrückstände in den darunter liegenden Aschekasten und die anfallende Asche wird mittels Entaschungsschnecken in die außen liegenden Aschebehälter ausgetragen. Die Anlage weist eine Leistungsspanne von 12 bis 50 kW auf. Die Merkmale und technischen Daten der Feuerung sind in Tabelle 5 zusammengestellt.



Abbildung 7: Hackschnitzelkessel Compact 50 (HDG) (Bild: HDG)

Tabelle 5: Anlagentechnische Merkmale HDG Compact 50

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Hackschnitzel-, Späne- und Pelletfeuerung
Bauart	Feuerung in Kessel integriert
Nennwärmeleistung	50 kW
kleinste Wärmeleistung	12 kW
Feuerungsprinzip	Quereinschub mit Kipprost
Brennstoffzufuhr	automatisch über Schnecken
Zündung	automatisch mit Zündgebläse
Entaschung	automatischer Austrag mit Schnecken
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Flächenwärmetauscher stehend
Reinigung	automatisch
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	durch den Kipprost
Sekundärluftzufuhr	Nachverbrennungsdüse über der Flamme
Gebälse	Druckgebläse
Luftmengenregelung	Drehzahlregelung der Gebläse
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwasser-, Brennraum- und Abgastemperatur
Stellgrößen	Brennstoff- und Verbrennungsluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Abgastemperatur, Lambda
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge
<i>Betriebsdaten</i>	
Betriebsdruck	3,0 bar
Betriebstemperatur	95 °C
Wasserinhalt	167 l
Rauchrohrdurchmesser	180 mm
el. Leistungsaufnahme	max. 1200 W

Scheitholzessel. Als Scheitholzessel kam ein Sturzbrandkessel der Firma Fröling (Grießkirchen, Österreich), Typ "FHG Turbo 3000 (Lambda)" mit 30 kW Nennwärmeleistung zum Einsatz. Der Kessel ist – wie viele Scheitholzessel – mit Abgasturbulatoren ausgestattet, die der Wirkungsgradsteigerung dienen und die über eine manuell bedienbare Mechanik auch zur Abreinigung der Wärmetauscherflächen verwendet werden können. Es wurde eine Ausführung mit Lambdaeegelung verwendet, die damit auch den Anforderungen des Marktanreizprogramms entspricht. Der Scheitholzessel verfügt über einen großen Füllraum für Halbmeterscheite und Grobhackgut, wodurch eine lange Brenndauer ermöglicht wird. Die Brennkammer und die Wärmetauscher sind baulich voneinander getrennt und die patentierte Hochtemperaturwirbelbrennkammer und das elektronisch geregelte Saugzuggebläse sorgen für eine automatische Anpassung an

unterschiedliche Brennstoffe, während mit Hilfe der Lambdasonde und der einstellbaren Abgastemperatur der Verbrennungsvorgang optimiert werden kann. Das Leistungsspektrum liegt mit 9 bis 30 kW in einem typischen Bereich für einen Einsatz in ländlichen Einfamilienhäusern. Die Merkmale und technischen Daten der Feuerung sind in Tabelle 6 zusammengestellt.



Abbildung 8: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000-30 (Fröling) (Bild: Fröling)

Tabelle 6: Technische Merkmale Scheitholzkessel Fröling FHG Turbo 3000-30

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Scheitholzfeuerung
Bauart	Feuerung in Kessel integriert
Nennwärmeleistung	30 kW
kleinste Wärmeleistung	9 kW
Feuerungsprinzip	Sturzbrand
Brennstoffzufuhr	manuell, großer Füllraum
Zündung	manuell
Entaschung	manuell
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Flächenwärmetauscher stehend
Reinigung	manuell
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	seitlich in das Glutbett
Sekundärluftzufuhr	Nachverbrennungsdüse unter dem Glutbett
Gebläse	Saugzuggebläse
Luftmengenregelung	Drehzahlregelung des Gebläses
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwasser- und Abgastemperatur
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Abgastemperatur, Lambda
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge
<i>Betriebsdaten</i>	
Betriebsdruck	3,0 bar
Betriebstemperatur	100 °C
Wasserinhalt	120 l
Rauchrohrdurchmesser	150 mm
el. Leistungsaufnahme	max. 160 W

Heizölkessel. Der ausgewählte Heizölkessel war eine Feuerung der Marke Buderus (Bosch Thermotechnik GmbH - Buderus Deutschland Wetzlar, Deutschland) Typ „Logano G125-21 BE ECO“ (Abbildung 9). Der Feuerraum des Niedertemperatur-Heizkessels besteht aus einem Spezial-Grauguss (GL 180 M). In den wassergekühlten Brennraum mit darüber angeordneter Nachschaltheizfläche ist ein Buderus Ölgebläse-Blaubrenner (Logatop) mit Keramik-Brennrohr integriert. Die Nennwärmeleistung liegt bei 21 kW. Eine geringere Wärmeleistung wird durch Taktung der Anlage (Ein–Aus–Betrieb) erreicht.



Abbildung 9: Heizölfeuerung Logano G125-21 BE ECO (Buderus) (Bild: Buderus)

Tabelle 7: Technische Merkmale Heizölfeuerung Buderus Logano G125-21 BE ECO

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Niedertemperatur-Gusskessel mit Ölgebläse-Blaubrenner
Bauart	Feuerung in Kessel integriert
Nennwärmeleistung	21 kW
kleinste Wärmeleistung	Ein-Aus Betrieb (Taktung)
Feuerungsprinzip	Ölgebläse-Blaubrenner
Brennstoffzufuhr	automatisch
Zündung	automatisch
Entaschung	--
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Graugusswärmetauscher liegend
Reinigung	--
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	durch den Brenner
Sekundärluftzufuhr	durch den Brenner
Gebläse	Druckgebläse
Luftmengenregelung	fest voreingestellt
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur
Stellgrößen	Taktbetrieb
<i>Betriebsdaten</i>	
Betriebsdruck	4,0 bar
Betriebstemperatur	100 °C
Wasserinhalt	33 l
Rauchrohrdurchmesser	130 mm
el. Leistungsaufnahme	< 500 W

Kachelofenheizeinsatz. Die Messungen wurden an einem Heizkamin der HKD-Serie (HKD 5.1 mit Steuerung EOS_{R4}) der Ulrich Brunner GmbH (Eggenfelden, Deutschland), der nach EN 13229 [16] geprüft ist, durchgeführt. Dieses Heizgerät vereint durch seine Bauart die Vorzüge eines Kamineinsatzes (Feuerungsoptik mit Sichtscheibe) mit denen eines Kachelofens (Heizkraft). Sämtliche bedeutenden Teile des Ofens sind aus Grauguss gefertigt. Die Frontscheibe besteht aus spezieller Glaskeramik, die hohen Temperaturschwankungen standhält. Der isolierte Brennraum führt zu hohen Heizgastemperaturen und damit bei richtiger Bedienung zu einem sauberen Ausbrand. Die Verbrennung wurde feuerungs- und emissionstechnisch optimiert. Als Brennstoff sind nur trockenes, naturbelassenes Scheitholz mit einem Wassergehalt unter 20 % oder Holzbriketts nach DIN 51731 [17], Größenklasse HP2 zugelassen. Die an den Raum abgegebene Wärmemenge wird über die aufgelegte Brennstoffmenge bzw. über den zeitlichen Abstand zwischen den Brennstoffaufgaben gesteuert. Zudem war der Heizeinsatz in den Versuchen ausgestattet mit der Gussnachheizfläche GNF11 mit festen Anschlussstutzen (225 und 200 mm), um eine höhere Wärmeabgabe zu erzielen. Die Verbrennungsluftzuführung erfolgte mit Hilfe der elektronischen Ofensteuerung EOS_{R4}, einer Verbrennungsluftautomation, die die Verbrennungsqualität und den Abbrand optimiert und Emissionen so weit als möglich reduziert. Dabei wird die erforderliche Verbrennungsluftmenge über einen Luftklappenstellmotor in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur und damit abhängig vom Fortschritt des Abbrandvorganges optimiert. Dadurch soll der Bedienkomfort, die Anlagensicherheit und der Anlagenwirkungsgrad bei optimaler Gluthaltung und niedrigen Emissionswerten erhöht werden. Die Bedieneinheit der EOS_{R4} informiert über den aktuellen Anlagenzustand (Temperaturanzeigen, Bedienhinweise, Fehlermeldungen) und ermöglicht das Ändern von Einstellungen.

Zum Anheizen werden 3,0 bis 6,0 kg mehrfach gespaltene Holzscheite locker in den Brennraum gelegt und angezündet. Nach Schließen der Tür übernimmt die Regelung EOS_{R4} die Steuerung der Verbrennungsluft. Der Heizvorgang wird gestartet. In der Anheizphase ist die Luftklappe voll geöffnet, damit das Feuer schnell entflammt. Das schnelle Hochheizen stellt eine der wichtigsten Vorgaben dar, um eine saubere, emissionsarme Verbrennung zu erzielen. Die Luftklappe bleibt solange voll geöffnet bis in der Brennkammer eine Temperatur von ca. 550 °C erreicht wird. Ab dem Überschreiten dieser Temperaturschwelle wird der Verbrennungsluftquerschnitt reduziert. In der Variante EOS werden im weiteren Verlauf des Abbrandes die einzelnen Verbrennungsluftstufen (Stufe 3, Stufe 4) bis zum Abbrandende, dem Beginn der Glutphase, angezeigt. Ist der erste Abbrand vollständig beendet, kann bei weiter gegebenem Wärmebedarf ein erneuter Abbrand gestartet werden. Die Glutphase kann dabei bis zu drei Stunden andauern und nur nach vollständigem Ausbrand der vorherigen Füllung kann erneuert Holz nachgelegt werden. Es muss wieder eine vollständige Auflage erfolgen. Solange im Info-Feld die Meldung »Glut« angezeigt ist, kann in der Regel ohne ein erneutes Anzünden nachgeheizt werden. Die Merkmale und technischen Daten der Feuerung sind in Tabelle 8 zusammengestellt.



Abbildung 10: Kachelofen-Einsatz HKD 5.1 der Ulrich Brunner GmbH, mit Gussnacheizfläche und elektronischer Verbrennungsluftregelung

Tabelle 8: Anlagentechnische Merkmale Kachelofen-Einsatz Brunner HKD 5.1

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Kachelofen-Einsatz mit Brennmulde
Bauart	--
Nennwärmeleistung	10 kW
kleinste Wärmeleistung	--
Feuerungsprinzip	oberer Abbrand
Brennstoffzufuhr	manuell
Zündung	manuell
Entaschung	manuell
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	seitlich vor der Scheibe in das Glutbett
Sekundärluftzufuhr	über der Scheibe in die Nachbrennkammer
Gebläse	--
Luftmengenregelung	Luftklappe (elektronisch)
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	--
Stellgrößen	aufgelegte Brennstoffmasse
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Abgastemperatur
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge über Luftklappe (elektronisch)
<i>Betriebsdaten</i>	
Rauchrohrdurchmesser	180 mm
max. Brennstoffauflage	6,0 kg
el. Leistungsaufnahme	< 25 W

Kaminofen. Als weitere Einzelfeuerstätte wurde ein Kaminofen der Firma Wodtke (Tübingen, Deutschland) Typ „KK 50 F Moon“ beschafft. Diese Feuerung ist ein Kaminofen nach DIN 18891, Bauart 1 [15] und erfüllt die Anforderungen des DIN_{plus}-Gütesiegels. Die Nennwärmeleistung wird mit 7 kW angegeben und die Gesamtspeichermasse beträgt je nach Ausstattung 125,6 bis 157,1 kg. Für den Ofen sind als Brennstoffe Holz, Holzbriketts und Braunkohlebriketts zugelassen, wobei der Verbrennungsprozess über einen Brennstoffwähler und einen Sekundärluftschieber für den jeweiligen Brennstoff optimiert werden kann. Zudem verfügt der Kaminofen über einen Anschluss für eine separate Verbrennungsluftleitung, einen mit Vermiculite, Stahl und Guss ausgekleideten Feuerraum und einen Feuerrost aus Guss. Die selbstschließende Feuerraumtür ist aus Stahlblech gefertigt. Die Merkmale und technischen Daten der Feuerung sind in Tabelle 9 zusammengestellt.



Abbildung 11: Kaminofen KK 50 F („Moon“) der Firma Wodtke

Tabelle 9: Anlagentechnische Merkmale Wodtke Kaminofen KK 50 F („Moon“)

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Kaminofen mit Rost
Bauart	--
Nennwärmeleistung	7 kW
kleinste Wärmeleistung	--
Feuerungsprinzip	oberer Abbrand
Brennstoffzufuhr	manuell
Zündung	manuell
Entaschung	manuell
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	von unten in das Glutbett
Sekundärluftzufuhr	über dem Glutbett in die Flamme
Gebläse	--
Luftmengenregelung	Schieber (manuell)
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	--
Stellgrößen	Aufgelegte Brennstoffmasse
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	--
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge über Schieber (manuell)
<i>Betriebsdaten</i>	
Rauchrohrdurchmesser	150 mm
max. Brennstoffauflage	2,5 kg

3.4.2 Anlagen zur Abgasnachbehandlung und -kondensation

Abgaskondensation. Die Beurteilung der Brennwerttechnik zur Steigerung des Wärmertrages und zur Abscheidung von Partikeln aus dem Abgas erfolgte anhand eines Zusatzwärmetauschers der Firma SGL Carbon AG (Meitingen, Deutschland). Hierbei handelt es sich um ein Bauteil, welches als Zusatzwärmetauscher sowohl in einen Heizkessel integriert, als auch nachgeschaltet an eine bestehende Anlage (auch nachträglich) angebaut werden kann. Der Kondensationswärmetauscher kann entweder mit dem kalten Rücklaufwasser des Heizkreislaufs verbunden werden, um eine Vorwärmung des dem Kesselwärmetauscher zufließenden Kreislaufwassers zu bewirken, oder auch einen eigenen Niedertemperaturheizkreislauf bedienen. Bei dem verwendeten Wärmetauscher (Abbildung 12) handelt es sich um einen speziell für die Versuche bereitgestellten Aufbau mit Rauchgaseintrittstutzen aus Edelstahl und einem Rauchgasaustrittstutzen aus Kunststoff. Der Wärmetauscher besteht aus einem Graphitkeramikblock, in welchen vertikal rautenförmige Kanäle zur Abgasführung eingefräst wurden und in den auch die quer dazu verlaufenden wasserführenden Leitungswege in Form von Bohrungen direkt in den Graphitblock eingearbeitet sind. Der Vorteil des Graphitmaterials liegt in der gegenüber Stahl um ein Vielfaches höheren Wärmeleitfähigkeit. Dadurch ist auf geringem Raum ein

höherer Wärmeübergang an das Heizwasser möglich, so dass eine kompakte Bauweise möglich wird. Hinzu kommt, dass das Graphitmaterial chemisch beständig und daher gegenüber den bei der Kondensation anfallenden Säuren unempfindlich ist.

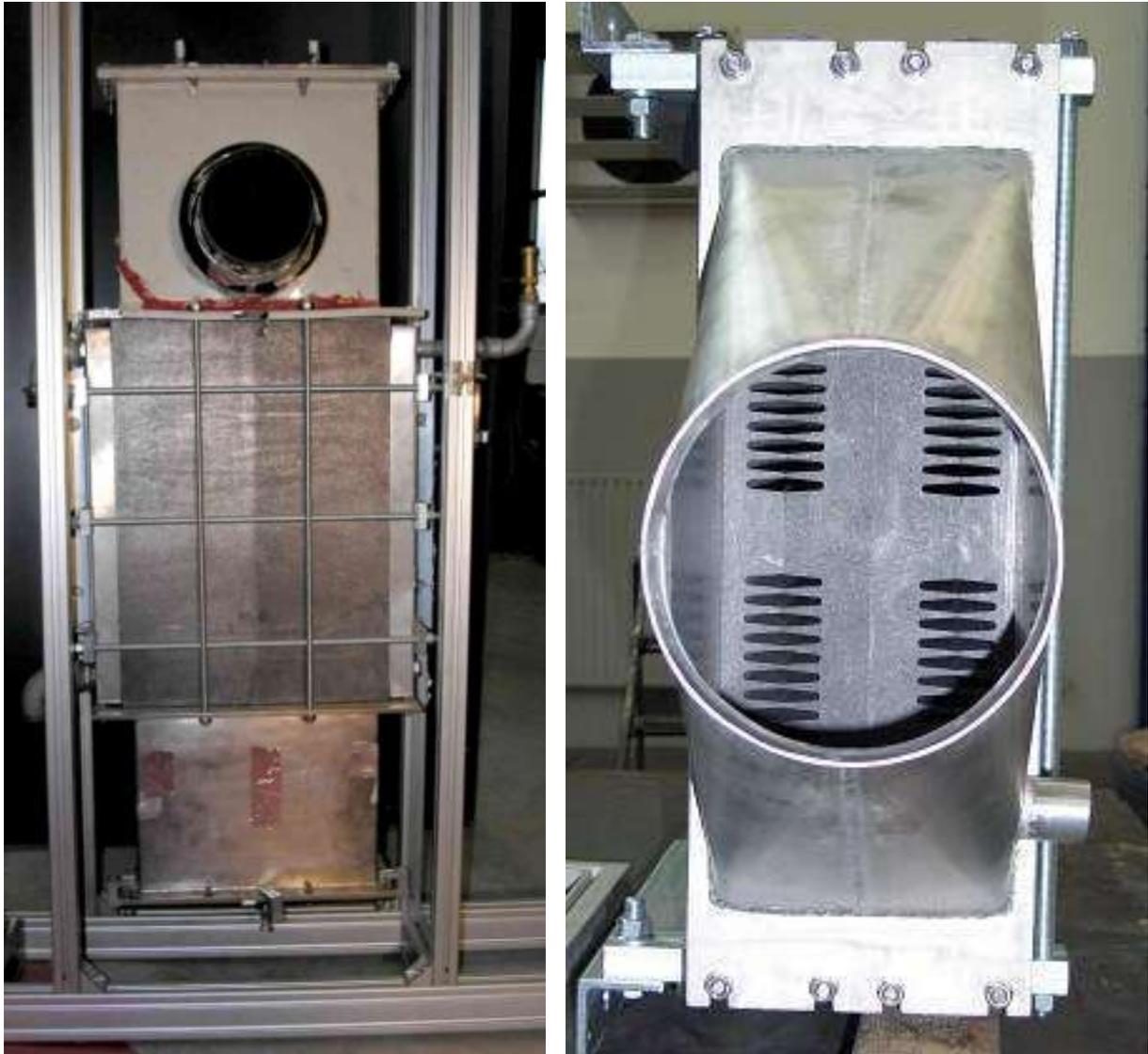


Abbildung 12: Sekundärer Abgaswärmetauscher zur Rauchgaskondensation von Kleinanlagen ("Ein-Block-Typ" aus Graphitkeramik, Hersteller: SGL Carbon AG). Gesamtansicht (links) und Ansicht der Rauchgaskanäle (rechts)

Elektrostatischer Abscheider. Als weitere Maßnahme zur sekundären Abgasbehandlung wurde ein ausschließlich für die Entstaubung kleiner Feuerungsanlagen konzipierter elektrostatischer Abscheider ausgewählt. Bei diesem Bauteil handelt es sich um einen Rohrelektrofilter mit Sprühelektroden und automatischer Abreinigung der Anodenflächen sowie des Sprühdrahts. Der Abscheider besitzt einen Staubauffangbehälter und soll im Serienprodukt vom Heizkessel angesteuert werden können. Das Hochspannungsnetzteil

erzeugt eine Spannung von 15 kV (bei maximal 4 mA), für den gesamten Abscheider sind Abmessungen von ca. 420 mm x 500 mm x 1200 mm zu nennen (Abbildung 13).

Dieser noch nicht im Markt erhältliche Filter, der von der Spanner Re² GmbH, Neufahrn in Niederbayern, in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Amberg-Weiden konzipiert und optimiert wurde, stellt eine vollständige Neuentwicklung dar, die in Form eines Prototypen dem TFZ zur Verfügung gestellt wurde. Er ist auf den Abgasvolumenstrom einer Biomassefeuerung mit ca. 15 kW Leistung ausgelegt; in einer späteren Variante soll ein Filter für den Abgasvolumenstrom einer Biomassefeuerung mit ca. 30 kW Leistung bereitgestellt werden. Da es sich um ein noch in der Entwicklung befindliches Produkt handelt, war die Durchführung von Messungen im laufenden Projekt mit unterschiedlichen Varianten in verschiedenen Verbesserungszuständen unausweichlich, zumal vor den Messungen am TFZ bislang noch kein längerer Einsatz an einer Biomassefeuerung erfolgt ist. Somit können die damit gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse zunächst nur einen orientierenden Charakter besitzen. Sie sollten zunächst die Chancen dieser Technologie als Staubabscheidemaßnahme für Kleinfeuerungen einschätzen helfen.



Abbildung 13: Prototyp eines sekundären Staubabscheiders ("Kleinst-Elektrofilter"). Hersteller: Spanner Re² GmbH, Neufahrn n. Niederbayern links: Gesamtansicht, rechts: Einblick in Elektrodenhalterung mit Belüftungseinrichtung

3.5 Versuchsvarianten und Versuchsbrennstoffe

Während der Feuerungsversuche kamen verschiedene Versuchsbrennstoffe zum Einsatz. Einen Überblick über die verwendeten Brennstoffe und deren Eigenschaften geben Tabelle 10 und Tabelle 11.

Tabelle 10: Heizwert, Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff-, Schwefel- und Aschegehalt der verwendeten Versuchsbrennstoffe

Brennstoff	Kurzbezeichnung	Heizwert H _{u,p} kJ/kg (TS)	C %	H %	N %	S %	Asche %
Holzpellets	HP	18.610	50,9	6,1	0,1	<0,01	0,35
Fichtenhackschnitzel 1	FHS1	18.980	51,1	5,9	<0,05	<0,01	0,52
Fichtenhackschnitzel 2	FHS2	18.630	50,4	6,1	<0,05	<0,01	0,44
Buchenhackschnitzel	BHS	18.010	49,1	6,0	0,10	0,01	0,57
Fichtenhackschnitzel ohne Rinde	FHSoR	19.430	50,1	6,1	<0,05	<0,01	0,18
Fichtenrinde	FR	18.800	51,6	5,5	0,40	0,02	4,92
Buchenscheitholz 1	BuSH1	18.540	49,7	6,0	0,19	0,04	0,45
Buchenscheitholz 2	BuSH2	18.430	49,6	5,8	0,24	0,04	0,68
Birkenscheitholz	BiSH	18.770	49,9	6,2	0,25	0,04	0,64
Fichtenscheitholz	FSH	18.810	50,6	6,1	0,21	0,03	0,44
Fichtenscheitholz ohne Rinde	FSHoR	19.000	50,8	6,2	0,20	0,03	0,31
Holzbricketts	HBr	18.860	50,5	6,1	0,18	0,15	0,55
Rindenbricketts	RBr	18.070	49,6	5,3	0,55	0,06	7,94
Kiefernrundholz	KRH	19.300	51,3	6,4	0,19	0,04	0,44
Fichten-Grohhackgut	GHG	18.970	50,5	6,2	0,20	0,04	0,53
Heizöl	HEL	42.480	86,5 ^a	13,3 ^a	0,015 ^a	< 0,2 ^b	<0,01 ^b
Heizöl schwefelarm	HELsa	42.980	86,5 ^a	13,3 ^a	0,01 ^a	<0,005 ^b	<0,01 ^b

^a Erfahrungswerte aus der Praxis, ^b Anforderungen der DIN 51603-1 [18]

Tabelle 11: Weitere Elementgehalte der eingesetzten Versuchsbrennstoffe

Brennstoff	Kurzbezeichnung	Cl mg/kg	Ca mg/kg	Mg mg/kg	K mg/kg	Si mg/kg	Na mg/kg
Holzpellets	HP	33	944	148	281	1.160	<50
Fichtenhackschnitzel 1	FHS1	<20	1.050	234	623	724	32
Fichtenhackschnitzel 2	FHS2	<20	1.420	189	480	991	142
Buchenhackschnitzel	BHS	24	1.000	375	939	1.010	176
Fichtenhackschnitzel ohne Rinde	FHSoR	<20	755	120	286	853	114
Fichtenrinde	FR	42	8.680	1.110	1.910	1.870	410
Buchenscheitholz 1	BuSH1	917	1.250	286	120	668	<50
Buchenscheitholz 2	BuSH2	1.050	1.300	262	927	660	<50
Birkenscheitholz	BiSH	<20	1.340	179	402	516	<50
Fichtenscheitholz	FSH	1.350	1.510	150	387	1.260	<50
Fichtenscheitholz ohne Rinde	FSHoR	282	715	156	323	1.480	<50
Holzbricketts	HBr	177	937	949	302	1.140	<50
Rindenbricketts	RBr	229	16.400	1.180	2.200	15.100	250
Kiefernrundholz	KRH	1.120	1.260	222	430	441	<50
Fichten-Grohhackgut	GHG	50	1.460	211	583	2.080	<50
Heizöl	HEL	-	-	-	-	-	-
Heizöl schwefelarm	HELsa	-	-	-	-	-	-

Neben der Variation der Brennstoffe werden mit den jeweiligen Feuerungen eine Reihe weiterer Versuchsfragen betrachtet, durch die mögliche Einflüsse auf das Staubemissionsverhalten und auf die Partikelgrößen sowie deren Zusammensetzung festgestellt werden sollen. Diese betrachteten Versuchsfragen werden nachfolgend erläutert.

Pelletkessel. Beim Pelletkessel wurden als Versuchsfragen der

- Einfluss der Leistung (3 Stufen), sowie der
- Einfluss der Pelletqualität (3 Stufen)

ausgewählt. Zur Untersuchung des Einflusses der Pelletqualität wurden Pellets mit drei verschiedenen Feingehalten präpariert (<1 %, 10 % und 20 % massebezogener Feinanteil), wobei es sich bei dem feinkörnigen Material um zuvor mittels Schrotmühle zerkleinerte Pellets gleichen Ursprungs handelte (Abbildung 14). Die geschroteten Pellets wurden durch Siebung (3,15 mm bzw. 2 mm Rundlochsiebe) aufbereitet und die 2 Fraktionen kleiner 3,15 mm entsprechend den Gewichtsanteilen dem eigentlichen Versuchsbrennstoff zugemischt. Bei dem Versuchsbrennstoff handelte es sich um Holzpellets, die der DIN_{plus}-Qualität entsprechen. Eine Probesiebung dieser Pellets ergab einen Ausgangsfeingehalt von <1 % (Sieblochdurchmesser 3,15 mm). Dieser Feingehalt kann als vernachlässigbar gering angesehen werden.



Abbildung 14: Pellets mit definiertem Feingehalt (Fraktion 1, jeweils links oben: <2 mm; Fraktion 2, jeweils links unten: 2 bis 3,15 mm)

Hackschnitzelkessel. Beim Hackschnitzelkessel wurden die folgenden Versuchsfragen betrachtet:

- Einfluss der Leistung (3 Stufen)
- Einfluss des Brennstoffwassergehalts (3 Stufen)
- Einfluss der Brennstoffart und des Aschegehalts im Brennstoff (4 Brennstoffe)
- Einfluss des Feinanteils im Brennstoff (2 Stufen)
- Wirkung eines Kondensationswärmetauschers (3 Brennstoffe)

Zur Herstellung der Versuchsbrennstoffe wurden lufttrockene Fichten- und Buchenstangen beschafft und vor Ort mittels eines mobilen Trommelhackers gehackt. Die Fichtenhackschnitzel zur Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Wassergehaltsstufen wurden durch Zugabe von Wasser (Vernebeln mit Rückenspritze über ausgebreitete Hackschnitzelschüttung) und anschließender Mischung und Lagerung in festverschlossenen Säcken auf den entsprechenden Wassergehalt eingestellt. Der Aschegehalt der Hackschnitzel hängt hauptsächlich vom Rindenanteil ab. Deshalb wurde ein Teil der Fichtenstangen von Hand mit einem Schäleisen entrindet. Die dabei anfallende Rinde reichte jedoch für die vorgesehenen Versuche mit reiner Rinde als Brennstoff nicht aus; daher wurde grob gehackte Fichtenrinde aus einem Holz verarbeitenden Betrieb zugekauft. Um in etwa die gleichen Korngrößeneigenschaften wie beim entrindeten und nicht-entrindeten Fichtenhackgut zu erzielen, wurde die gehackte Fichtenrinde mit einem Sieb mit Maschenweite 1 cm abgesiebt (vgl. Abbildung 15). Eine bildliche Darstellung der Korngrößen der verwendeten Hackschnitzelbrennstoffe und der aufbereiteten Fichtenrinde bietet Abbildung 16.

Um den Einfluss des Feinanteils im Brennstoff auf die Emissionen bestimmen zu können, wurden vorhandene Hackschnitzel mit einem hohen Feinanteil verwendet. Diese wurden anschließend windgesichtet, um den Feinanteil zu reduzieren.

Für den Einsatz des Kondensationswärmetauschers wurde ein spezieller Prüfstands Aufbau benötigt. Dieser sollte eine Messung der Staubemission vor und nach dem Wärmetauscher ermöglichen. Der Wärmetauscher wurde mit einer Rücklauftemperatur von 25 °C betrieben.



Abbildung 15: Siebung der gehackten Fichtenrinde



Abbildung 16: Versuchsbrennstoffe für die Bestimmung des Aschegehaltseinflusses, Größenklassen nach Siebanalyse mit 3,15 mm, 8 mm und 45 mm Sieb

Scheitholzessel. Beim Scheitholzessel wurden folgende Versuchsfragen untersucht:

- Einfluss der Leistung (2 Stufen)
- Einfluss der Brennstoffart und Aschegehalt (4 Brennstoffe)
- Einfluss der Brennstoffaufbereitung (5 Varianten)
- Einfluss des Brennstoffwassergehalts (3 Stufen bei Scheitholz, 2 Stufen bei Grobhackgut)
- Einfluss des Kaminzugs (3 Stufen)
- Emissionen während eines Abbrandverlaufs (4 Abbrände)

Erster Einflussfaktor war die Veränderung der Leistung. Die Leistung wurde auf 70 % der Nennwärmeleistung begrenzt, indem die Leistungsabnahme entsprechend reduziert wurde. Bei Nennwärmeleistung wurden 4 verschiedene Brennstoffe verglichen: Fichtenscheitholz, Fichtenscheitholz ohne Rinde, Buchenscheitholz und Birkenscheitholz jeweils mit einer Scheitlänge von 50 cm. Zudem wurde am Beispiel des Fichtenholzes der Einfluss der Brennstoffaufbereitung untersucht. Zum Einsatz kamen hier beispielsweise Scheite mit unterschiedlicher Masse.

Tabelle 12: Mittlere Masse und mittlerer Durchmesser der beim Scheitholzessel eingesetzten Scheite

Scheitgröße	mittlere Masse je Scheit	mittlerer Durchmesser
klein	0,6 kg	50 mm
normal	2,1 kg	120 mm
groß	3,3 kg	160 mm

Die kleinen Scheite hatten eine mittlere Masse von 0,6 kg, die normalen Scheite im Mittel 2,1 kg und die großen Scheite durchschnittlich 3,3 kg (vgl. Abbildung 17, Tabelle 12). Eine weitere Aufbereitungsform waren ungespaltene Fichtenrundlinge. Weiterhin wurde Grobhackgut beschafft, da solcher Brennstoff auch für diesen Scheitholzessel zugelassen ist. Hier wurde zusätzlich der Wassergehalt des Grobhackguts in zwei Stufen (12 % und 23 %) variiert, indem das frisch angelieferte Hackgut auf den Zielwassergehalt getrocknet wurde. Zudem sollte auch beim Fichtenscheitholz der Einfluss eines veränderten Wassergehalts bestimmt werden. Dazu wurde frisches Scheitholz auf die gewünschten Wassergehaltsstufen 23 % und 31 % getrocknet und zum Ausgleich der Verteilung des Wassers im Scheit in Plastiksäcken ca. 2 Wochen konditioniert um eine ungleichförmige Feuchtigkeitsverteilung im Scheit zu verhindern.

Auch die Veränderung des Kaminzugs war im Versuchsprogramm vorgesehen. Mittels eines regelbaren Saugzuggebläses nach der Messstrecke und vor dem Kamin konnte der Förderdruck in 3 Stufen variiert werden. Wie sich die Emissionen während des Abbrands einer Brennstoffauflage verhalten, wurde durch kurze, aufeinanderfolgende Messungen von 15 bis 20 Minuten während des gesamten Abbrandes ermittelt.

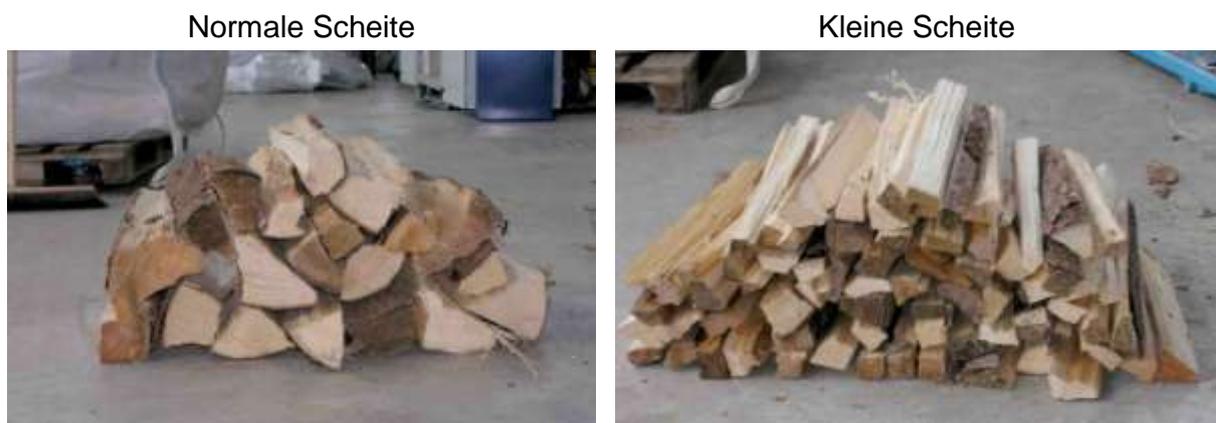


Abbildung 17: Normalgroße und kleingespaltene Fichtenscheite (jeder Haufen entspricht ca. eine Brennstoffauflage)

Heizölkessel. Beim Heizölkessel wurden zwei Versuchsfragen betrachtet:

- Einfluss der Leistung (2 Stufen) sowie
- Einfluss der Brennstoffart (2 Stufen).

Der Einfluss der Leistung wurde durch Messungen im Dauerbetrieb mit Nennlast und durch Messungen im getakteten Betrieb (Betrieb mit alternierenden Lauf- und Stillstandszeiten gleicher Länge) zur Simulation von 50 % Leistung untersucht. Zudem wurde im Nennlastbetrieb zum normalen Heizöl noch ein schwefelarmes Heizöl eingesetzt.

Kachelofenheizeinsatz. Beim Kachelofenheizeinsatz wurden folgende Versuchsvarianten durchgeführt:

- Einfluss der Brennstoffart (5 Brennstoffe)
- Einfluss der Brennstoffaufbereitung (3 Varianten)
- Einfluss der Brennstoffmenge (3 Stufen)
- Einfluss des Brennstoffwassergehalts (4 Stufen)
- Einfluss des Kaminzugs (3 Stufen)
- Anwendereinflüsse

Die untersuchten Brennstoffarten waren beim Kachelofenheizeinsatz Fichtenscheitholz mit und ohne Rinde, Buchenscheitholz, Birken-scheitholz und Holzbriketts, die die Form von Hohlzylindern aufwiesen (Abbildung 18). Wie beim Scheitholz-kessel wurden auch hier Buchenscheite mit unterschiedlicher Scheitmasse eingesetzt (0,56 kg, 1,125 kg und 2,25 kg). Eine weitere Variationsmöglichkeit ist die aufgelegte Brennstoffmenge, die in drei Stufen variiert wurde (2,25 kg, 4,5 kg und 9 kg). Der Brennstoffwassergehalt wurde durch Trocknung von nassem Scheitholz in 4 Stufen (12 %, 18 %, 23 % und 30 %) eingestellt. Zudem wurde der Unterdruck im Kamin in 3 Stufen (14 Pa, 24 Pa, 34 Pa) variiert. Zur besseren Beurteilung der automatischen Steuerung der Verbrennungsluftklappe wurde diese zunächst außer Betrieb gesetzt und die Verbrennung wurde gemäß Bedienungsanleitung von Hand geregelt. Als Fehlbedienung kann der Versuch interpretiert werden, bei dem die automatische Steuerung deaktiviert und die Luftklappe durchgehend geöffnet blieb.



Abbildung 18: (von links nach rechts) 4 Buchenscheite á 1,125 kg (33 cm), 2 Holzbriketts á 2 kg und 2 Buchenscheite á 2,25 kg (33 cm) im Vergleich

Kaminofen. Der Kaminofen wurde in folgenden Versuchsvarianten getestet:

- Einfluss der Brennstoffart (6 Brennstoffe)
- Einfluss der Brennstoffaufbereitung (3 Varianten)
- Einfluss der Brennstoffmenge (4 Varianten)
- Einfluss des Brennstoffwassergehalts (3 Stufen)
- Einfluss des Kaminzugs (3 Stufen)
- Anwendereinflüsse
- Emissionen während eines Abbrandverlaufs (3 Abbrände)

Zusätzlich zu den Brennstoffen, die beim Kachelofenheizeinsatz verwendet wurden, kamen hier noch Rindenbriketts zum Einsatz. Der Einfluss der Brennstoffaufbereitung wurde auch hier mittels unterschiedlich schwerer Scheite (0,35 kg, 0,7 kg und 1,4 kg) geklärt. Eine wichtige Versuchsvariante beim Kaminofen ist zudem die Variation der aufgelegten Brennstoffmenge. Deshalb wurden bei Buchen- und Fichtenscheitholz zusätzlich jeweils Messungen mit der doppelten Auflagemasse durchgeführt. Zur Einstellung des Wassergehalts wurde nasses Scheitholz auf die Wassergehaltsstufen 12 %, 20 % und 30 % getrocknet. Eine Fehlbedienung wurde durch komplettes Schließen der Sekundärluftklappe erzeugt, die normalerweise halb offen stehen sollte. Ähnlich wie beim Scheitholzkessel wurde auch hier mittels aufeinander folgender Messungen im Abstand von 10 Minuten das Verhalten der Feuerung während eines Abbrands untersucht.

3.6 Versuchsdurchführung

Die Feuerungsanlagen bzw. Einzelfeuerstätten wurden auf dem Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums aufgebaut und je nach Bedarf im Beisein eines Technikers des Feuerungsherstellers in Betrieb genommen. Anschließend wurden Vorversuche mit den verwendeten Brennstoffen durchgeführt, um die Bedienung der Anlage kennen zu lernen und die Dauer bis zum Beharrungszustand zu ermitteln. Während der Vorversuche wurden außerdem der zu erwartende Gesamtstaubgehalt und die Messposition für die Staubprobenahme (Kernstrom) bestimmt sowie ein Messgeräteabgleich durchgeführt. Die Verbrennungsversuche an den jeweiligen Anlagen einschließlich dieser Vorbereitungen wurden im Zeitraum von Mai 2006 bis September 2007 durchgeführt. Die Durchführung wird nachfolgend beschrieben. Die unterschiedlichen Feuerungen und Versuchsvarianten erfordern jeweils auch spezifische Vorgehensweisen und Prüfstandsaufbauten. Nachfolgend sollen nun meist allgemein, teilweise aber auch detailliert, die Versuchsdurchführung und ausgewählte Prüfstandsaufbauten beschrieben werden.

Pelletkessel. Beim Pelletkessel kam der bereits in Kapitel 3.1 beschriebene Prüfstandsaufbau zum Einsatz. Nach einer Vorheizphase, die zum Einstellen konstanter Betriebsbedingungen notwendig war, wurden die Emissionsmessungen durchgeführt. Die gas-

förmigen Abgaskomponenten wurden während des gesamten Versuchszeitraums kontinuierlich dem Rauchgas entnommen, den Analysatoren zugeführt und die Messwerte wurden aufgezeichnet. Die Messung von Gesamtstaub und Korngrößenverteilung geschah diskontinuierlich mit Messzeiten zwischen 60 Minuten (Gesamtstaub) und 180 Minuten (Korngrößenverteilung). Diese langen Messzeiten waren hier zwingend erforderlich, um genügend Staubmasse für die anschließende chemische Analyse auch auf den Impaktorplatten für die gröberen Stäube zu sammeln. Die Messungen mit der Messausrüstung zur Gesamtstaubprobenahme nach VDI 2066 und dem Kaskadenimpaktor wurden parallel ausgeführt, wobei in dem Zeitraum einer Impaktormessung oft mehrere Gesamtstaubmessungen erfolgten. Der Kessel stand während der Versuche auf einer Abbrandwaage, um den Brennstoffmassenstrom bestimmen zu können.

Hackschnitzelkessel. Im Allgemeinen war die Vorgehensweise beim Hackschnitzelkessel identisch zu jener beim Pelletkessel, daher sollen im Folgenden nur die wesentlichen Unterschiede erläutert werden. Die Messzeiten lagen je nach Versuchsvariante bei 20 Minuten (bei hohen Staubemissionen) bis 120 Minuten (bei niedrigen Staubemissionen). Zur Beurteilung der Effekte des Kondensationswärmetauschers wurde der Prüfstands Aufbau verändert. Vor der Zuführungseinrichtung für die Verdünnungsluft wurde der Kondensationswärmetauscher in den Abgasweg eingebaut und wasserseitig an eine zweite Wärmeleistungsmessstrecke angeschlossen. Die Messung der Gesamtstaubemission erfolgte bei allen Varianten zeitgleich und parallel mit zwei identischen Probenahmeeinrichtungen vor und nach dem sekundären Wärmetauscher. Der Impaktor kam dagegen im Wechsel, d. h. zeitlich aufeinanderfolgend vor und nach dem Kondensationswärmetauscher zum Einsatz. Die gasförmigen Komponenten wurden nur vor dem Kondensationswärmetauscher gemessen. Mittels der zweiten Wärmeleistungsmessstrecke konnte der zusätzliche Gewinn an Wärmeleistung ermittelt werden. Anders als beim Pelletkessel stand hier nicht die gesamte Feuerung, sondern lediglich der Brennstoffbehälter auf der Waage.

Scheitholzessel. Auch beim Scheitholzessel wurde der bereits in Kapitel 3.1 erläuterte Prüfstands Aufbau verwendet. Da der Füllraum im Kesselkörper integriert ist, musste auch hier der komplette Kessel auf die Brennstoffwaage gestellt werden. Die Messzeit schwankte je nach Versuchsvariante und damit einhergehender unterschiedlicher Staubemission zwischen 20 und 90 Minuten. Wie beim Hackschnitzelkessel musste auch beim Scheitholzessel der Messaufbau zur Erprobung einer Sekundärmaßnahme angepasst werden. Der elektrostatische Abscheider befand sich vor der Einspeisung der Verdünnungsluft. Zusätzlich war noch ein Bypass eingebaut, der es durch Umschalten einer Klappe erlaubte, das Abgas am Filter vorbei zu leiten (vgl. Abbildung 19).

Die Staubmessung erfolgte abwechselnd mit eingeschaltetem und ausgeschaltetem Filter (über Bypass). Somit war der Abscheidegrad hier nur unter Annahme konstanter Versuchsbedingungen zu ermitteln. Außerdem war es – im Gegensatz zum Aufbau mit dem Sekundärwärmetauscher – bei diesem Aufbau möglich, Messungen im verdünnten Abgas durchzuführen, ohne dass das Abgas über den Abscheider geführt werden musste.

Der Zeitpunkt der Messungen musste beim Scheitholzessel anders gewählt werden als bei den drei automatisch beschickten Feuerungen. Zunächst wurde der Füllraum des Kessels zu ca. zwei Drittel gefüllt und diese Auflage wurde zum Vorheizen abgebrannt. Für den zweiten Abbrand wurde der Kesselfüllraum vollständig ausgenutzt und während dieses Abbrandes konnten dann die Emissionsmessungen durchgeführt werden. Eine Veranschaulichung der Messzeitpunkte bietet Abbildung 33 und Abbildung 34 in Kapitel 5.3.1. Nach Auflage des Brennstoffs benötigt der Kessel ca. 20 Minuten bis sich konstante Betriebsbedingungen einstellen. Danach folgt eine zwei- bis dreistündige Phase, während der sich das Emissionsniveau abgesehen von geringfügigen Schwankungen kaum verändert. Während dieser Phase wurden die gas- und staubförmigen Emissionen gemessen. Eine Messung über den kompletten Abbrand, wie sie erstrebenswert wäre, war wegen der begrenzten Beladungskapazität der Filterplatten im Impaktor nicht möglich.

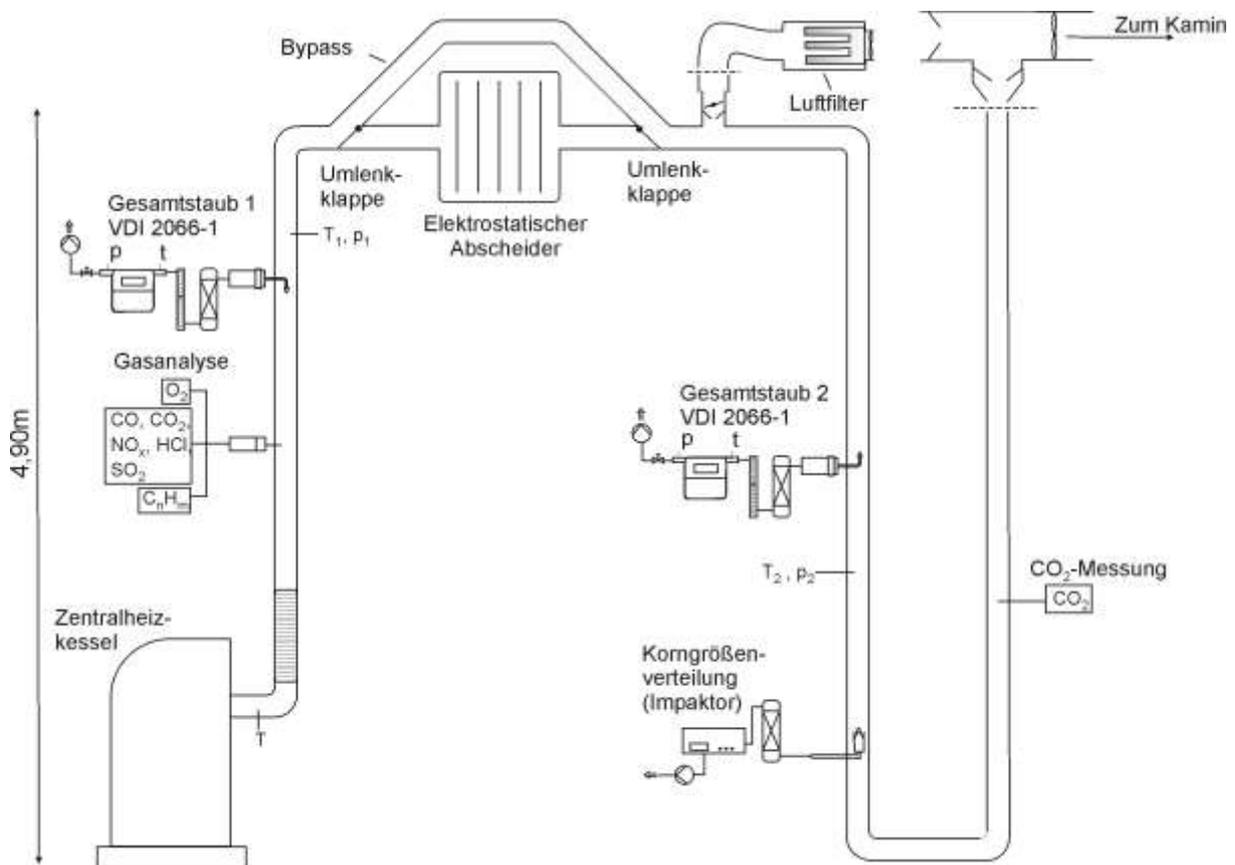


Abbildung 19: Prüfstands Aufbau mit Scheitholzessel und elektrostatischem Abscheider

Die Bestimmung der Staubemissionen im zeitlichen Verlauf eines Abbrandes (vgl. oben bereits erwähnte Abbildungen in Kapitel 5.3.1) wurden auf Grundlage separater Messungen erstellt, bei denen sich die Vorgehensweise von der Standardvorgehensweise unterschied. An den beiden Messtagen wurden je eine halbe (zum Vorheizen) und eine ganze Brennstoffauflage abgebrannt. Die Emissionsmessungen begannen jeweils sofort

nach Schließen der Feuerraumtür. Anschließend wurden Mittelwerte über 15 bis 20 Minuten gebildet, die den Verlauf der Emissionen während eines Abbrands beschreiben.

Ölkessel. Da die Variationsmöglichkeiten beim Ölkessel stark eingeschränkt sind, konnte der übliche Messaufbau aus Kapitel 3.1 verwendet werden. Die Messung der Emissionen erfolgt, nachdem der Kessel gezündet hat und sich konstante Bedingungen eingestellt haben. Da die Leistung des Kessels nicht modulierend (d. h. stufenlos) verändert werden kann, muss der Teillastbetrieb durch eine getaktete Betriebsweise (Ein-Aus-Betrieb) erreicht werden. Die Messung bei einem Betrieb mit 50 % Leistung (50 % Laufzeit über den Messzeitraum) beinhaltet somit auch die (kurzen) Anfahrvorgänge. Die Lauf- und Stillstandszeiten des Kessels betragen dabei jeweils etwa zwölf Minuten.

Kachelofenheizeinsatz. Der Messaufbau musste für den Kachelofenheizeinsatz komplett verändert werden. Da hier Sekundäreffekte durch Rauchgaskondensation zu erwarten waren, musste eine Staubmessung im unverdünnten Abgas ermöglicht werden. Damit die Geschwindigkeitsmessung mit ausreichender Genauigkeit erfolgen konnte, musste die Geschwindigkeit im Abgasrohr entsprechend hoch sein. Aufgrund der im Vergleich zu den Kesseln geringeren Feuerungsleistung und dem damit einhergehenden geringen Abgasvolumenstrom konnte eine ausreichende Geschwindigkeit aber nicht ohne weiteres erreicht werden. Deshalb wurde der Querschnitt des Abgasrohres auf 94 mm verengt. Ein weiteres Problem bestand darin, dass der Heizeinsatz auf der Waage stehen sollte, somit musste das angeschlossene Abgasrohr vollständig vom Rest der Messstrecke entkoppelt werden, um eine Beeinflussung der Waage durch die wärmebedingte Ausdehnung des Abgasrohres auszuschließen. In umfangreichen hierzu durchgeführten Vorversuchen war ein erheblicher Einfluss der Ausdehnung des Abgasrohres festgestellt worden. Als einzige praktikable Lösung bot sich an, das Ende des Abgasrohres der Messstrecke im Teilbereich des unverdünnten Abgases in ein größeres Übergangsstück zu schieben (vgl. Abbildung 20: oberer Abschnitt der Messstrecke im unverdünnten Abgas). Allerdings wird dadurch schon vor der planmäßigen Verdünnungsluftzuführung Umgebungsluft in das Abgasrohr eingezogen. Zur Vermeidung von zusätzlichem Partikeleintrag wurde daher diese Übergangsstelle mit gefilterter Umgebungsluft gespült. Zusätzlich zu den vorhandenen Messstellen im Verdünnungstunnel wurde außerdem eine weitere Messstelle für Gesamtstaub geschaffen (vgl. Abbildung 20: "Gesamtstaub 3"). Ziel dieser Maßnahme war es, eine größere Anzahl von Staubproben (und damit mehr Staubmasse) zu sammeln um eine umfangreichere chemische Analyse der Staubproben zu ermöglichen.

Die Vorgehensweise bei der Emissionsmessung war im Wesentlichen durch die automatische Steuerung der Verbrennungsluftzufuhr geprägt. Diese öffnete die Luftklappe nach Brennstoffauflage und reduzierte dann die Luftzufuhr durch Schließen der Klappe in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur. Zur Erhaltung der Glut wurde die Klappe zum Abbrandende vollständig geschlossen. Der Start der Emissionsmessung erfolgte direkt nach Schließen der Feuerraumtür nach der Brennstoffauflage, und das Beenden der Messung war vorgesehen, wenn das Gesamtgewicht auf der Waage das selbe Niveau wie vor Brennstoffauflage wieder erreichte, das heißt, wenn sämtlicher aufgelegter Brennstoff abgebrannt war. Allerdings wurde die Verbrennungsluftzufuhr oft schon vor

dem Abbrand der gesamten Brennstoffauflage geschlossen. Die Messung musste zu diesem Zeitpunkt abgebrochen werden, da dann eine Emissionsbestimmung aufgrund des nicht mehr vorhandenen Volumenstroms nicht mehr sinnvoll möglich war.

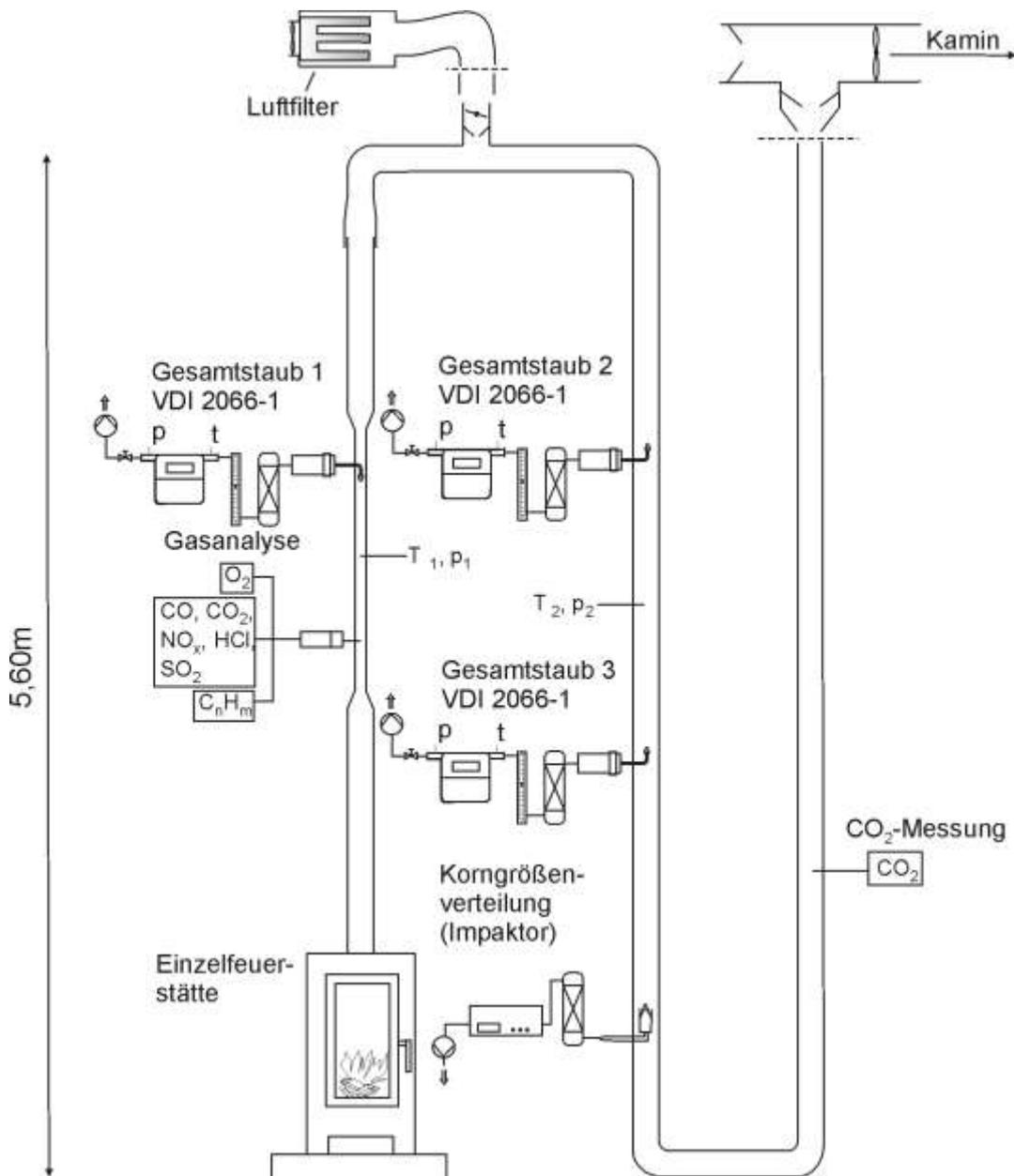


Abbildung 20: Prüfstands Aufbau bei den Einzelfeuerstätten

Kaminofen. Beim Kaminofen kam zum großen Teil eine ähnliche Messstrecke zum Einsatz wie beim Kachelofenheizeinsatz. Der Querschnitt der Messstrecke im unverdünnten Abgas wurde hier aber noch stärker verengt (auf einen Durchmesser von 64 mm), da die Feuerungsleistung und damit der Volumenstrom beim Kaminofen gegenüber dem Kachelofenheizeinsatz wesentlich niedriger waren. Auch an der zweiten Gesamtstaubmessstelle im verdünnten Abgas wurde hier durchgehend eine Staubbestim-

mung durchgeführt. Der Ablauf der Emissionsmessung unterschied sich geringfügig vom Kachelofenheizeinsatz. So konnte hier tatsächlich vom Auflegen des Brennstoffs bis zum Erreichen des Gewichts vor der Brennstoffauflage gemessen werden. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich damit vom Vorgehen der Prüfung für die Zertifizierung nach DIN_{PLUS}, bei der nur eine halbstündige Staubmessung vorgesehen ist.

Einen Sonderfall stellt die Charakterisierung der Abbrandphasen dar. Um auch einzelne Abschnitte des Abbrands beurteilen so können, wurden die Emissionsmessungen nicht über den gesamten Abbrand durchgeführt, sondern es wurde alle 10 Minuten eine neue Messung gestartet. Aus diesen Messwerten ergibt sich dann ein Verlauf wie in Kapitel 5.6.1 dargestellt.

3.7 Auswertungen

Auswertung. Zur Auswertung und Verrechnung der Mess- und Analysedaten wurde die am Technologie- und Förderzentrum entwickelte Auswertungsdatei FMDA 9.3 zusammen mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel verwendet. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

Schadstoffemissionen. In einem ersten Auswertungsschritt wurden die Abgaskenngößen Luftverhältniszahl, Normdichte, Normvolumenstrom und Massenstrom als Minutenmittelwerte aus den Messwerten berechnet. Anschließend wurden Mittelwerte der berechneten und gemessenen Werte über die Dauer der Staubprobenahme gebildet. Sämtliche erfassten Schadstoffemissionen wurden sowohl als Massenkonzentrationen (mg/Nm^3 bei Bezugszustand 13 % O_2), als auch als energiemengenbezogene Emissionen ($\text{mg}/\text{MJ H}_{\text{u(roh)}}$) ausgewiesen. Die organischen gasförmigen Kohlenstoffverbindungen werden als organisch gebundener Kohlenstoff (Gesamt-C) bezogen auf trockenes Abgas, die NO_x -Emissionen als NO_2 , die anorganischen Chloremissionen als HCl und die Schwefeloxidemissionen als SO_2 angegeben. Neben der tabellarischen Ausgabe in formatierten Datenblättern erfolgte eine grafische Darstellung ausgewählter Messgrößen als Zeitverlauf.

Wärmeleistung und Wirkungsgrad. Mit den Daten zur Brennstoffzusammensetzung und den Momentanwerten der Abgaskenngößen, Temperaturen und Kühlwasserdurchsatz erfolgte die Berechnung der Kessel- und Feuerungswärmeleistung und des feuerungstechnischen Wirkungsgrads. Dazu wurden der Kühlwasservolumenstrom sowie dessen Temperatur im Kesseleingang und die Vorlauftemperatur kontinuierlich erfasst und die verbrauchte Brennstoffmasse bestimmt. Die Mittelwertbildung der Momentanwerte wurde wie bei den Schadstoffemissionen über die Dauer der Probenahme durchgeführt. Bei allen Feuerungen erfolgte die Bestimmung des Feuerungswirkungsgrades nach der indirekten Methode durch Berechnung der Verluste.

Gesamtstaubgehalt. Die Auswertung der Staubprobenahme erfolgte in eigenen Berechnungsblättern. Dabei wurden zuerst die abgesaugten Normvolumina aus den ge-

messenen Gasmengen und Gaszuständen bestimmt. Mit diesen Zwischenergebnissen wurden dann die gravimetrisch ermittelten Filterbeladungen auf Massenkonzentrationen umgerechnet. Die Filterbeladungen wurden jeweils mit entsprechenden, gleich behandelten, Leerfiltern korrigiert.

Impaktor. Durch Auswaage der einzelnen Prallplatten wurde die Korngrößenverteilung bestimmt. Bei der Angabe der fraktionierten Partikelemission (in mg/Nm^3) wurde die berechnete Verteilung auf den Messwert für die Gesamtstaubkonzentration (Parallelbestimmung) bezogen, da hier die Messunsicherheit für die Summe aller Stäube in den Korngrößen geringer ist, als die Summe der Staubmassen auf den einzelnen Prallplatten. Hintergrund ist, dass bei der Gesamtstaubprobenahme die Konditionierungs- und Wägeschritte mit den jeweiligen Unsicherheiten für nur ein Filtermedium anfallen, während es beim Impaktor sieben Prallplatten und deren Metallhalter wären. Durch Partikelverlust bei der Handhabung (Wiegen, Konditionieren) ist die Summe der Impaktorstufen tendenziell meist geringer als bei der Gesamtstaubbestimmung gemäß VDI 2066.

Brennstoffe. In den Auswertungen wurden die für den jeweiligen Brennstoff separat ermittelten Elementaranalysen, die Werte für den Wasser- und Aschegehalt sowie der separat bestimmte Heizwert berücksichtigt (vgl. hierzu Kapitel 3.5).

4 Ergebnisse zu versuchstechnischen Fragestellungen

Die Methoden für die Staub- und Abgasprobenahme bei Biomasse-Kleinfeuerungen müssen stets im Hinblick auf die jeweiligen Ziele der Versuchsanstellung und Auswertung neu hinterfragt und ggf. angepasst werden. Wegen der hier gegebenen Vorgabe, dass Staubproben für die spätere inhaltsstoffliche Analyse möglichst unter reproduzierbaren aber zugleich auch wirklichkeitsnahen Bedingungen genommen werden sollten, wurde eine Vielzahl von Parallel- und Vergleichsmessungen am entwickelten Versuchsaufbau mit Verdünnungstunnel durchgeführt. Im Verlauf des Projektes sollte daraus eine Datenbasis entstehen, aus der Erkenntnisse über die Auswirkung und die Messabweichung bei unterschiedlichen Probenahmeorten und Abgaszuständen gewonnen werden. Hierzu werden nachfolgend einige Auswertungen vorgestellt, die für die Diskussion um zukünftige Normprüfverfahren als Datenbasis nützlich erscheinen.

4.1 Wirkung der Abgasverdünnung auf die Gesamtstaubmessung

Zur Verdünnung wurde der in Abbildung 21 dargestellte Verdünnungstunnel am TFZ verwendet. Die Prozesskenndaten in Tabelle 13 zeigen, dass durch den hier gewählten Verdünnungsschritt die durchschnittliche Abgastemperatur bei der verwendeten Kaminofenfeuerung von 262 °C auf 56 °C gesenkt wird und dass hierfür im Mittel ein Verdünnungsverhältnis von ca. 1 : 5,7 erforderlich ist.

Tabelle 13: Typische Prozesskenndaten bei den Versuchen mit Verdünnungstunnel (Versuche mit Kaminofen)

Parameter	Bandbreite		Mittelwert
	Minimum	Maximum	
CO ₂ , unverdünnt	0,5 Vol.-%	9,4 Vol.-%	4,8 Vol.-%
CO ₂ , verdünnt	0,1 Vol.-%	2,0 Vol.-%	0,9 Vol.-%
Verdünnungsverhältnis	2,6	10,7	5,7
Abgastemperatur, unverdünnt	87 °C	352 °C	262 °C
Abgastemperatur, verdünnt	37 °C	72 °C	56 °C

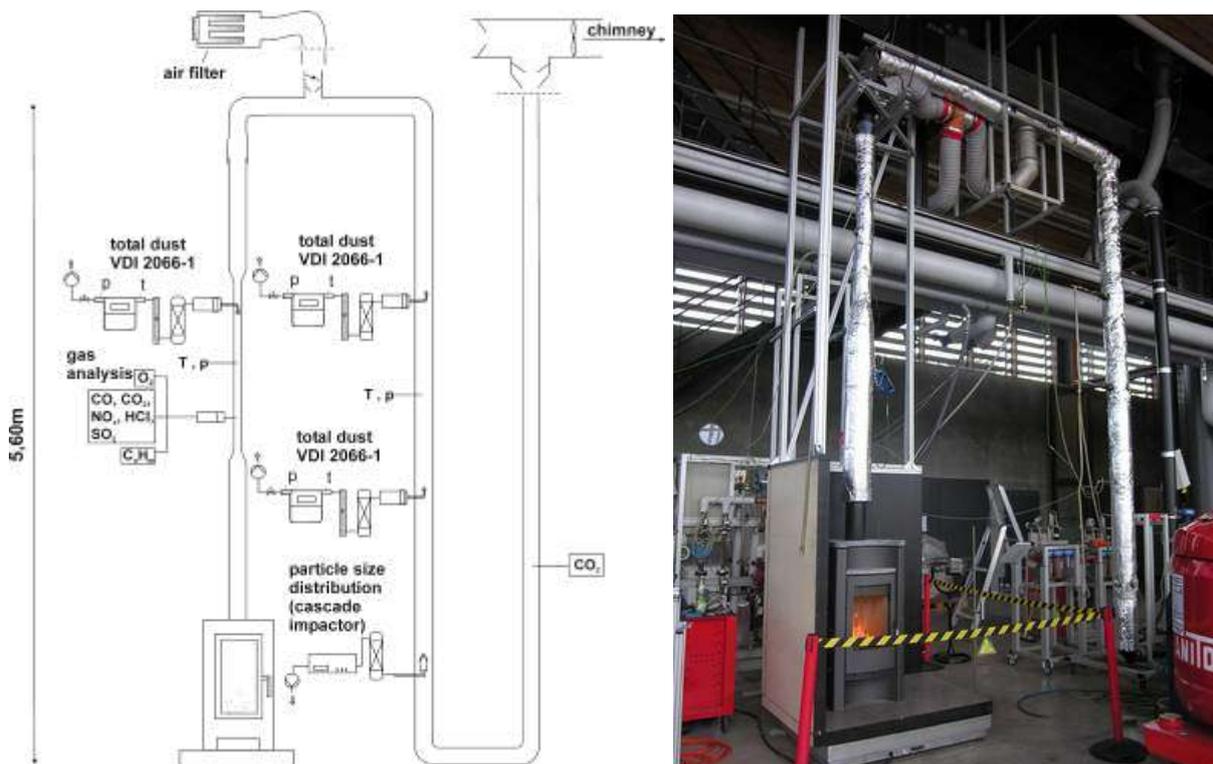


Abbildung 21: Aufbau und Probenahmeposition im verwendeten Verdünnungstunnel für die Staubprobennahme am TFZ

In Abbildung 22 wird die Auswirkung dieses Verdünnungsschrittes auf die gemessenen Staubwerte gezeigt. Dargestellt ist hier der auf Abgas im Normzustand bei 13 % O₂ bezogene absolute Staubzuwachs im verdünnten gegenüber dem unverdünnten Abgas. Die Ergebnisse zeigen eine klare Korrelation zwischen der Staubzunahme und der parallel gemessenen Kohlenwasserstoffkonzentration im unverdünnten Abgas (angegeben als Ges.-C). Als Erklärung hierfür ist davon auszugehen, dass die Temperaturabsenkung eine Kondensation verschiedener organischer Substanzen bewirkt hat, die anschließend bei der Staubprobennahme als Partikel abgeschieden und als Gesamtstaub gewertet werden. Mit höheren Kohlenwasserstoffgehalten steigt die absolute Staubzunahme überproportional an (Abbildung 22).

Die Betrachtung der relativen Staubemissionszunahme (Abbildung 23) zeigt ein ähnliches Bild, allerdings ist hier eher von einer linearen Zunahme auszugehen, da mit zunehmendem Kohlenwasserstoffausstoß auch im unverdünnten Abgas von einem Anstieg des Bezugsniveau auszugehen ist. Die Ergebnisse zeigen, dass Kohlenwasserstoffemissionen in einer Größenordnung von mehr als ca. 300 mg/Nm³ selten sind. Diese Messwerte waren durch Simulation von Fehlbedienungs Zuständen und minderwertigen Brennstoffen an den untersuchten Einzelfeuerstätten zustande gekommen.

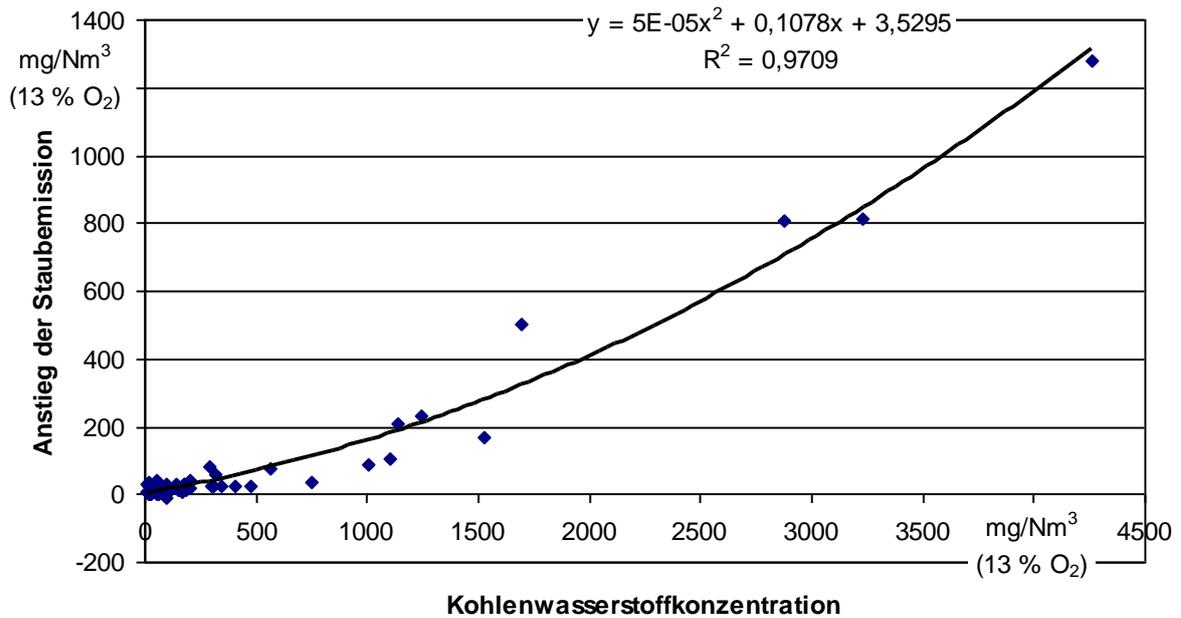


Abbildung 22: Anstieg der gemessenen absoluten Staubemission im verdünnten Abgas gegenüber dem unverdünnten Abgas in Abhängigkeit von der Kohlenwasserstoffkonzentration (angegeben als Ges.-C, gemessen im unverdünnten Abgas). Auswertung von 95 Parallelmessungen an einem Kaminofen und einem Kachelofen mit verschiedenen Holzbrennstoffen

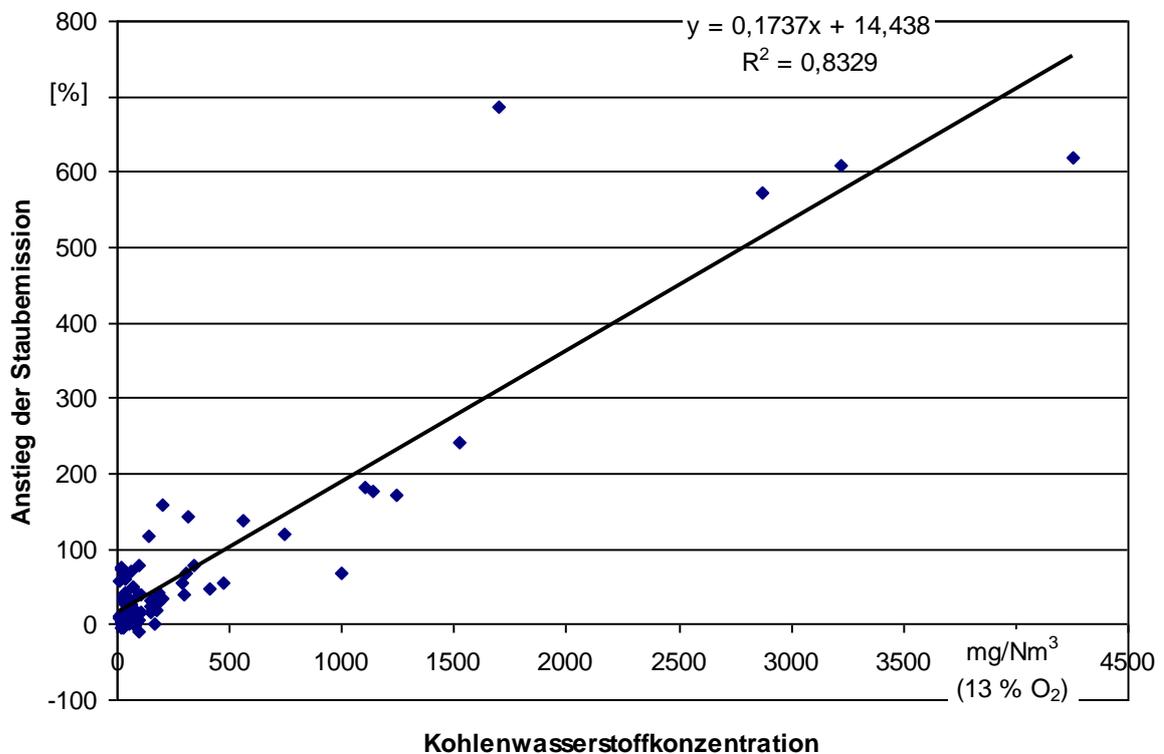


Abbildung 23: Relative Zunahme des Staubmesswertes im verdünnten Abgas gegenüber dem unverdünnten Abgas in Abhängigkeit von der Kohlenwasserstoffkonzentration (angegeben als Ges.-C, gemessen im unverdünnten Abgas). Auswertung von 95 Parallelmessungen an einem Kaminofen und einem Kachelofen mit verschiedenen Holzbrennstoffen

4.2 Schwellenwerte für erhöhte Kohlenwasserstoffkonzentrationen

Anhand der Korrelation zwischen den Kohlenmonoxid(CO)-Emissionen und der Konzentration der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (angegeben als Gesamt-C Emission) kann auf einen Schwellenwert geschlossen werden, ab dem bei Stückholzbrennstoffen mit einem Anstieg der organischen Kohlenstoffverbindungen im Abgas zu rechnen ist (Abbildung 24). Dieser Schwellenwert liegt in etwa bei ca. 700 bis 1.000 mg CO je Normkubikmeter (bei 13 % O₂). Folglich ist auch ab diesem CO-Schwellenwert erst mit einer deutlichen Partikelzunahme durch Kondensation organischer Verbindungen infolge der Abgasabkühlung zu rechnen (vgl. Kapitel 4.1).

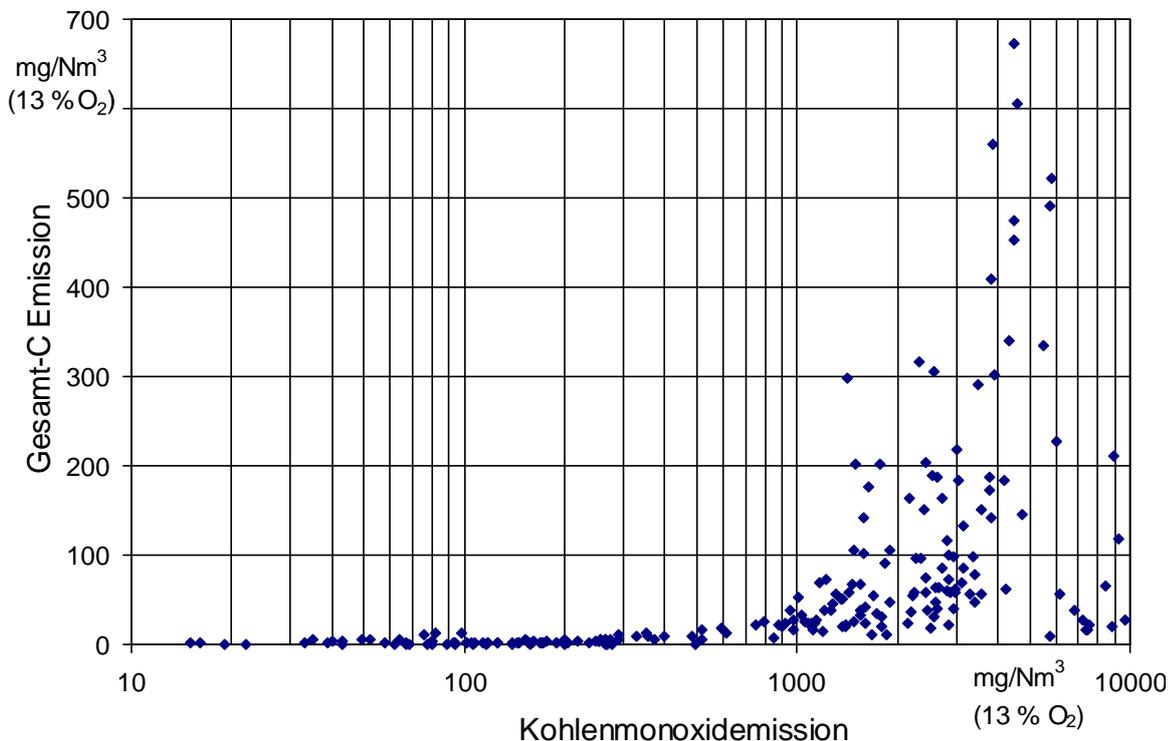


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen CO und Gesamt-C-Emissionen, gemessen in Feuerungsversuchen an Einzelfeuerstätten (1 Kaminofen und 1 Kachelofenheizeinsatz) für Stückholzbrennstoffe

Der in Abbildung 24 dargestellte kritische Bereich von 700 bis 1.000 mg/Nm³ wird bei Einzelfeuerstätten auch im bestimmungsgemäßen Betrieb häufig erreicht bzw. überschritten, bei Bedienungsfehlern sogar um ein Vielfaches (vgl. Kapitel 5.5 und 5.6). Somit besteht insbesondere bei diesen Feuerungsanlagen ein hohes Potenzial zum Anstieg der gemessenen Staubemissionen infolge der Abkühlung des Abgases.

4.3 Gesamtstaubbezug bei Impaktormessungen

Bei Impaktormessungen zur Charakterisierung der Korngrößenverteilung von Stäuben kann über die Summe der Einzelfractionen auf die Gesamtstaubbelastung geschlossen werden. Wegen der großen Anzahl einzelner Absorberplatten für die Impaktorstufen (beispielsweise werden beim Kálmán Impaktor 7 Quarzfaserplatten inkl. Endfilter verwendet) und wegen der vielen Einzelschritte bei deren Vor- und Nachbehandlung (2 x Trocknen, 2 x Abkühlen im Exsikkator, 2 x Wiegen) ist hierbei allerdings mit einem größeren Messfehler zu rechnen, als bei der direkten Gesamtstaubbestimmung mittels Planfilter gemäß VDI Richtlinie 2066. Einen Vergleich dieser beiden Vorgehensweisen zeigt Abbildung 25. Im Durchschnitt liegt das Ergebnis bei der Summe der Impaktorstufen um ca. 12 % niedriger als bei der Planfiltermethode (Referenzmessung). Der Mittelwert der Beträge aller Abweichungen (ohne Vorzeichen) liegt dagegen bei 16 %.

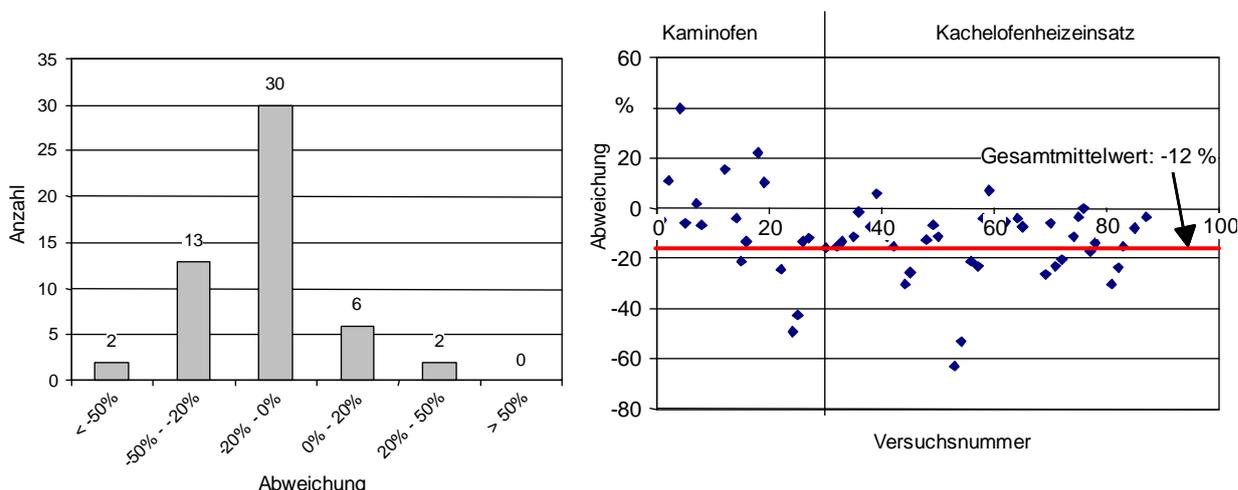


Abbildung 25: Gesamtstaubbestimmung mittels Summe der Impaktorstufen (Kálmán KS220) verglichen mit der direkten Gesamtstaubbestimmung mit Planfilter gemäß VDI Richtlinie 2066 (Referenzmessung). Häufigkeit von Mehr- bzw. Minderbefunden der Impaktormessung gegenüber der Planfiltermethode bei insgesamt 53 Vergleichsmessungen (links) und Darstellung aller Einzelabweichungen (rechts). Alle Messungen im verdünnten Abgas. Die Referenzmessungen stellen Mittelwerte aus jeweils zwei parallel durchgeführten Planfiltermessungen dar (zum Messaufbau vgl. Abbildung 21)

Aus den Messergebnissen in Abbildung 25 lässt sich die Forderung ableiten, dass bei Impaktormessungen die korngößenspezifische Partikelemission (z. B. PM_{10} -Angabe) dadurch bestimmt wird, dass die gemessene Korngrößenverteilung auf eine parallel durchzuführende Gesamtstaubbestimmung bezogen wird. Die Zuverlässigkeit einer solchen Staubbemessung ist deutlich höher als bei Berechnung der Impaktorstufensumme. Diese Vorgehensweise, die auch in VDI-Richtlinie 2066 Teil 5 [14] ausdrücklich empfohlen und hier eingesetzt wurde, wird somit bestätigt.

Allerdings sind auch bei der Planfiltermethode systematische Abweichungen zweier parallel durchgeführter Messungen möglich. Das Ergebnis einer solchen Überprüfungsmessung (bei identischer messtechnischer Vorgehensweise und Ausrüstung) in insgesamt 87 Parallelmessungen zeigt Abbildung 26. Demnach war die über alle Vergleichsmessungen gemittelte Staubmenge an der zweiten (unteren) Probenahme-position um 4 % niedriger als an ersten (oberen) Position (zum Versuchsaufbau vgl. Abbildung 21). Der Mittelwert der Beträge aller Abweichungen (ohne Vorzeichen) liegt hier bei 9 %.

Für die Unterschiede der Abweichungen bei den Messungen am Kaminofen verglichen mit den Kachelofenversuchen (Abbildung 26, rechts) lässt sich aus den Versuchsdatenaufzeichnungen keine plausible Erklärung ableiten.

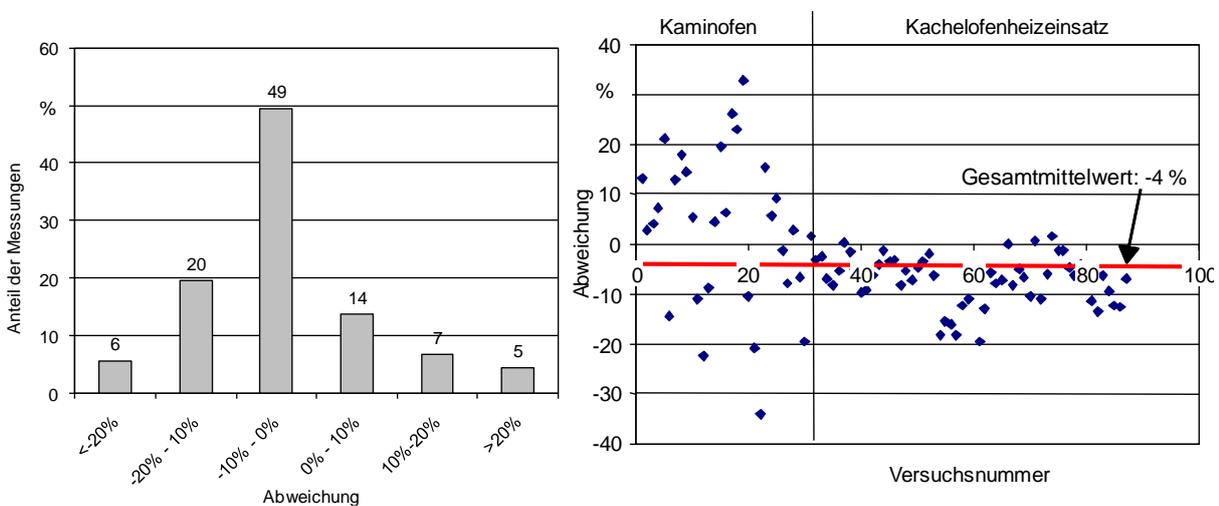


Abbildung 26: Vergleich zweier identischer Gesamtstaubmessungen bei hintereinander angeordneten Probenahmestellen im verdünnten Abgas: Häufigkeit von Mehr- bzw. Minderbefunden der zweiten (unteren) Probenahme-position verglichen mit der ersten Messposition (Referenzmessung oben) in insgesamt 87 Vergleichsmessungen (links) und Darstellung aller Einzelabweichungen (rechts). Halb-stündige Messungen mit Planfilter gemäß VDI-Richtlinie 2066

5 Ergebnisse der Einzelversuche

Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den Versuchen an den 6 untersuchten Feuerungsanlagen im Einzelnen vorgestellt, wobei die jeweiligen Versuchsvarianten und Einflussgrößen separat beschrieben werden. Ergebnisse zu den an einigen Feuerungen ebenfalls eingesetzten Sekundärmaßnahmen finden sich dagegen in Kapitel 6. Eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Feuerungsanlagen unter jeweils vergleichbaren "typischen" Messbedingungen erfolgt in Kapitel 7.

5.1 Messungen am Pelletkessel

Am Pelletkessel wurden der Einfluss der Heizlast und der Pelletqualität auf das Abgasverhalten untersucht. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

5.1.1 Lasteinfluss

Die bei unterschiedlicher Heizlast festgestellte Gesamtstaubemission lag zwischen 16 und 22 mg/Nm³ (Abbildung 27). Auf diesem für Holzfeuerungen vergleichsweise geringen Schadstoffniveau sind Schwankungen in Höhe von 5 mg/Nm³ nicht ungewöhnlich. Sie reflektieren die bei automatisch beschickten Biomassefeuerungen übliche Messwertstreuung, die sich aus der Genauigkeit der Messung und der gegebenen Wiederholbarkeit einer Anlagen- bzw. Versuchseinstellung ergibt. Entsprechend vorsichtig ist daher der hier bei kleinster Wärmeleistung beobachtete Staubabfall zu interpretieren.

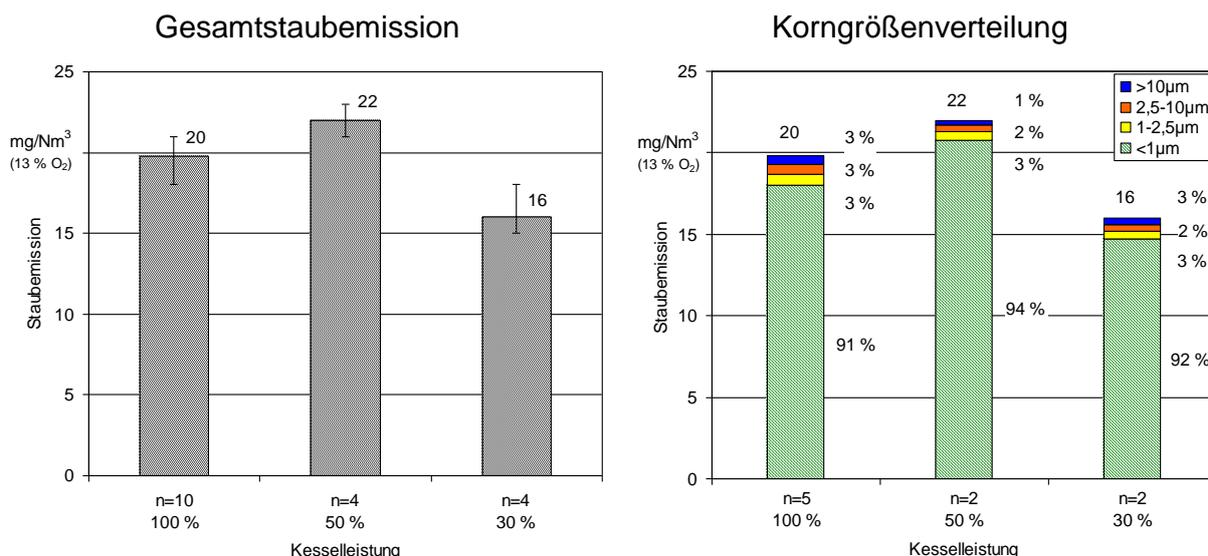


Abbildung 27: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Die Korngrößenverteilung zeigt sich erwartungsgemäß mit einem weitaus überwiegen- den Teilchenanteil bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von 1 μm . Mit jeweils 1 - 3 % liegen die gröberen Fraktionen auf einem vernachlässigbar niedrigen Niveau.

Die Ausbrandqualität nimmt im Teillastbereich etwas ab. Das zeigt sich an der CO-Emission, die von 23 mg/Nm^3 bei Nennlast auf 314 mg/Nm^3 bei 30 % der Nennwärmeleistung ansteigt (Tabelle 14). Der technische Wirkungsgrad liegt einheitlich bei 93 %.

Tabelle 14: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets

Kesselleistung	Kesselleis- tung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstech- nisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm^3)	NO _x (mg/Nm^3)	Ges.-C (mg/Nm^3)
100 %	27,0	93 %	11,4	23	189	n.b.
50 %	13,2	93 %	13,8	253	152	0,3
30 %	7,8	93 %	15,1	314	160	n.b.

5.1.2 Einfluss der Pelletqualität (Feingehalt)

Bei Verwendung unterschiedlicher Pelletqualitäten wird das Niveau des Gesamtstaubes, das sich bereits bei den unterschiedlichen Heizlasten gezeigt hatte, bestätigt (Abbildung 28). Hier ergibt sich sogar ein noch einheitlicheres Emissionsverhalten über die Versuchsvarianten. Die Anteile der gröberen Partikel (über 1 μm) sind hier nur leicht höher als bei den Versuchen mit Teillast. Auch hier fallen fast ausschließlich Staubkörngrößen im Submikronbereich an. Somit kann bei dieser Feuerung kein Einfluss des Feinmaterialgehaltes in den Pellets auf die Staubemissionen festgestellt werden.

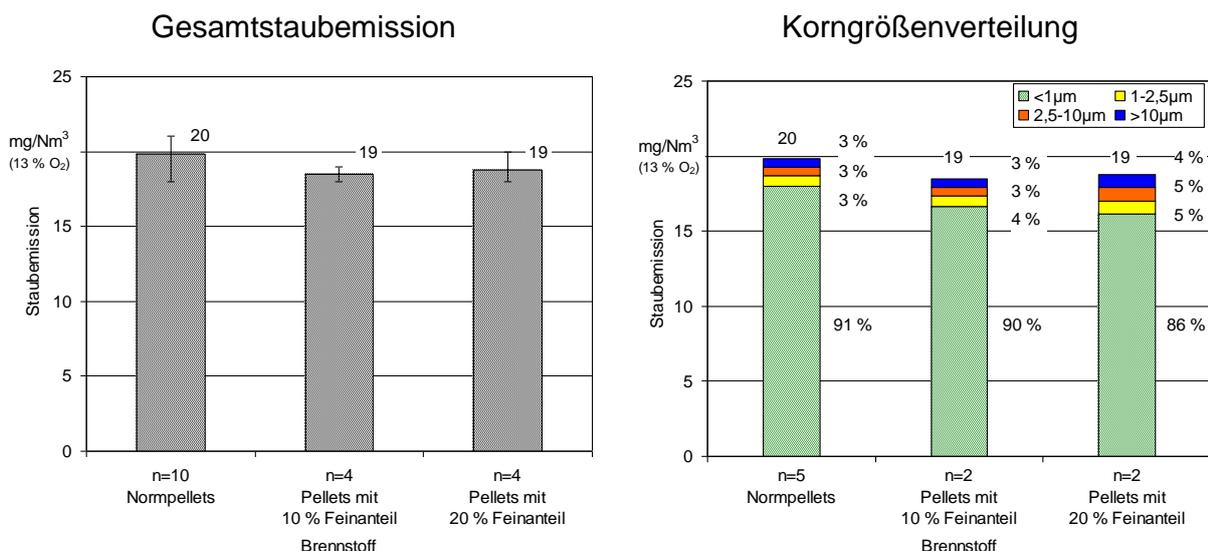


Abbildung 28: Staub-Gesamtgehalt und -Korngrößenverteilung beim Einsatz unterschiedlicher Pelletqualitäten. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets mit < 0,5 % / 10 % / 20 % Feinanteil bei 3,15 mm Siebdurchmesser (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Lediglich bei den Kohlenmonoxidemissionen zeigt sich ein leichter Anstieg von 23 mg/Nm³ auf 58 mg/Nm³ bei 20 % Feinanteil. Diese und die übrigen Ergebnisse zu den Schadstoffemissionen sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Hier ergibt sich ein feuerungstechnischer Wirkungsgrad mit Werten um ca. 93 %. Die Stickstoffoxidwerte sind weitgehend abhängig vom Stickstoffgehalt im Brennstoff und unterliegen daher nur geringen Schwankungen.

Tabelle 15: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Pelletqualitäten. Feuerung: Easyfire USP 25 (KWB). Brennstoff: Holzpellets mit < 0,5 % / 10 % / 20 % Feinanteil

Brennstoff	Kesselleistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Normpellets	27,0	93 %	11,4	23	189	n.b.
Pellets mit 10 % Feinanteil	28,3	94 %	10,6	33	194	n.b.
Pellets mit 20 % Feinanteil	28,0	94 %	10,4	58	196	n.b.

5.2 Messungen am Holzhackschnitzelkessel

Am Hackschnitzelkessel wurden vor allem die Einflussgrößen Heizlast, Brennstoffart bzw. Aschegehalt, die Verunreinigungen mit Sägemehl (Feingehalt) und der Brennstoffwassergehalt untersucht. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

5.2.1 Lasteinfluss

Die bei unterschiedlicher Heizlast festgestellte Gesamtstaubemission lag zwischen 28 und 97 mg/Nm³ (Abbildung 29). Diese große Bandbreite ist bei Hackschnitzelfeuerungen als eher ungewöhnlich einzustufen. Der Anstieg zwischen Nennwärmeleistung und kleinster Wärmeleistung ist möglicherweise auf einen erhöhten Anteil unverbrannter Bestandteile im Abgas zurückzuführen. Darauf deutet auch der bei Teillast und kleinster Wärmeleistung eingetretene Anstieg der Kohlenmonoxidemission hin (vgl. hierzu Tabelle 16). Ein Anstieg in dieser Größenordnung war vor allem deshalb nicht erwartet worden, da die dem TFZ vorliegende Messung zur Typenprüfungen hierzu keine auffälligen Werte ergeben hatten.

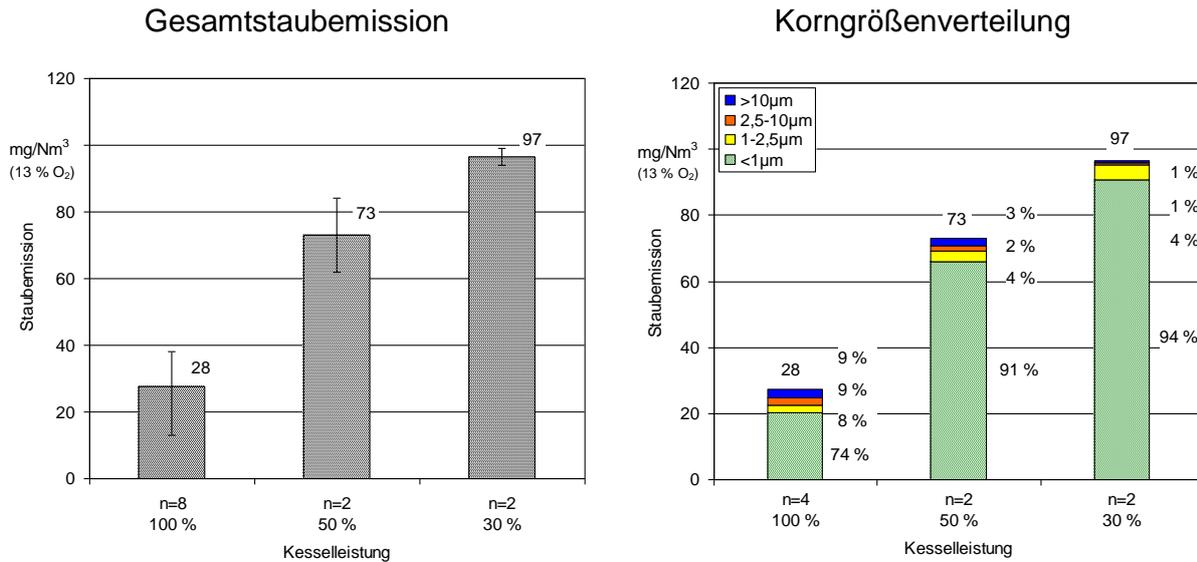


Abbildung 29: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Bei den Korngrößenverteilungen zeigt sich auch hier, dass die Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser bis $1\ \mu\text{m}$ deutlich überwiegen. Das gilt zumindest bei den höheren Gesamtstaubemissionen (Teillast und kleinste Wärmeleistung). Bei Nennwärmeleistung ist der Anteil größerer Partikel ($> 1\ \mu\text{m}$) mit insgesamt 26 % gegenüber den übrigen Varianten (6 bzw. 9 %) leicht erhöht.

Tabelle 16: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel

Kesselleistung	Kesselleistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei $20\ \text{°C}$	O_2 (%)	CO (mg/Nm^3)	NO_x (mg/Nm^3)	Ges.-C (mg/Nm^3)
100 %	51,5	94 %	8,0	142	177	4
50 %	25,9	94 %	10,0	1.330	129	34
30 %	14,1	95 %	13,1	1.268	122	42

5.2.2 Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt

Bei der Wirkung unterschiedlicher Rinden- bzw. den damit verbundenen Aschegehalten ist eine klare Tendenz feststellbar; das zeigt Abbildung 30. Die Entrindung von Fichtenstangen vor der anschließenden Hackschnitzelherstellung bewirkt eine Verringerung des Brennstoffaschegehaltes von 0,4 auf 0,2 %. Auf diesem relativ niedrigen Gesamtaschegehaltsniveau konnten jedoch noch keine nennenswerten Unterschiede in der Staub-

emission – weder beim Gesamtstaub noch bei den Korngrößenklassen – festgestellt werden. Erst die Verwendung von reiner Rinde, die auf ähnliche Korngrößen wie die Holzhackschnitzel zerkleinert worden war, steigerte den Aschegehalt im Brennstoff auf 4,9 % und führte somit bei der Verbrennung zu einer insgesamt etwa verdoppelten Gesamtstaubemission. Bei Buchenhackschnitzel (mit Rinde) ist dagegen wiederum ein immer noch sehr niedriges Aschegehaltsniveau gegeben, so dass auch hier der Gesamtstaubausstoß auf etwa dem gleichen Niveau wie bei den beiden Fichtenhackschnitzelbrennstoffen liegt. Bei den Hackschnitzelbrennstoffen liegt der Gehalt der Submikronpartikel (bis 1 µm) etwas niedriger als bei den Stäuben aus der Holzpelletverbrennung. Zwischen den Aschegehaltsvarianten konnten hierbei allerdings keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Der Anteil der Stäube unter 1 µm war bei der Variante mit Fichtenrinde und den Buchenhackschnitzeln nur leicht erhöht.

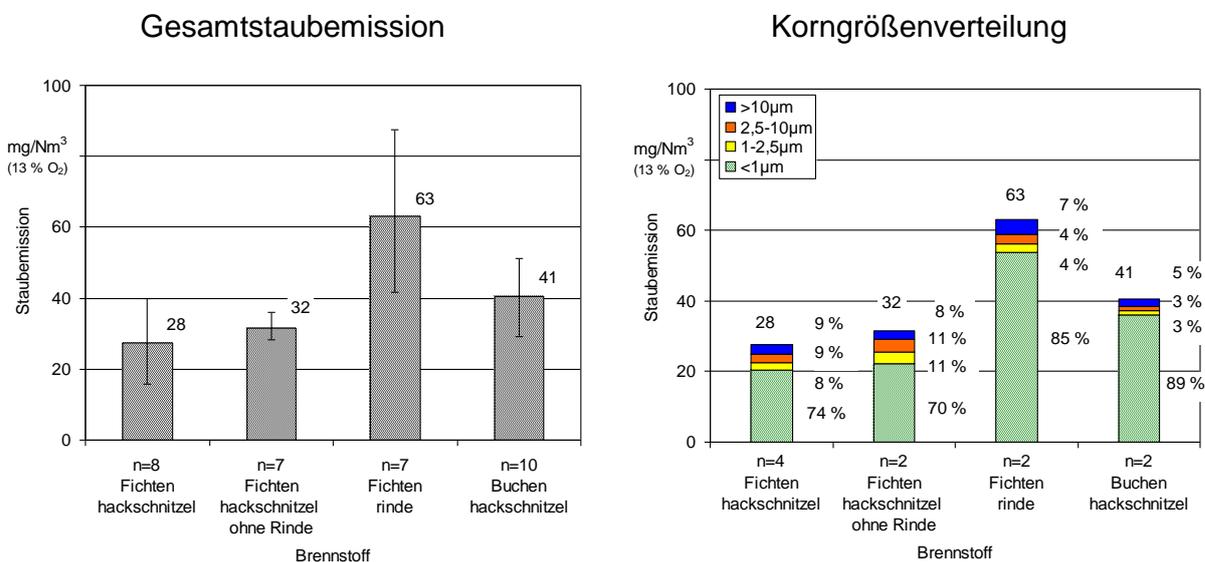


Abbildung 30: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffen. Feuerung: Compact 50 (HDG). Bei Fichtenhackschnitzel ohne Rinde, Fichtenrinde und Buchenhackschnitzel Messung im unverdünnten Abgas (n = Anzahl Messungen)

Die übrigen Schadstoffemissionen sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Es ergaben sich feuerungstechnische Wirkungsgrade von ca. 92 % und darüber. Bei den CO- und Ges.-C-Emissionen zeigt sich keine Abhängigkeit von der Brennstoffart bzw. der Variation des Aschegehalts (durch Rindengehalts- bzw. Holzartunterschiede). Die Stickoxidwerte sind hier dagegen weitgehend brennstoffabhängig. Die Verbrennung von reiner Rinde mit einem höheren Stickstoffgehalt (hier: 0,4 % gegenüber < 0,05 % in Fichtenhackschnitzeln) führte daher zu höheren Stickstoffoxidemissionen.

Tabelle 17: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffen und Aschegehalten. Feuerung: Compact 50 (HDG). Bei Fichtenhackschnitzeln ohne Rinde, Fichtenrinde und Buchenhackschnitzeln: Messung im unverdünnten Abgas

Brennstoffart (Aschegehalt)	Kessel- leistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstech- nisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Fichtenhackschnitzel (0,4 %)	51,5	94 %	8,0	142	177	4
Fichtenhackschnitzel ohne Rinde (0,2 %)	53,8	93 %	8,1	195	113	3
Fichtenrinde (4,9 %)	49,2	92 %	9,0	219	335	4
Buchenhackschnitzel (0,6 %)	51,4	92 %	8,9	124	196	2

5.2.3 Einfluss des Feingehalts

Je nach Qualität der Hackschnitzel kann der Anteil an feinen Holzteilchen oder Partikeln stark schwanken. Deshalb wurde anhand von Hackschnitzeln mit geringer Qualität untersucht, wie sich eine Windsichtung zum Abtrennen feiner Partikel auf die Emissionen bei der Verbrennung auswirkt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Maßnahme offenbar mit keinerlei Auswirkung auf die Gesamtstaubemissionen verbunden ist. Diese liegt im Mittel bei 42 mg/Nm³ (Abbildung 31, links). Ebenso verhält es sich bei der Korngrößenverteilung. Auch hier ist lediglich eine leichte Erhöhung des Anteils Submikronpartikel (bis 1 µm) von 85 % bei Hackschnitzeln mit Feinanteil auf 89 % bei Hackschnitzeln ohne Feinanteil erkennbar (Abbildung 31, rechts).

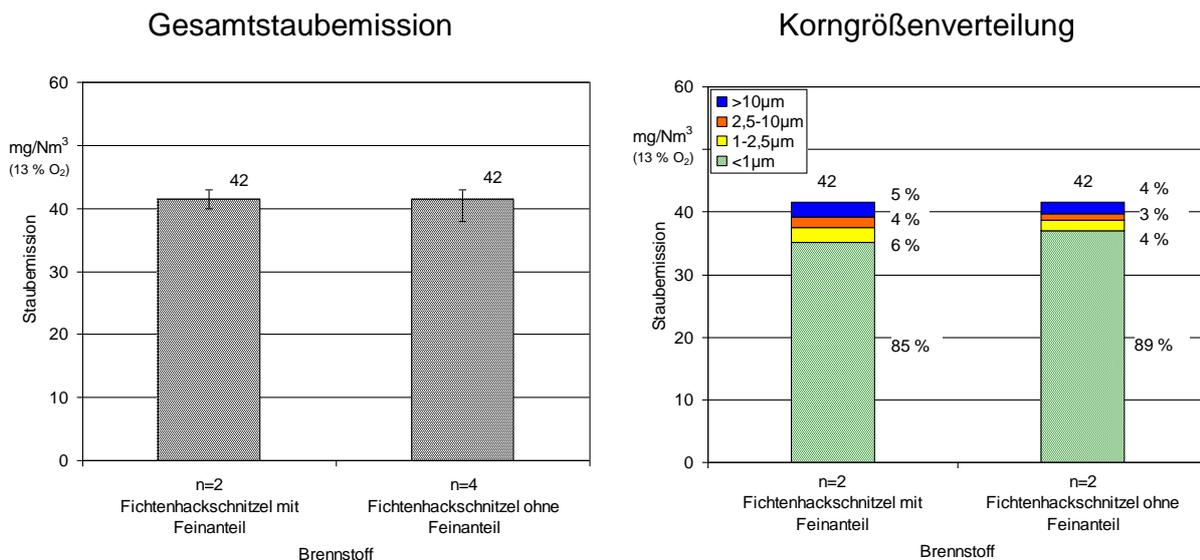


Abbildung 31: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Feinanteilen im Brennstoff (mit und ohne Windsichtung). Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Auch die gasförmigen Emissionen zeigen sich von der Abtrennung des Feinanteils im Brennstoff weitgehend unbeeinflusst (Tabelle 18).

Tabelle 18: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Feinanteilen im Brennstoff (mit und ohne Windsichtung). Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackgut (n = Anzahl der Messungen)

Brennstoffart	Kesselleistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Fichtenhackschnitzel mit Feinanteil	52,1	93 %	7,9	186	169	1
Fichtenhackschnitzel ohne Feinanteil	53,1	93 %	8,8	139	194	2

5.2.4 Einfluss des Brennstoffwassergehalts

Der Wassergehalt im Hackschnitzelbrennstoff wurde dreifach in einer Bandbreite von 22 bis 38 % abgestuft. Die Ergebnisse zur Staubemission sind in Abbildung 32 dargestellt.

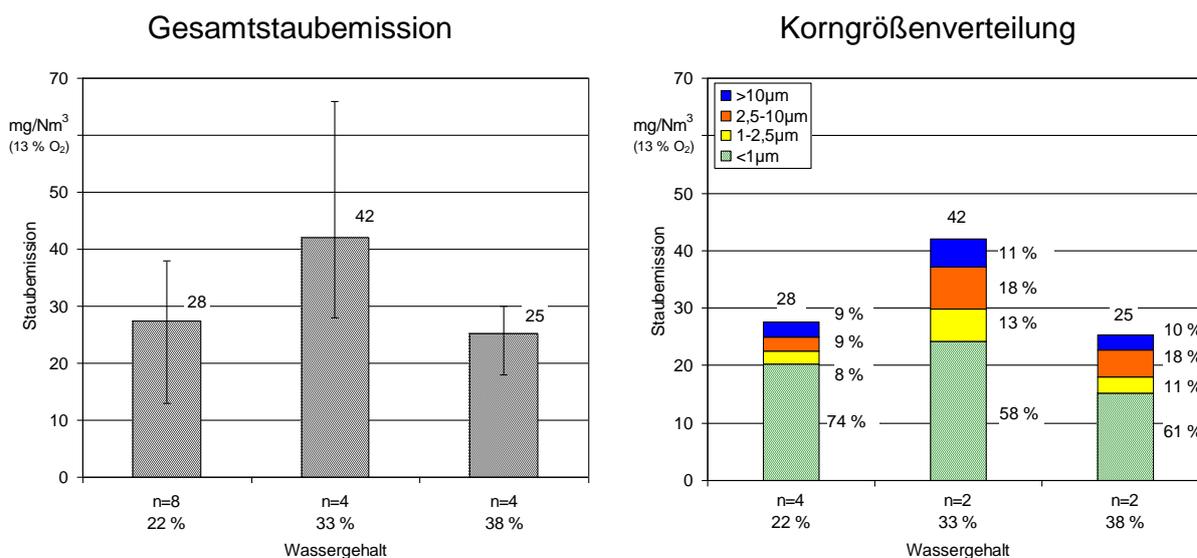


Abbildung 32: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel mit w = 22 % / 33 % / 38 % (n = Anzahl Messungen verdünnten Abgas)

Sie ergeben ein uneinheitliches Bild. Während die Gesamtstaubemission bei trockenem Brennstoff mit 29 mg/Nm³ besonders niedrig ist, kommt es bei mittlerem Brennstoffwassergehalt (33 %) zu einem Anstieg, der sich aber bei relativ hohem Wassergehalt (38 %) nicht weiter fortsetzt. Dieser späte Abfall ist vor dem Hintergrund bisheriger Messerfahrungen plausibel, zumindest zeigen frühere Forschungen am TFZ, dass sich innerhalb der zulässigen Bandbreite von Wassergehalten mit steigendem Brennstoffwassergehalt keine Staubzunahme ergibt, sondern in der Tendenz häufig sogar eine Staubminderung

eintritt [19] [20]. Für den Staubemissionssprung zwischen dem niedrigen und dem mittleren Wassergehalt bietet sich jedoch keine einfache Erklärung an. Von einem erhöhten Anteil unverbrannter Abgasbestandteile kann zumindest hier nicht ausgegangen werden, da die Kohlenmonoxidemission (CO) aber auch die organischen Kohlenstoffverbindungen (Ges.-C) nicht gleichzeitig erhöht waren (vgl. Tabelle 19). Die hohe Bandbreite der Staubmesswerte zeigt jedoch, dass – im Vergleich zur Pelletfeuerung – bei Hackschnitzeln mit teilweise inhomogenen Verbrennungsbedingungen gerechnet werden muss, so dass zwischen den einzelnen Halbstundenwerten größere Abweichungen möglich sind.

Bei der Korngrößenverteilung der anfallenden Stäube steigt mit zunehmendem Wassergehalt der Anteil der gröberen Korngrößenfraktion. Allerdings ist zwischen mittlerer und höherer Wassergehaltsstufe kein nennenswerter Unterschied erkennbar (Abbildung 32).

Tabelle 19: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Compact 50 (HDG). Brennstoff: Fichtenhackschnitzel mit $w = 22 \% / 33 \% / 38 \%$

Brennstoffwassergehalt	Kesselleistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Stufe 1 (22 %)	51,5	94 %	8,0	142	177	4
Stufe 2 (33 %)	59,6	92 %	7,8	126	215	1
Stufe 3 (38 %)	56,9	92 %	7,5	291	220	4

5.3 Messungen am Scheitholzessel

Am Scheitholzessel wurden vor allem der Einfluss der Heizlast, der Brennstoffart bzw. des Aschegehalts, der Brennstoffaufbereitung (z. B. Scheitgröße), des Brennstoffwassergehalts und der Zugbedingungen untersucht. Hinzu kommt eine Betrachtung einzelner Abbrandphasen einer Brennstoffcharge, wodurch eine generelle Charakterisierung des teilweise diskontinuierlichen Verbrennungsverlaufs eines Scheitholzessels erfolgen sollte. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

5.3.1 Charakterisierung der Abbrandphasen

Da bei Scheitholzesseln – anders als bei den automatisch beschickten Feuerungen – eine Brennstoffauflage über mehrere Stunden abbrennt und sich dabei die Verbrennungsbedingungen stark ändern, ergibt sich die Frage, ob bestimmte Phasen eines Abbrandes hinsichtlich der Staubemissionen als besonders problematisch einzustufen sind. Dazu wurde an zwei Versuchstagen zunächst jeweils eine halbe Brennstoffauflage zum „Vorheizen“ und anschließend eine komplette Scheitholzfüllung für einen vollständigen Abbrand über ca. 4 bis 5 Stunden verwendet. Die Staubmessung erfolgte am ersten Versuchstag in 20-Minuten-Intervallen, am zweiten Versuchstag in 15-Minuten-Intervallen. Somit konnte eine quasi kontinuierliche Staubmessung realisiert werden. Die

gasförmigen Komponenten wurden kontinuierlich gemessen und anschließend analog zu den Zeiträumen der Staubmessungen ausgewertet und als Mittelwerte ausgewiesen.

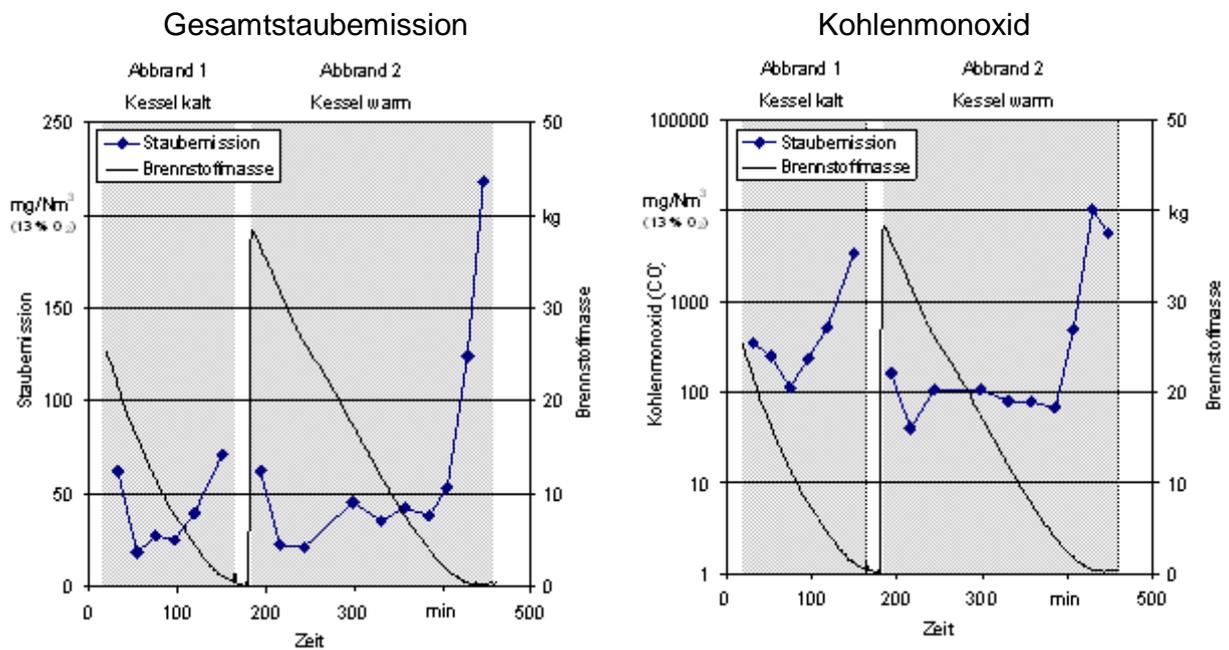


Abbildung 33: Versuch 1: Gesamtstaub- und CO -konzentration während zweier Abbrände. Jeder Messpunkt entspricht einem 20-Minuten-Mittelwert einer Messung im verdünnten Abgas. Abbrand 1: halbe Kesselfüllung, Kessel kalt; Abbrand 2: volle Kesselfüllung, vorgeheizt. Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000. (Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm)

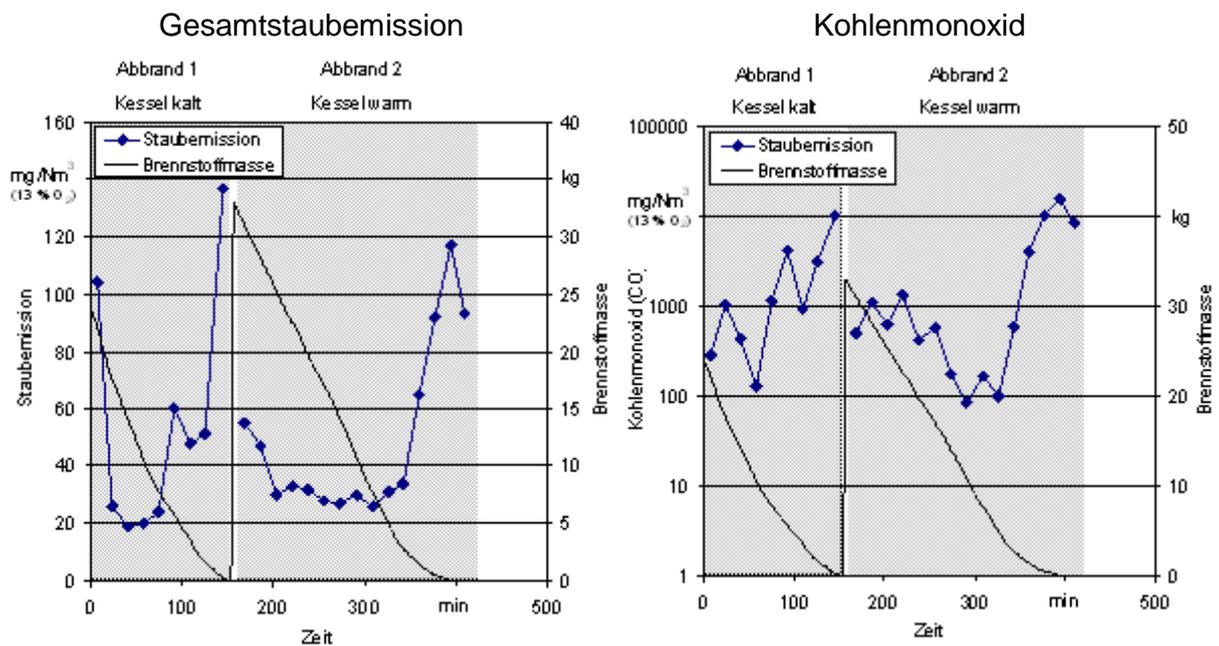


Abbildung 34: Versuch 2: Gesamtstaub- und CO -konzentration während zweier Abbrände. Jeder Messpunkt entspricht einem 15-Minuten-Mittelwert einer Messung im verdünnten Abgas. Abbrand 1: halbe Kesselfüllung, Kessel kalt; Abbrand 2: volle Kesselfüllung, vorgeheizt. Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling). (Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm)

Die Ergebnisse aus beiden Versuchen zeigen deutlich, dass die Staubemissionen nach einer Startphase von ca. 20 Minuten über einen längeren Zeitraum nahezu konstant bleiben (Abbildung 33, Abbildung 34). Erst am Ende des Abbrands, wenn die Brennstoffauflage fast komplett aufgebraucht ist, steigen die Staubemissionen wieder an. Sobald der Kessel die eigenen Gebläse abschaltet (bei 18 % Restsauerstoffgehalt im Abgas) kann es wieder zu einem leichten Absinken der Staubkonzentration kommen (Abbildung 34, links). So können teilweise Maximalwerte von über 200 mg/Nm^3 Staub erreicht werden, allerdings nur über einen relativ kurzen Zeitraum.

Die Angabe der Messwerte erfolgt in mg/Nm^3 , da aus messtechnischen Gründen (geringer Abgasvolumenstrom in umsatzschwachen Phasen) eine Bestimmung tatsächlicher spezifischer Staubfrachten (d. h. in mg/MJ oder g/h) nicht ausreichend genau möglich ist. Die tatsächliche Staubemission in g/h wäre gegen Ende des Abbrandes wegen des nur noch geringen Stoffumsatzes im Glutbett im Verhältnis etwas niedriger, als es die Messwerte in mg/Nm^3 widerspiegeln.

Während der Hauptabbrandphase sind die Staubemissionen relativ konstant und bewegen sich zwischen 20 und 30 mg/Nm^3 , solange kein Hohlbrand auftritt. Ein solcher (schwach ausgeprägter) Hohlbrand ist in Versuch 2 im zweiten Abbrand am Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration erkennbar. Während in Versuch 1 nach einer kurzen Startphase über lange Zeit nur ca. 100 mg/Nm^3 CO emittiert wird, sind es an Messtag 2 zunächst fast 1000 mg/Nm^3 , anschließend wird allerdings wieder das Niveau von Versuch 1 erreicht. Ähnlich wie beim Staub wächst die Kohlenmonoxidkonzentration zum Ende des Abbrands wieder stark an, um nach dem selbsttätigen Abschalten des Gebläse wieder zu sinken (Abbildung 33, Abbildung 34).

Für die Durchführung repräsentativer Messungen zu den hier vorgesehenen Versuchsfragen bedeuten diese Ergebnisse eine extreme Unsicherheit für die Messwerte, da beispielsweise ein Hohlbrand große Schwankungen verursachen kann, durch die die eigentliche Beobachtung überlagert sein könnte. Als Konsequenz wurden daher die Messungen ausschließlich in einer Phase von ca. 30 Minuten nach der zweiten Brennstoffauflage (d. h. in Abbrand 2) durchgeführt; hier waren meist relativ konstante und ungestörte Verbrennungsbedingungen gegeben.

5.3.2 Lasteinfluss

Auch bei modernen Scheitholzesseln wird versucht, Teillastbetriebszustände durch den Einbau eines Pufferspeichers weitmöglichst zu vermeiden. Da aber der Teillastbetrieb dennoch zu den typischen Betriebsweisen eines Kessels zählt (z. B. bei geladenem Pufferspeicher) wurden auch hierzu Messungen vorgenommen. Die Absenkung der abgegebenen Kesselleistung erwies sich aber als schwierig. Da der Kessel offenbar die Gebläseleistung nicht weiter herunterregeln konnte, wurde oft die Kessel-Solltemperatur überschritten. Folglich kam es zu einem modulierenden Ein/Aus-Betrieb. Lediglich eine Drosselung auf 70 % der normalen Kesselleistung ließ sich problemlos dauerhaft einstellen, ohne dass es zu einem selbsttätigen Ein- und Ausschalten kam.

In einem solchen Teillastbetrieb sinkt die Staubemission von durchschnittlich 33 auf 19 mg/Nm³. Ein Grund könnte die verringerte Gebläseleistung sein. Dadurch werden vermutlich weniger Partikel aus dem Aschebett ins Abgas mitgerissen. Allerdings darf der gemessene Unterschied angesichts der in Abbildung 35 dargestellten hohen Schwankungsbreite der Messwerte nicht überbewertet werden, zumal bei den übrigen untersuchten Zentralheizungsanlagen keine Verbesserungen im Teillastbetrieb festgestellt worden waren (vgl. Kapitel 5.1.1 und 5.2.1). Die Korngrößenverteilung des Staubes ändert sich kaum; der Anteil der Submikronpartikel (bis 1 µm) liegt bei voller wie auch bei gedrosselter Kesselleistung einheitlich bei ca. 60 %. Eine leichte Verschlechterung der Ausbrandqualität ist aber an den höheren CO-Emissionen im Teillastbereich feststellbar (vgl. Tabelle 20).

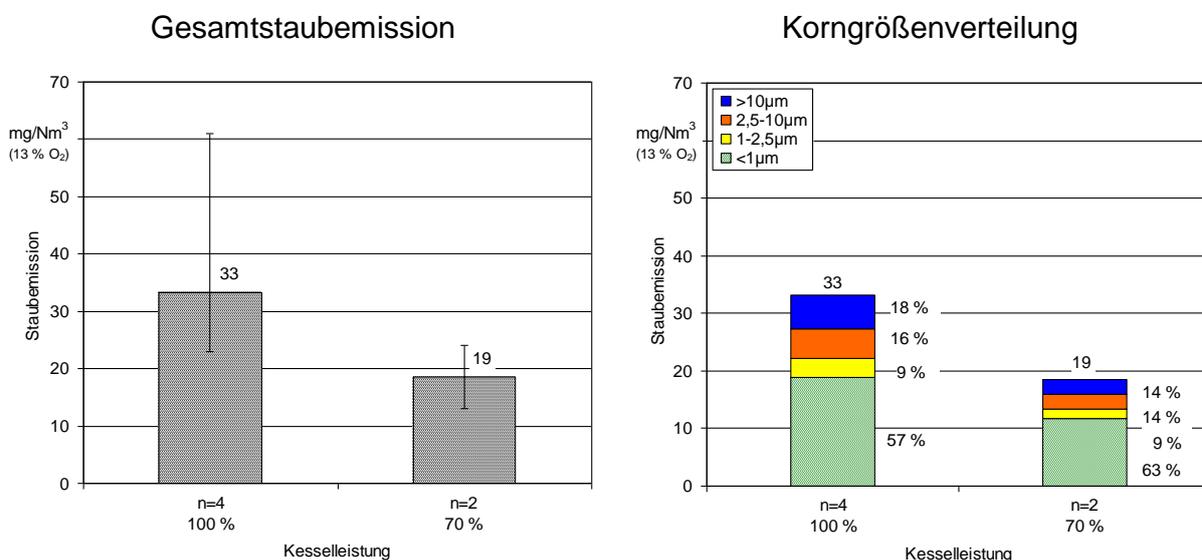


Abbildung 35: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Tabelle 20: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm

Kesselleistung	Kesselleistung ^a (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
100 %	37,5	88 %	10,8	710	120	n.b.
70 %	24,1	89 %	12,2	1.056	120	n.b.

^a Kesselleistung und Wirkungsgrad beziehen sich auf den Messzeitraum, nicht auf den gesamten Abbrand

Um einen modulierenden Betrieb und damit eine extreme Verschlechterung der Emissionen zu vermeiden, bleibt der Einsatz eines Pufferspeichers mit Scheitholzkesseln auch mit Blick auf die hier vorgestellten Ergebnisse unverzichtbar, zumal die Drosselung der Leistung, wie gezeigt, schwierig sein kann und kleinere Leistungen als 50 % der Nennwärmeleistung bei Scheitholzkesseln ohnehin nicht möglich sind.

5.3.3 Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt

Beim Scheitholzkessel kamen vier verschiedene Brennstoffarten (Fichte mit und ohne Rinde, Birke und Buche) zum Einsatz. Die Staubemissionen liegen bei allen Brennstoffen etwa auf dem gleichen Niveau (ca. 20 – 25 mg/Nm³, vgl. Abbildung 36). Die Brennstoffvariante „Fichte“ zeigt etwas höhere Staubemissionen als die übrigen Brennstoffvarianten. Allerdings wird der angegebene Mittelwert von einem einzelnen Messwert stark beeinflusst; bei diesem Wert steht zu vermuten, dass er durch eine kurze Hohlbrandphase verursacht wurde. Ohne diesen Extremwert wäre ein Mittelwert um 25 mg/Nm³ erreicht worden.

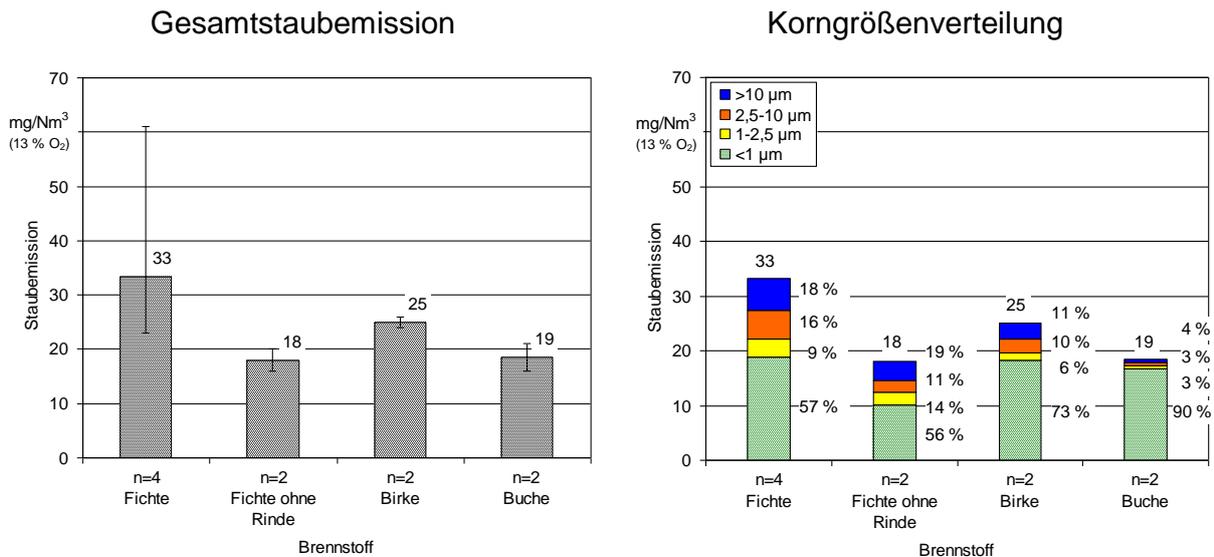


Abbildung 36: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichten-, Birken-, Buchenscheitholz und Fichtenscheitholz ohne Rinde, Scheitlänge 50 cm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Die Korngrößenverteilung des emittierten Staubes weist je nach Brennstoff größere Unterschiede als bei den übrigen Zentralheizungsanlagen auf. Während beim Fichtenscheitholz der Anteil der Submikronpartikel (bis 1 µm) bei ca. 57 % liegt, steigt er bei Birkenscheitholz auf 73 % und bei Buchenscheitholz auf 90 % an.

Die gasförmigen Schadstoffkomponenten liegen durchgehend in einem unproblematischen Bereich. Die Stickoxidemissionen sind wie zu erwarten bei Fichtenscheitholz ohne Rinde mit 83 mg/Nm^3 geringer als bei Fichtenscheitholz mit Rinde mit 120 mg/Nm^3 (Tabelle 21). Allerdings hatte die Analyse der Brennstoffe hierzu keine entsprechenden Unterschiede im Stickstoffgehalt ergeben (vgl. Tabelle 10, Kapitel 3.5).

Tabelle 21: Übersicht der Messwerte bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichten-, Birken-, Buchenscheitholz und Fichtenscheitholz ohne Rinde, Scheitlänge 50 cm

Brennstoffaufbereitung	Kesselleistung (kW) ^a	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20°C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Fichtenscheitholz	37,5	88 %	10,8	710	120	n.b.
Fichtenscheitholz ohne Rinde	39,6	88 %	8,4	50	83	5
Birkenscheitholz	39,9	88 %	8,2	78	151	n.b.
Buchenscheitholz	41,2	89 %	8,1	104	199	19

^a Kesselleistung und Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum, nicht auf den gesamten Abbrand

Die Messergebnisse lassen nicht erkennen, dass einer der Brennstoffe generelle Vorteile bietet. Allerdings zeigt die Messpraxis, dass Hartholz weniger zum Hohlbrand neigt als Weichholz. Das liegt zum einen an der glatteren Oberfläche aber auch an der höheren Dichte, die zu einer höheren Auflagelast führt. Außerdem sind die Holzfasern des dichten Laubholzes meist kürzer als die des üblichen Nadelholzes, wodurch das Kohlenstoffgerüst eines entgasten Scheites weniger bruchstabil ist. Unter diesem Gesichtspunkt können die Harthölzer Buche und Birke wegen ihres gleichmäßigeren Nachrutschens im Brennstoffschacht über einen längeren Betrachtungszeitraum auch mit einem tendenziell geringeren Schadstoffausstoß verbunden sein.

5.3.4 Einfluss der Brennstoffaufbereitung

Die Bandbreite der verwendeten Brennstoffe wird beim Scheitholz nicht nur durch die Brennstoffart sondern auch durch die Brennstoffaufbereitung bestimmt. Um die verschiedenen Arten der Brennstoffaufbereitung darzustellen, wurden fünf verschiedene Brennstoffformen vorbereitet, deren physikalische Eigenschaften (z. B. Scheitmaße und Gewichte) in Kapitel 3.5 beschrieben sind. In allen Varianten liegen die Staubemissionen zwischen 20 und 33 mg/Nm^3 (Abbildung 37). Als Begründung für den erhöhten Messwert bei normalem Fichtenscheitholz lässt sich die bereits in Kapitel 5.3.3 angeführte Ursache heranziehen (kurze Hohlbrandphase bei einer der Wiederholungsmessungen). Unter Berücksichtigung dieses bei "normalen Scheiten" durch den einzelnen Wert verzerrten Ergebnisses schneiden die ungespaltenen Rundlinge im Vergleich am ungünstigsten ab.

Außerdem ist die Ausbrandqualität wesentlich schlechter, was an den hohen CO- und Gesamt-C-Messwerten ablesbar ist (Tabelle 22).

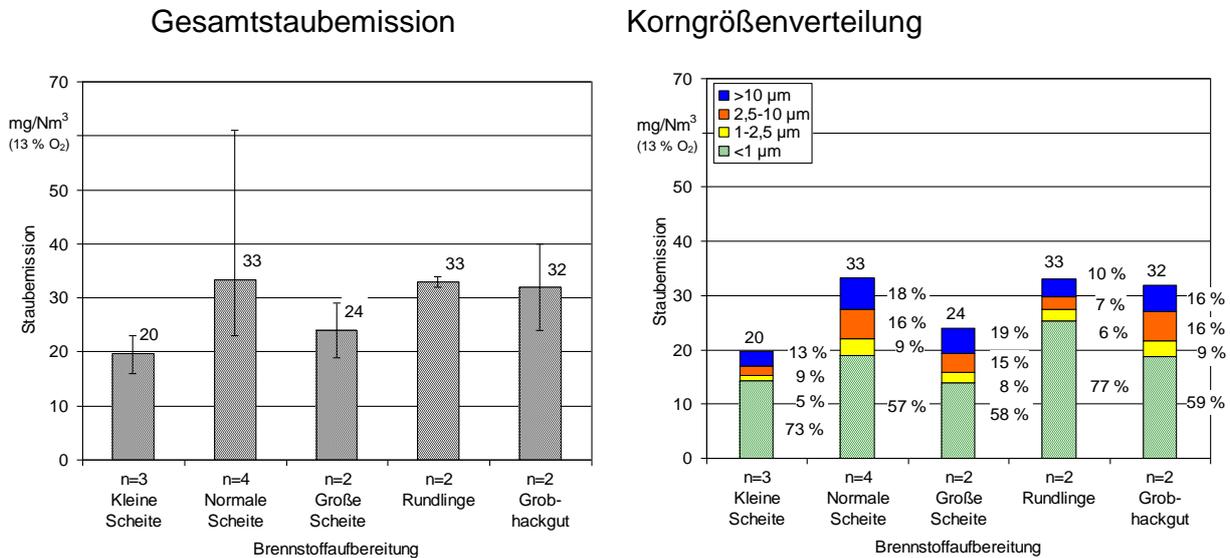


Abbildung 37: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Brennstoffaufbereitung als Scheite bzw. als Grobhackschnitzel. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenholz als normale / kleine / große Scheite, ungespalten als Rundling und gehackt (P63) (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Tabelle 22: Übersicht der Messwerte bei unterschiedlicher Brennstoffaufbereitung. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenholz als normale / kleine / große Scheite, ungespalten als Rundling und gehackt (P63)

Brennstoffaufbereitung	Kesselleistung (kW) ^a	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
normale Scheite	37,5	88 %	10,8	710	120	n.b.
kleine Scheite	43,6	88 %	8,0	47	142	3
große Scheite	37,9	88 %	9,5	209	124	4
Rundlinge	39,5	87 %	9,1	1035	111	458
Grobhackgut (w = 12 %)	39,1	89 %	7,8	87	177	12

^a Kesselleistung und Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum, nicht auf den gesamten Abbrand

Das Grobhackgut (Größenklasse P63 gemäß CEN/TS 14961 [21]) zeigt bei den meisten gasförmigen Schadstoffen und beim Staub relativ günstige Emissionswerte über den gesamten Abbrand. Nach einer kurzen Zündphase lagen die Messwerte außerdem auf einem sehr konstanten Niveau, im Gegensatz zu den Versuchen mit Scheitholz, bei denen größere Schwankungen während des Abbrands üblich waren. Als Grund hierfür kann gelten, dass der Brennstoff Grobhackgut kontinuierlich nachrutscht und keine grö-

ßeren Hohlräume über dem Glutbett entstehen können. Von Nachteil sind allerdings die kürzeren Nachlegeintervalle, da der Füllraum nicht vollständig genutzt werden kann. So ist beispielsweise bei Fichtenscheitholz eine Nachlegemenge von 30 bis 35 kg möglich, mit Grobhackgut beträgt die Füllraumbeladung jedoch maximal nur ca. 17 kg (bei 12 % Wassergehalt). Grund hierfür ist einerseits die geringere Dichte der Hackschnitzel, andererseits würde das Grobhackgut aus der Füllöffnung wieder herausfallen, wenn der Füllraum komplett gefüllt werden würde. Hinsichtlich der Korngrößenverteilung ergibt sich für Grobhackgut nahezu das gleiche Bild wie bei den unterschiedlichen Holzarten. Der Anteil der Submikronpartikel (bis 1 µm) beträgt durchweg 60 bis 70 % und liegt somit etwas niedriger als beim Pellet- oder Hackschnitzelkessel.

Außer bei den oben erwähnten Rundlingen sind keine Auffälligkeiten bei den Kohlenmonoxidemissionen erkennbar. Die Stickoxidemissionen liegen umso höher, je kleinstückiger der Brennstoff ist. Daher werden beim Einsatz von Grobhackgut im Scheitholzessel ähnliche Werte (ca. 180 mg/Nm³, vgl. Tabelle 22) erreicht wie beim Hackschnitzel- oder Pelletkessel.

Insgesamt kann aber festgehalten werden, dass der Kessel mit sämtlichen Aufbereitungsformen zurechtkommt, wobei das Holz aber nach Möglichkeit gespalten werden sollte, um ein rasches Zünden und eine gute Ausbrandqualität zu gewährleisten.

5.3.5 Einfluss des Brennstoffwassergehalts

Eine wichtige Bestimmungsgröße für die Verbrennungsqualität bei Biomassefeuerungen ist der Brennstoffwassergehalt. Die Messwerte in Abbildung 38 zeigen, dass es beim Scheitholzessel unbedingt erforderlich ist, trockenes Scheitholz mit einem Wassergehalt (w) von weniger als 20 % zu verwenden. Wird Scheitholz mit einem Wassergehalt von 23 % eingesetzt steigen die durchschnittlichen Staubemissionen auf 89 mg/Nm³ an, bei Scheitholz mit einem Wassergehalt von 31 % steigt der Wert sogar auf 414 mg/Nm³. Der Grund für den starken Anstieg schon ab $w=23$ % ist im Verbrennungsprinzip zu suchen. Durch den unteren Abbrand bleiben die Temperaturen im Füllraum relativ niedrig und das Holz, das sich nicht mit dem Glutbett im Kontakt befindet, wird während des Abbrands kaum vorgetrocknet, so dass immer wieder zu nasses Holz in die eigentliche Reaktionszone nachrutscht.

Anders verhält es sich beim Grobhackgut, das auch in 2 Wassergehaltstufen verwendet wurde. Hier sinkt der Gesamtstaubausstoß von 32 mg/Nm³ bei 12 % Wassergehalt auf 25 mg/Nm³ bei 23 % Wassergehalt. Grund hierfür ist der kleinstückigere Brennstoff, der schnell nachtrocknen kann sobald er in das Glutbett rutscht. Das Absinken der Staubemission bei höheren Wassergehalten konnte für Hackschnitzel bereits in früheren Projekten nachgewiesen werden [19] [20].

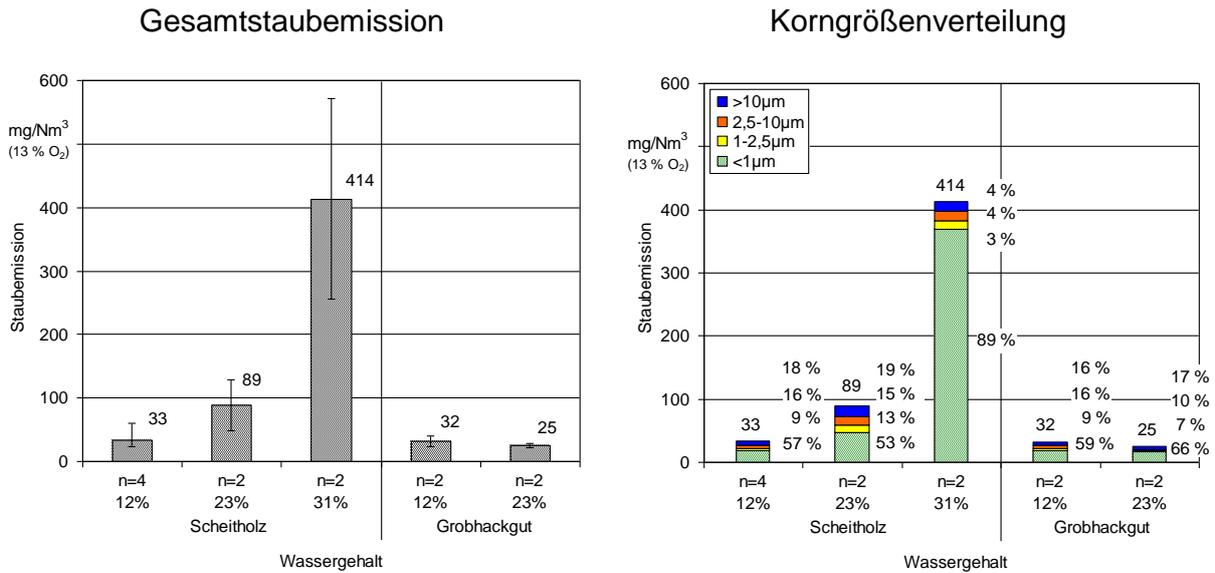


Abbildung 38: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten bei Scheitholz und Grobhackgut. Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm, Wassergehalt 12 % / 23 % / 31 % und Grobhackgut P63, Wassergehalt 12 % / 23 % (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Während beim Scheitholz in den Wassergehaltsstufen 12 % und 23 % der Anteil der Partikel kleiner als 1 µm bei ca. 57 % bzw. 53 % liegt, steigt er bei der höchsten verwendeten Wassergehaltsstufe (w=31 %) auf 89 % an. Hier spielt die Kondensation unverbrannter Kohlenwasserstoffe vermutlich eine wichtige Rolle. Deren Konzentration (Ges.-C) ist bei Verwendung von extrem nassem Holz sehr hoch (1.749 mg/Nm³ bei 33 % Wassergehalt, vgl. Tabelle 23). Die Kohlenwasserstoffe kondensieren im verdünnten Abgas aus und lagern sich zu sehr kleinen Staubpartikeln zusammen, was sich hauptsächlich in der Korngrößenklasse bis 1 µm aerodynamischem Durchmesser bemerkbar macht. Das Grobhackgut weist weitgehend dieselbe Korngrößenverteilung im Gesamtstaub auf wie das Scheitholz; so sind die Anteile der Submikronpartikel beim Grobhackgut 59 % (w = 12 %) bzw. 66 % (w = 23 %).

Tabelle 23: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten bei Scheitholz und Grobhackgut. Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm, Wassergehalt 12 % / 23 % / 31 % und Grobhackgut P63, Wassergehalt 12 % / 23 %

Brennstoffwassergehalt	Kesselleistung (kW) ^a	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Scheitholz Stufe 1 (12 %)	37,5	88 %	10,8	710	120	n.b.
Scheitholz Stufe 2 (23 %)	26,9	83 %	12,7	2.266	130	218
Scheitholz Stufe 3 (31 %)	13,6	71 %	16,1	8.800	228	1.749
Grobhackgut Stufe 1 (12 %)	39,1	89 %	7,8	87	177	12
Grobhackgut Stufe 2 (23 %)	39,5	88 %	7,9	68	186	0

^a Kesselleistung und Wirkungsgrad beziehen sich auf den Messzeitraum, nicht auf den gesamten Abbrand

Die schlechte Ausbrandqualität bei nassem Scheitholz spiegelt sich auch in den gasförmigen Emissionen wider. So steigt beispielsweise die Kohlenmonoxidkonzentration von 710 mg/Nm³ (12 % Wassergehalt) auf 8800 mg/Nm³ an (Tabelle 23). Der Grund ist unter anderem die wesentlich niedrigere Temperatur im Glutbett. Anstelle einer Verbrennung kann hier eher von einem langsamen Schwelen gesprochen werden. Beim Grobhackgut dagegen konnte keine Verschlechterung der Ausbrandqualität aufgrund des höheren Wassergehalts festgestellt werden.

5.3.6 Einfluss der Zugbedingungen

Bei der Installation einer Biomassefeuerung stellt sich die Frage, ob der Einbau einer Drosselklappe zur Begrenzung des Kaminzugs notwendig ist. Je nach Höhe und Durchmesser des Kamins und je nach Witterung kann der Kaminzug in einem Bereich von -10 Pa bis -50 Pa schwanken. Um festzustellen, ob ein Einfluss des Kaminzugs auf den Schadstoffausstoß besteht, wurde dieser in drei Stufen variiert (-10 Pa / -30 Pa / -50 Pa). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Staubemissionen mit dem Kaminzug ansteigen und zwar von 33 mg/Nm³ bei -10 Pa bis auf 45 mg/Nm³ bei -50 Pa (Abbildung 39). Als Grund hierfür ist möglicherweise die ansteigende Abgasgeschwindigkeit anzusehen, durch die Staubteilchen im Glutbett aufgewirbelt und mitgerissen werden bzw. durch die eine Sedimentation von Partikeln im Abgasverlauf vermindert wird.

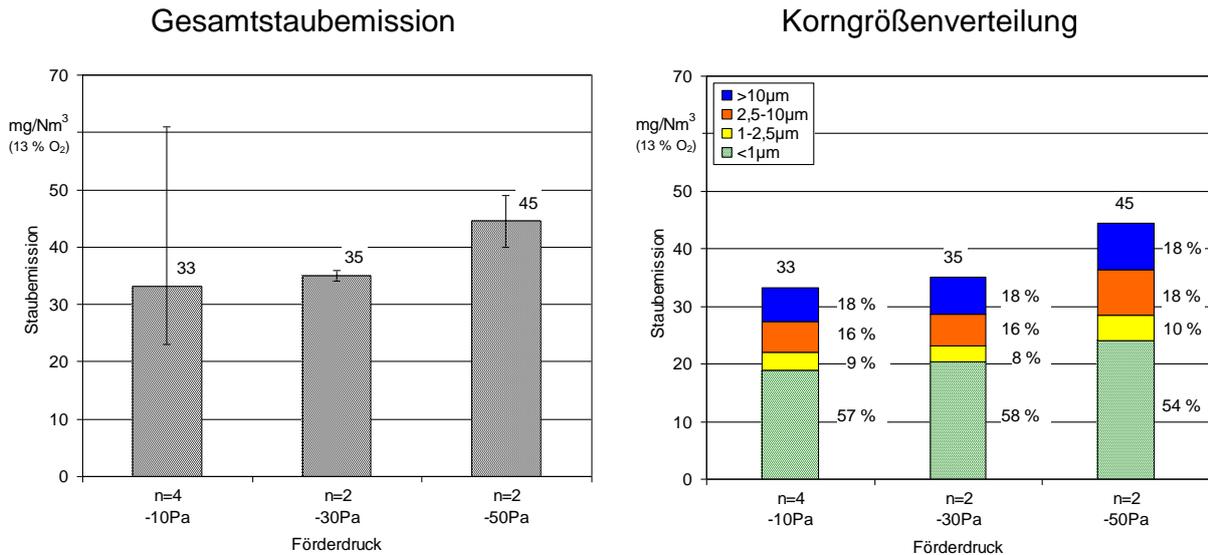


Abbildung 39: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Förderdrücken (-10 Pa / -30 Pa / -50 Pa). Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Bestätigt wird diese Vermutung auch durch die Betrachtung der Korngrößenverteilung im Staub. Während die absolute Konzentration der Submikronpartikel (bis 1 µm) über allen drei Varianten nahezu konstant bleibt, steigt die Konzentration der größeren Partikel (> 1 µm) an. Diese Mehrung deutet auf einen Austrag aus dem Aschebett hin.

Bei den Kohlenmonoxidemissionen wird kein Einfluss des Förderdrucks sichtbar, der Ausbrand ist bei höheren Förderdrücken genauso gut wie bei normalem Förderdruck (Tabelle 24).

Tabelle 24: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Förderdrücken (-10 Pa / -30 Pa / -50 Pa). Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling). Brennstoff: Fichtenscheitholz, Scheitlänge 50 cm

Förderdruck	Kesselleistung (kW) ^a	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
-10 Pa (normal)	37,5	88 %	10,8	710	120	n.b.
-30 Pa (erhöht)	38,9	87 %	9,6	186	107	3
-50 Pa (stark erhöht)	40,1	88 %	10,0	288	110	n.b.

^a Kesselleistung und Wirkungsgrad beziehen sich auf den Messzeitraum, nicht auf den gesamten Abbrand

5.4 Messungen am Heizölkessel

Die Messungen am Heizölkessel wurden durchgeführt, um die Ergebnisse aus den Versuchen an Holzfeuerungen mit den marktüblichen Techniken aus dem Bereich der fossilen Brennstoffnutzung vergleichen und einordnen zu können. Als Einflussgrößen wurden die Heizlast und der Schwefelgehalt im Brennstoff gewählt. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

5.4.1 Einfluss der Lastvariation

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die in Abbildung 40 dargestellten Ergebnisse nicht auf den bei Heizölfeuerungen üblichen Bezugssauerstoffgehalt von 3 % sondern auf 13 % O₂ bezogen. Der so dargestellte Gesamtstaubwert liegt mit 1,3 bis 1,6 mg/Nm³ um etwas mehr als eine Zehnerpotenz niedriger als beispielsweise bei Holzpelletfeuerungen.

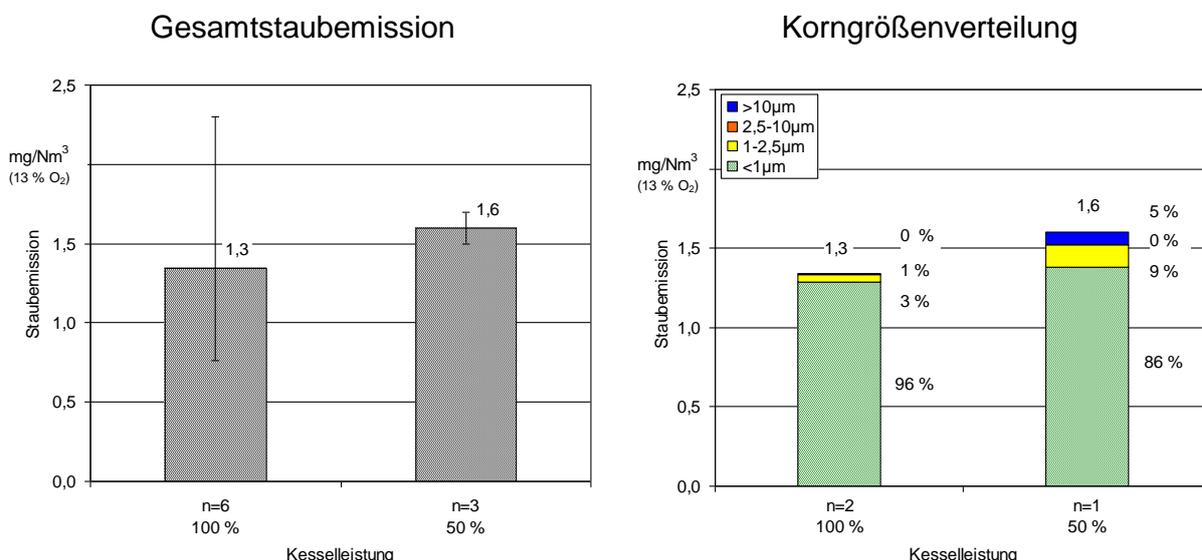


Abbildung 40: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Bei der Korngrößenverteilung der anfallenden Partikel zeigt sich ein bekanntes Bild: Ähnlich wie beispielsweise bei der Holzpelletfeuerungen liegt der Anteil der Submikronpartikel (bis 1 µm) auch hier bei ca. 90 %. Die übrigen Messgrößen sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Im Teillastbetrieb fallen die im Vergleich zur Nennwärmeleistung etwas höheren Werte bei CO und Ges.-C auf. Diese sind bedingt durch die An- und Abschaltvorgänge des Kessels, die wegen der praxisnah durchzuführenden Messung hier mit erfasst werden sollten.

Tabelle 25: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Kesselleistung. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL (n = Anzahl der Messungen)

Kesselleistung	Kesselleistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
100 %	21,2	94 %	4,3	4	58	0
50 %	10,4	93 %	12,2	8	63	4

5.4.2 Einfluss des Schwefelgehaltes

Die Gesamtstaubemissionen werden bei Verwendung von schwefelarmem Heizöl im Vergleich zum normalem Heizöl EL offenbar weiter reduziert (Abbildung 41, links), obgleich auf einem derartig niedrigen Emissionsniveau die Grenzen der Messgenauigkeit erreicht sind. Insgesamt emittiert der Heizölkessel mit ca. 1 mg/Nm³ sehr wenig Staub.

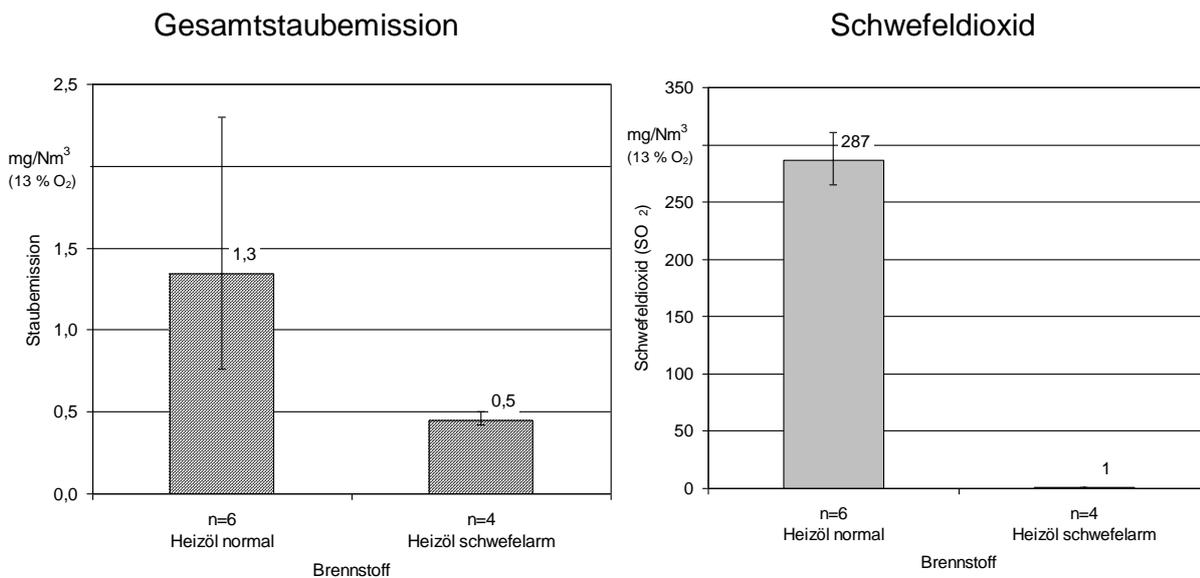


Abbildung 41: Gesamtstaubgehalt und Schwefeldioxidkonzentration bei unterschiedlichen Brennstoffen. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL bzw. Heizöl schwefelarm (n = Anzahl Messungen im verdünnten Abgas)

Wie erwartet ist aber ein wesentlicher Vorteil des schwefelarmen Heizöls bei den anfallenden Schwefeldioxidemissionen zu erkennen (Abbildung 41, rechts). Während mit dem normalen Heizöl noch Schwefeldioxidemissionen von 287 mg/Nm³ auftreten, konnte mit schwefelarmem Heizöl nahezu kein Schwefeldioxid im Abgas gemessen werden. Bei den übrigen gasförmigen Emissionen sind keine weiteren Auffälligkeiten gegeben (Tabelle 26).

Tabelle 26: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffen. Feuerung: Logano G125-21 BE ECO (Buderus). Brennstoff: Heizöl EL bzw. Heizöl schwefelarm

Brennstoff	Kesselleistung (kW)	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Heizöl normal	21,2	94 %	4,3	4	58	0
Heizöl schwefelarm	21,3	94 %	3,8	2	41	0

5.5 Messungen an einem Kachelofenheizeinsatz

Am Kachelofenheizeinsatz wurden eine Reihe brennstoff-, bedienungs- und standortbedingter Einflüsse untersucht. Hierzu zählen die Brennstoffart (Holzart, Rindengehalt, Briketts), die Aufbereitungsform (verschiedene Scheitgrößen), die Brennstoffauflagemenge, der Wassergehalt sowie die Zugbedingungen im Schornsteinsystem und weitere Anwendereinflüsse. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

Anders als bei den Zentralheizungskesseln werden hier zusätzlich zu den Messungen im verdünnten Abgas durchweg auch die Staubkonzentrationen im unverdünnten Abgas dargestellt. Diese Gegenüberstellung soll die quantitativen Auswirkungen der beiden unterschiedlichen Versuchsaufbauten offen legen. Insbesondere bei den Einzelfeuerstätten wie den Kachelöfen kommt es wegen der höheren Gehalte an organischen Verbindungen im Abgas zum Teil zu deutlichen Abweichungen. Der Anstieg der gemessenen Staubpartikelkonzentration durch die Verdünnung mit Frischluft ist auf die zunehmende Kondensation gasförmiger organischer Verbindungen infolge der Abgasabkühlung zurückzuführen. Neben messtechnischen Gründen (Erhöhung der Abgasgeschwindigkeit bei den kleinen Volumenströmen der Einzelfeuerstätten, vgl. Kapitel 3.1.1) zeichnet sich dieses Vorgehen auch dadurch aus, dass die Messungen unter ähnlicheren Bedingungen, wie beim Abgasaustritt an der Schornsteinmündung – d. h. praxisnäher – ablaufen. Die Staubbestimmung von Feuerungsanlagen im Rahmen von Typenprüfungen oder Zertifizierungsmessungen erfolgt in Deutschland jedoch ohne eine Abgasverdünnung. Zum Vergleich mit Richt- oder Grenzwerten sind daher diese Messungen heranzuziehen.

5.5.1 Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt

Die Variation der Brennstoffart (Buche, Birke, Fichte mit/ohne Rinde, Holzbriketts) führt lediglich dann zu größeren Wirkungen auf den Staubausstoß, wenn vom Scheitholz zu Holzbriketts gewechselt wird (Abbildung 42, oben links). Während beim Scheitholz im verdünnten Abgas die Staubmittelwerte bei 50 bis 60 mg/Nm³ liegen, treten beim Einsatz von Holzbriketts etwa dreifach höhere Staubemissionen auf. Ein schlechterer Ausbrand ist hierfür aber nicht als Ursache anzusehen, da die Holzbriketts bei den Kohlenmonoxid- und Gesamt-C-Emissionen günstiger liegen als beispielsweise das Fichtenscheitholz (Abbildung 42, unten). Auch am Flammenbild in der Feuerung konnten keine Hinweise auf ein schlechteres Staubemissionsniveau festgestellt werden. Jedoch war zu erken-

nen, dass die Holzbriketts im Brennraum während des Abbrands auf die doppelte Länge anwachsen und in einzelne Segmente zerfielen. Diese Beobachtung konnte bei den Scheithölzern nicht gemacht werden; dort verblieb bis zum Schluss ein stabiles Kohlenstoffgerüst im Brennraum. Beim Zerfallen der Holzbriketts werden offenbar immer wieder kleine Partikel frei, die dann im Abgasstrom mitgerissen werden können.

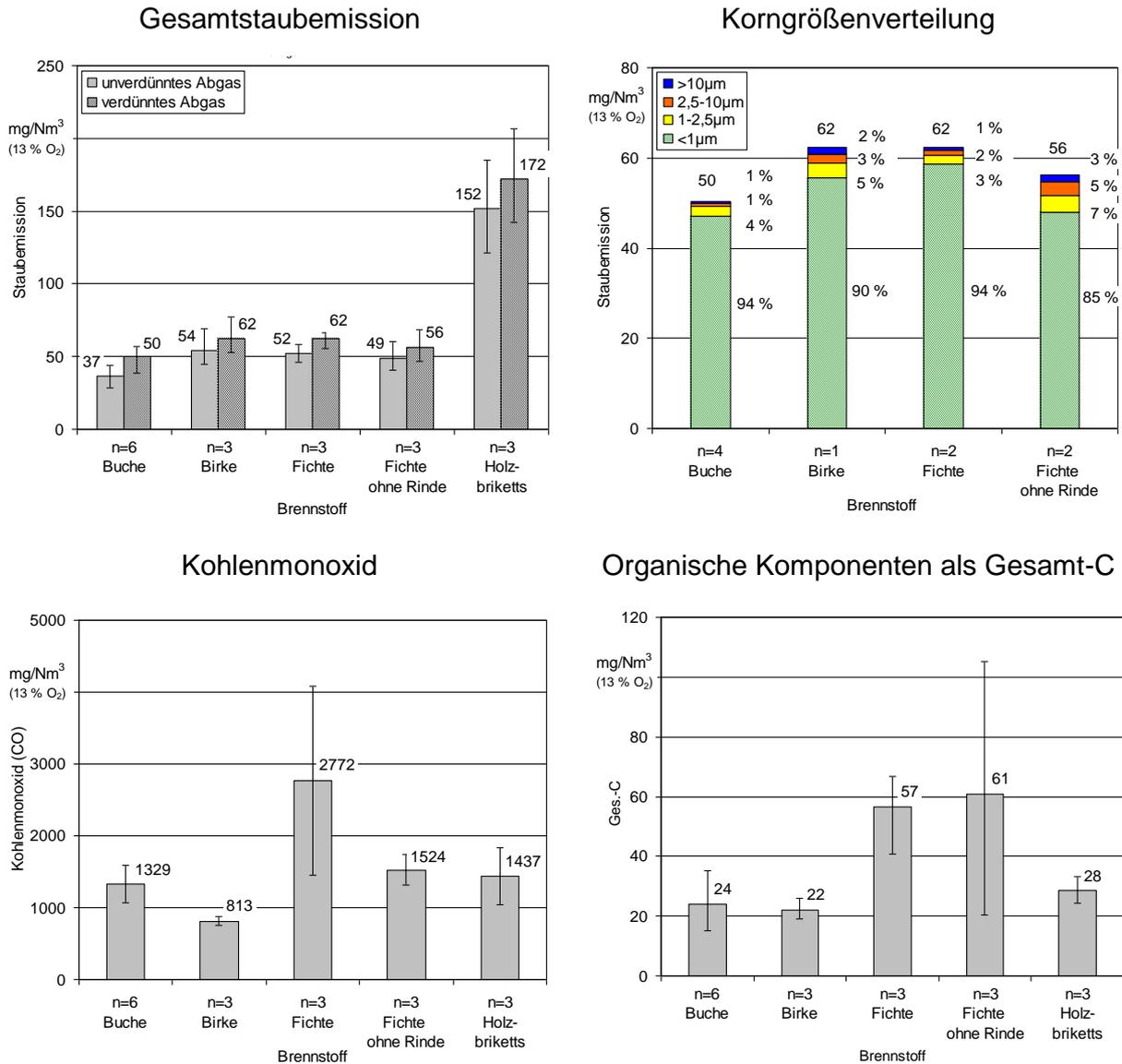


Abbildung 42: Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchen-, Birken-, Fichtenscheitholz, Fichtenscheitholz ohne Rinde und Holzbriketts, Scheitlänge 33 cm

Der Anteil der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 1 µm liegt auch hier wieder im Bereich zwischen 85 und 95 % (Abbildung 42, oben rechts). Somit befindet sich der überwiegende Teil der Partikel im potentiell gesundheitsschädlichsten Korngrößenbereich.

Die höchste Ausbrandqualität zeigt hier die Birke mit ca. 800 mg/Nm³ CO. Am ungünstigsten erscheinen die Messwerte mit Fichtenholz, wobei der hohe Mittelwert stark von einer einzelnen Messung mit extrem hohen CO-Werten beeinflusst ist (Abbildung 42, unten links). Die Harthölzer scheinen für diese Feuerung geringfügig besser geeignet zu sein; die Fichte war erwartungsgemäß etwas schlechter, was durch die ständigen kleinen „Explosionen“ im Scheit aufgrund von Harzeinschlüssen erklärbar ist. Insgesamt aber lagen die Emissionswerte – außer bei den Holzbriketts – auf nahezu gleichem Niveau. Holzbriketts können aber aufgrund dieser Messungen nicht grundsätzlich als nachteilig angesehen werden, da die Ausbrandqualität gut war und die hohen Staubemissionen eventuell bei anderer Formgebung auch wesentlich niedriger sein können. Bei den eingesetzten Briketts handelt es sich um zylindrische Presslinge mit Hohlraum (vgl. Kapitel 3.5, Abbildung 18).

Tabelle 27: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchen-, Birken-, Fichtenscheitholz, Fichtenscheitholz ohne Rinde und Holzbriketts, Scheitlänge 33 cm

Brennstoffart	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Buchenscheitholz	77 %	13,8	1.329	153	24
Birkenscheitholz	77 %	13,5	813	163	22
Fichtenscheitholz	73 %	14,3	2.772	125	57
Fichtenscheitholz ohne Rinde	73 %	14,5	524	94	61
Holzbriketts	72 %	15,8	1.437	127	28

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.5.2 Einfluss der Brennstoffaufbereitung

Um den Einfluss der Brennstoffaufbereitung, d. h. des Zerkleinerungsgrades, zu ermitteln, wurde die Scheitgröße verändert. Die Normalvariante entspricht vier Scheiten á 1,13 kg, bei der Variante „klein“ wurden 8 Scheite á 0,56 kg bei der Variante „groß“ 2 Scheite á 2,25 kg verwendet. Während sich bei der Staubkorngrößenverteilung mit einheitlich ca. 93 % Anteil der Submikronpartikelgrößen bis 1 µm keine Veränderungen ergeben (Abbildung 43, rechts), lassen die Gesamtstaubemissionen sichtbare Auswirkungen der Scheitgröße erkennen. Bis zu einer Scheitgröße von ca. 1,2 kg tritt noch keine größere Verschlechterung ein, allerdings ist deutlich feststellbar, dass die Variante mit den großen Scheiten á 2,25 kg zu fast 50 % höheren Staubemissionen im Vergleich zur Normalvariante führt, wenn die Messwerte aus dem verdünnten Abgas verglichen werden (Abbildung 43). Bei den Messungen im unverdünnten Abgas ist dieser Effekt noch deutlicher.

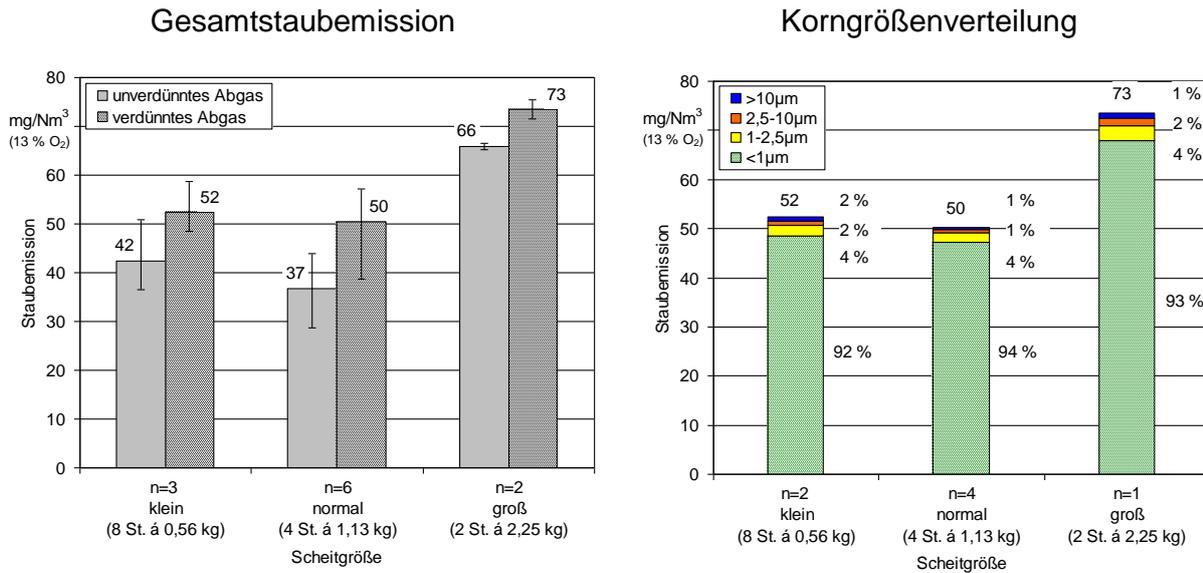


Abbildung 43: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg (n = Anzahl Messungen)

Auch die Ausbrandqualität – angezeigt durch die CO- und Ges.-C-Werte in Tabelle 28 – ist bei den großen Scheiten wesentlich schlechter, da die Feuerraumtemperatur aufgrund des ungünstigen Oberfläche-Volumenverhältnisses der großen Scheite wesentlich geringer ist als bei kleineren Scheiten.

Tabelle 28: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg

Scheitgröße	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
klein (8 St. á 0,56 kg)	76 %	13,1	1534	182	47
normal (4 St. á 1,13 kg)	77 %	13,8	1329	153	24
groß (2 St. á 2,25 kg)	69 %	16,3	3062	133	74

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

Generell ist somit festzuhalten, dass es außerordentlich wichtig ist, eine Obergrenze für die Einzelscheitmasse festzulegen. Im Fall des hier verwendeten Kachelofenheizeinsatzes ist die Scheitmasse indirekt begrenzt, indem eine Schwellentemperatur festgelegt wird, die ab dem Nachlegezeitpunkt in jeden Fall innerhalb einer gewissen Zeit überschritten werden muss. Geschieht dies nicht, kommt es zu einer Fehlermeldungsanzeige

an der Steuerung des Ofens. Da bei sehr großen Scheiten die Schwellentemperatur nur schwer erreicht wird, wird der Betreiber dieser Anlage auf die Fehlbedienung hingewiesen und kann derartige Betriebsweisen, d.h. das Verwenden zu großer Scheite, zukünftig vermeiden. Auch bei den durchgeführten Versuchen kam es häufig zu dieser Störungsmeldung, so dass oftmals Wiederholungsmessungen notwendig waren. Die Lenkungswirkung dieses Steuerungsprinzips hinsichtlich der Brennstoffauswahl kann somit als wirkungsvoll angesehen werden.

5.5.3 Einfluss der Auflagemenge

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor, insbesondere bei Einzelfeuerstätten, ist die aufgelegte Brennstoffmasse. Aus Komfortgründen wird in der Praxis oftmals zu viel Holz aufgelegt, um die Nachlegeintervalle zu verlängern. Für den hier untersuchten Kachelofenheizeinsatz wird eine Auflagemasse von drei bis sechs Kilogramm Holz empfohlen. Die Masse der Normalvariante (4,5 kg) wurde in den Versuchen einmal halbiert und einmal verdoppelt, indem die Scheitanzahl entsprechend verändert wurde.

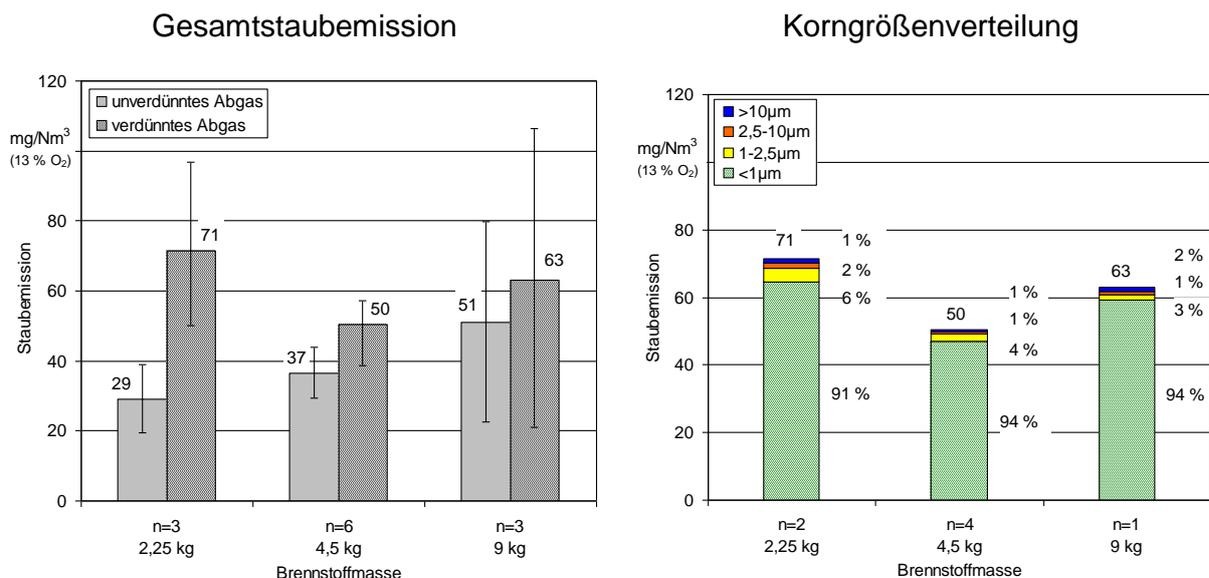


Abbildung 44: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 2,25 kg / 4,5 kg / 9 kg (n = Anzahl Messungen)

Die Ergebnisse in Abbildung 44 zeigen, dass die Einhaltung der Herstellervorgaben auch in diesem Punkt besonders wichtig ist. Die Gesamtstaubemission steigt bei einer zu hohen aber auch bei einer zu geringen Brennstoffauflagemenge im Mittel zwar nicht stark an, aber die erreichten Maximalwerte sind doch wesentlich höher als bei normaler Auflagemasse. Um also Gesamtstaubemissionen sicher auf konstant niedrigem Niveau und niedrige Kohlenmonoxidkonzentrationen zu gewährleisten (Abbildung 44 und Tabelle

29), sollte die hier gegebene Herstellervorgabe von drei bis sechs Kilogramm Brennstoff je Auflage unbedingt eingehalten werden. Durch die Anlagensteuerung wird auch hier zumindest der Variante mit zu wenig Brennstoff vorgebeugt, da – wie bei den zu großen Scheiten (vgl. Kapitel 5.5.2) – die erforderliche Schwellentemperatur nur schwer erreicht wird. Bei zu viel aufgelegtem Brennstoff erfolgt derzeit aber keine Rückmeldung an den Betreiber.

Wie bei allen bisherigen Varianten tragen die Partikel mit weniger als 1 µm aerodynamischem Durchmesser zu mehr als 90 % zum Gesamtstaub bei (Abbildung 44). Auch hier gilt daher, dass der besonders gesundheitsschädliche Feinstaubausstoß dann wirksam gemindert wird, wenn Maßnahmen zur Minderung des Gesamtstaubausstoßes getroffen werden.

Tabelle 29: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 2,25 kg / 4,5 kg / 9 kg

Brennstoffmasse	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
2,25 kg	71 %	17,2	1898	140	220
4,5 kg	77 %	13,8	1329	153	24
9 kg	78 %	10,3	2592	165	284

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.5.4 Einfluss des Brennstoffwassergehalts

Bei den Gesamtstaubemissionen zeigt sich kein signifikanter Einfluss durch den in vier Stufen (12 % / 18 % / 23 % / 30 %) veränderten Brennstoffwassergehalt. Das Staub-Optimum liegt bei dieser Feuerung offensichtlich bei einem Brennstoffwassergehalt von 18 %. Aber auch höhere Wassergehalte sind hinsichtlich der Gesamtstaubemissionen offenbar noch relativ unproblematisch (Abbildung 44 oben links).

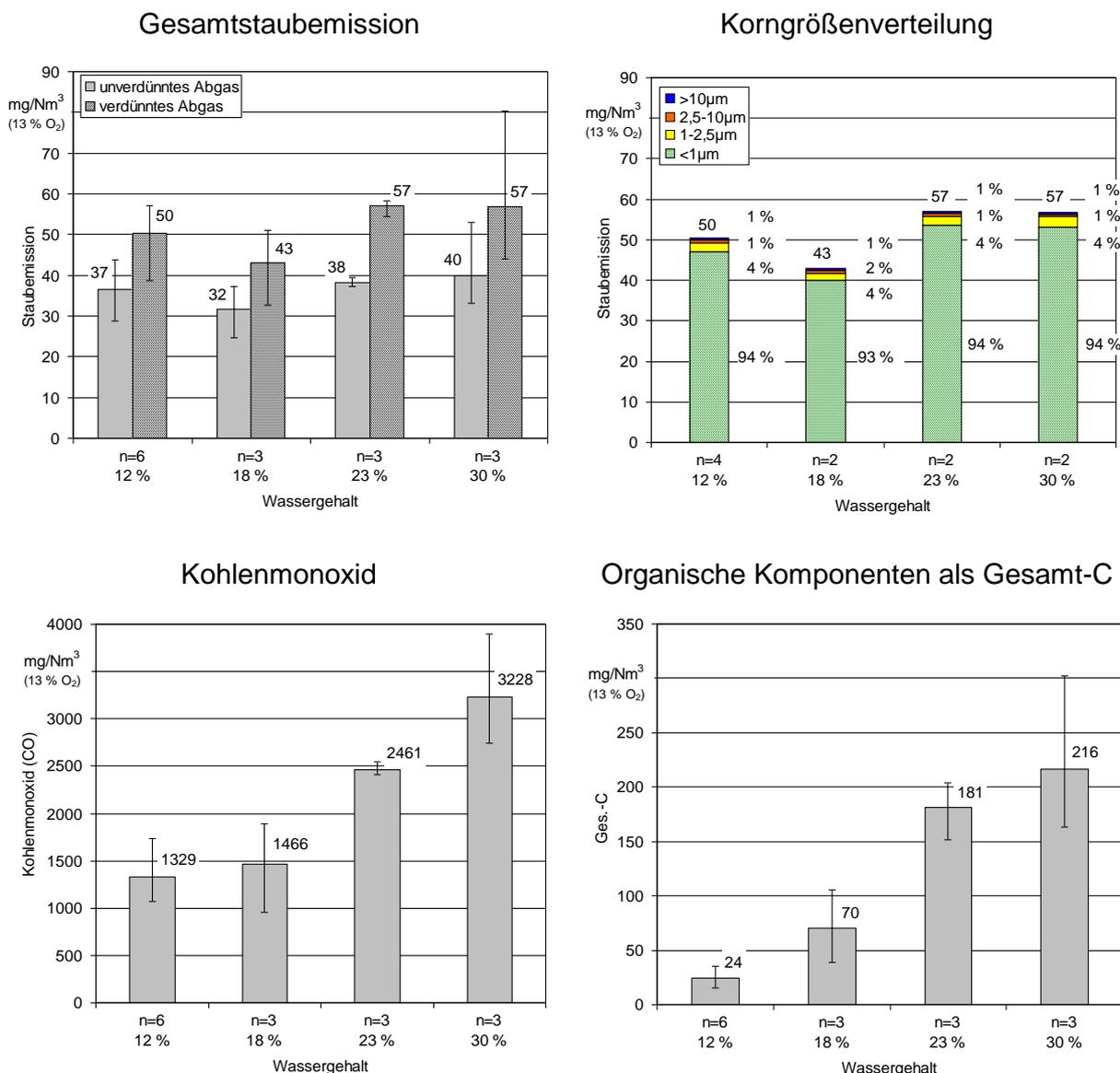


Abbildung 45: Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 18 % / 23 % / 30 % Wassergehalt. (n = Anzahl Messungen)

Der Anteil der Staubpartikel, die kleiner als 1 µm sind, macht auch hier über 90 % des Gesamtstaubs aus (Abbildung 45 oben rechts). Im Mittel liegen die Staubemissionen bei 52 mg/Nm³. Allerdings zeigt sich am Kohlenmonoxid und Gesamt-C deutlich, dass die Ausbrandqualität mit steigendem Brennstoffwassergehalt abnimmt. So steigt die Gesamt-C-Emission von 24 mg/Nm³ bei 12 % Wassergehalt auf nahezu das Zehnfache bei 30 % Wassergehalt. Dies lässt sich vor allem durch die parallel dazu absinkenden Feuerraumtemperaturen erklären. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad sinkt mit steigendem Wassergehalt deutlich von 77 % bei 12 % Wassergehalt auf 69 % bei 30 % Wassergehalt.

Tabelle 30: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 18 % / 23 % / 30 % Wassergehalt

Wassergehalt	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Stufe 1 (12 %)	77 %	13,8	1329	153	24
Stufe 2 (18 %)	74 %	14,5	1466	165	70
Stufe 3 (23 %)	72 %	15,2	2461	168	181
Stufe 4 (30 %)	69 %	15,6	3228	172	216

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

Generell kann festgehalten werden, dass ein Brennstoffwassergehalt von 20 % nicht überschritten werden sollte, auch wenn hier bei den Staubemissionen noch keine deutlichen Nachteile erkennbar sind. Die Unterschreitung der Wassergehaltsgrenze von 20 % ist aber wichtig, um noch einen guten Wirkungsgrad, eine hohe Ausbrandqualität und damit auch geringe Geruchsbelästigung (vgl. CO- und Ges.-C- Emissionen in Tabelle 30) sicherzustellen. Ähnlich zu den beiden vorgehenden Varianten (Kapitel 5.5.2 und 5.5.3) wird auch hier die Verwendung von Holz mit zu hohem Wassergehalt in gewissem Maß durch die Steuerung begrenzt.

5.5.5 Einfluss der Zugbedingungen

Umgebungsbedingungen und bauliche Einflüsse, wie z. B. Kamindurchmesser und -höhe können dazu führen, dass der Kaminzug nicht immer im geforderten Normalbereich von ca. -14 Pa liegt. Aus diesem Grund wurde untersucht, ob sich ein höherer Kaminzug negativ auf die Staubemissionen auswirkt. Dazu wurde der Förderdruck stufenweise von -14 Pa auf -24 Pa und -34 Pa erhöht. Selbst bei einem für die Praxis relativ hohen Förderdruck von -34 Pa konnte eine nur geringfügig höhere Staubemission festgestellt werden (Abbildung 46, links).

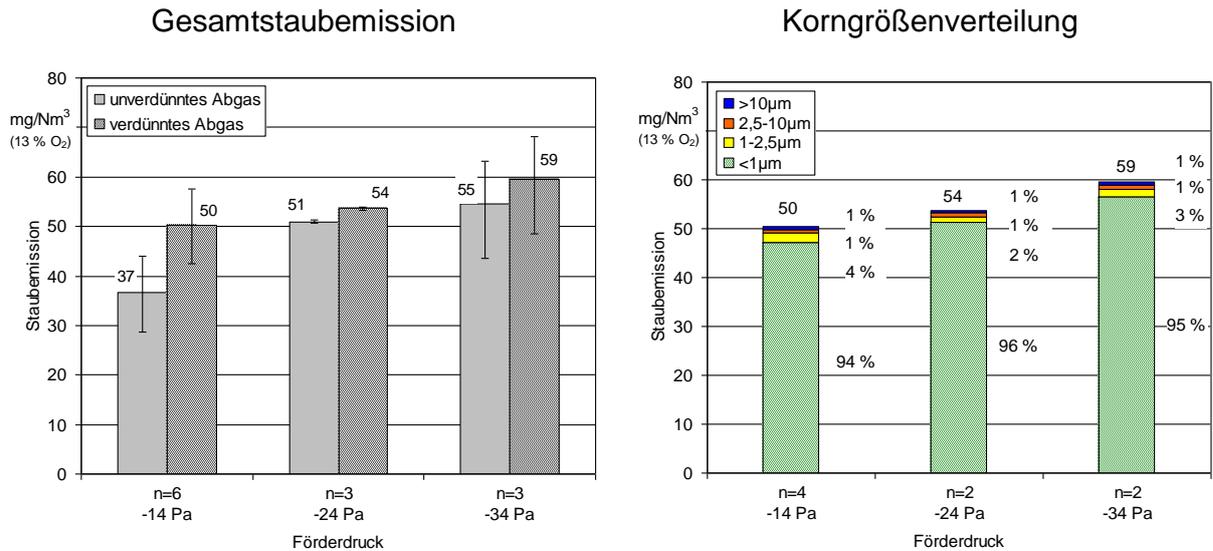


Abbildung 46: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Förderdrücken (-14 Pa / -24 Pa / -34 Pa). Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg (n = Anzahl Messungen)

Die Feuerung ist also weitgehend unempfindlich gegenüber Schwankungen des Kaminzugs, wie sie beispielsweise bei wechselnder Witterung auftreten können. Auch der Anteil der Partikel mit mehr als 1 µm aerodynamischem Durchmesser nimmt offenbar nicht zu (Abbildung 46, rechts), obwohl zu erwarten gewesen wäre, dass mehr grobe Partikel aus dem Aschebett mitgerissen werden. Auch beim Kohlenmonoxid und den organischen Komponenten im Abgas kam es nur zu einem leichten Anstieg infolge des höheren Kaminzugs.

Tabelle 31: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Förderdrücken (-14 Pa / -24 Pa / -34 Pa). Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg

Förderdruck	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
-14 Pa (normal)	77 %	13,8	1329	153	24
-24 Pa (erhöht)	71 %	14,9	1870	162	21
-34 Pa (stark erhöht)	68 %	15,3	1931	184	41

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

Allerdings ist deutlich zu erkennen, dass der Wirkungsgrad von 77 % bei -14 Pa auf 68 % bei -34 Pa Kaminzug sinkt (Tabelle 31). Ursache hierfür ist die höhere Abgasge-

schwindigkeit im Feuerraum und im Nachheizkasten. Die Abbranddauer ist kürzer und das Wärmeübertragungsvermögen der Feuerung begrenzt. Das heißt, die erzeugte Wärme kann nicht schnell genug an die Umgebung übertragen werden und der feuerungstechnische Wirkungsgrad sinkt.

5.5.6 Anwendereinflüsse (Fehlbedienung & Regelung)

Wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, weist der Kachelofenheizeinsatz die Besonderheit einer Steuerung der Verbrennungsluftklappe auf. Standardmäßig wurde die Stellung der Verbrennungsluftklappe in den vorangegangenen Versuchen automatisch gesteuert. Da nicht viele Kachelofenheizeinsätze dieses Merkmal aufweisen, wurde aber auch untersucht, ob Veränderungen eintreten, wenn die Klappe manuell nach Bedienungsanleitung eingestellt wird oder ständig offen ist.

Wird die Klappe in drei Stufen manuell bedient, steigen die Gesamtstaubemissionen von 50 auf 56 mg/Nm³ leicht an (Abbildung 47, gemessen im verdünnten Abgas). Die Kohlenmonoxidwerte sind bei manueller Steuerung mit 937 mg/Nm³ sogar etwas besser als bei automatischer Steuerung mit 1329 mg/Nm³ (Tabelle 32), wobei beachtet werden muss, dass die Messzeit im manuellen Betrieb etwas kürzer war und damit eventuell der Schlussanstieg nicht mehr bei der Mittelwertbildung berücksichtigt werden konnte. Die Korngrößenverteilung bleibt fast unverändert (Abbildung 47).

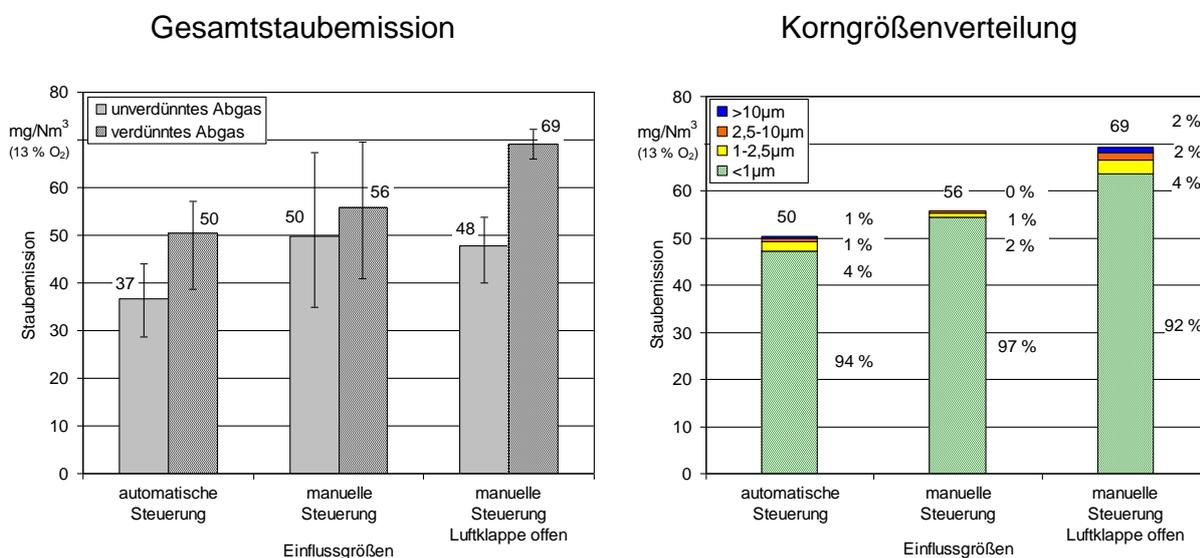


Abbildung 47: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Steuerungsvarianten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg (n = Anzahl der Messungen)

Wird die Luftklappe während des gesamten Abbrands auf Anheizstellung belassen (d. h. ganz geöffnet), erhöhen sich die Staubemissionen deutlicher von 50 mg/Nm³ auf 69

mg/Nm³. Bei den gasförmigen Komponenten und der Korngrößenverteilung sind dagegen keine signifikanten Änderungen erkennbar.

Die automatische Steuerung ist also nicht besser als der normale manuelle Betrieb. Allerdings verhindert sie Fehlbedienungen wie beispielsweise das Offenlassen der Luftklappe während des Abbrands. Zudem werden ungünstige Brennstoffe wie zu große Scheite (vgl. Kapitel 5.5.2) oder zu nasses Holz (vgl. Kapitel 5.5.4) durch die Steuerung vermieden.

Tabelle 32: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Steuerungsvarianten. Feuerung: Kachelofenheizeinsatz HKD 5.1 (Brunner). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge 33 cm, Brennstoffmasse 4,5 kg

Einflussgröße	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
automatische Steuerung	77 %	13,8	1329	153	24
manuelle Steuerung	76 %	13,4	937	172	25
manuelle Steuerung (Luftklappe offen)	73 %	13,8	1372	163	28

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.6 Messungen an einem Kaminofen

Wie beim Kachelofenheizeinsatz wurden auch beim Kaminofen eine Reihe brennstoff-, bedienungs- und standortbedingter Einflüsse untersucht. Hierzu zählen die Brennstoffart (Holzart, Rindengehalt, verschiedene Briketts), die Aufbereitungsform (verschiedene Scheitgrößen), die Brennstoffauflagemenge, der Wassergehalt sowie die Zugbedingungen im Schornsteinsystem und weitere Anwendereinflüsse. Hinzu kommt eine Betrachtung einzelner Abbrandphasen einer Brennstoffauflage, wodurch eine generelle Charakterisierung des diskontinuierlichen Verbrennungsverlaufs eines Scheitholz-Kaminofens erfolgen sollte. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

Auch hier werden, anders als bei den Zentralheizungskesseln, zusätzlich zu den Messungen im verdünnten Abgas durchweg auch die Staubkonzentrationen im unverdünnten Abgas dargestellt. Wie bereits dargelegt sollen durch diese Gegenüberstellung die quantitativen Auswirkungen der beiden unterschiedlichen Versuchsaufbauten offengelegt werden. Insbesondere bei den Einzelfeuerstätten, wie den Kaminöfen, kommt es wegen der höheren Gehalte an organischen Verbindungen im Abgas zum Teil zu deutlichen Abweichungen, auf deren Ursache am Beginn des Kapitels 5.5 bereits eingegangen wurde. Die Staubbestimmung von Feuerungsanlagen im Rahmen von Typenprüfungen oder Zertifizierungsmessungen erfolgt in Deutschland ohne eine Abgasverdünnung. Zum Vergleich mit Richt- oder Grenzwerten sind daher diese Messungen heranzuziehen.

5.6.1 Charakterisierung der Abbrandphasen

Zur besseren Beurteilung einzelner Phasen eines Abbrandes wurden Messreihen aus 10-Minuten-Mittelwerten gebildet. Ein Abbrand, der üblicherweise knapp 60 Minuten dauerte, wurde somit in sechs Phasen aufgeteilt. Es wurde beobachtet, dass die Flammen nach ca. 30 Minuten erloschen, was deutlich am Anstieg der Sauerstoff- und CO-Konzentration erkennbar ist. Hinsichtlich des Kohlenmonoxids ist vor allem die anschließende Phase ohne Flammenausbreitung problematisch (Abbildung 48, unten).

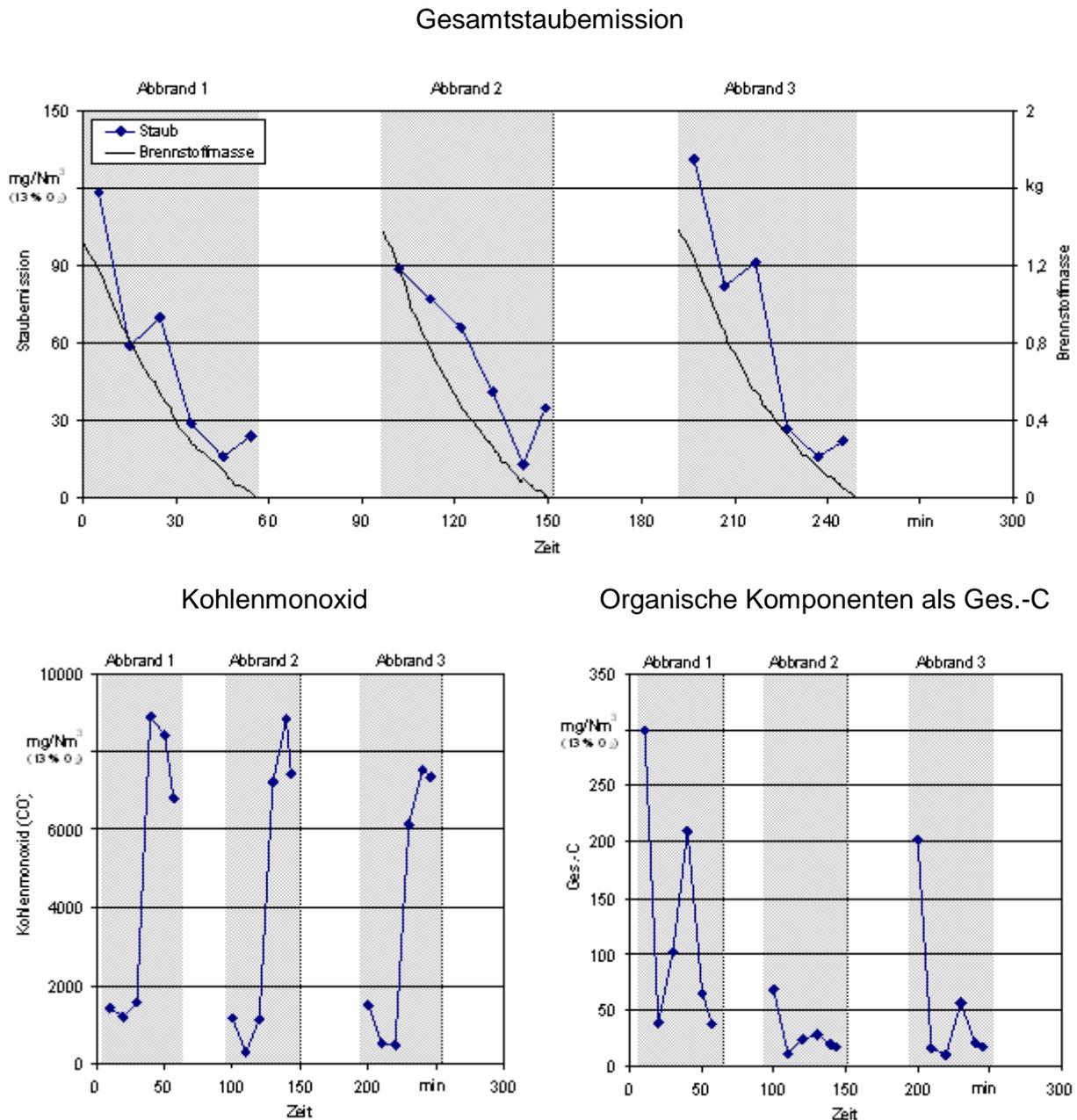


Abbildung 48: Verlauf von Sauerstoff-, Gesamtstaub-, Kohlenmonoxid- und Ges.-C-Konzentration während drei Abbränden. Jeweils 10-Minuten-Mittelwerte. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg

Hier können Kohlenmonoxidkonzentrationen von bis zu 9000 mg/Nm^3 erreicht werden. Die Staubkonzentration (Abbildung 48, oben) und Gesamt-C-Konzentrationen (Abbildung 48, unten rechts) sind dagegen direkt nach der Brennstoffauflage am höchsten und sinken dann im Laufe des Abbrandes nahezu kontinuierlich ab. Wie in Tabelle 33 dargestellt, beträgt der Gesamtstaub-Mittelwert bei allen Abbränden zwischen 65 und 79 mg/Nm^3 , wohingegen direkt nach der Brennstoffauflage auch Werte von 130 mg/Nm^3 möglich sind.

Bei den Einzelwerten der Schadstoffkonzentrationen darf allerdings nicht übersehen werden, dass es sich um Konzentrationsangaben handelt, die wegen des uneinheitlichen Abgasvolumenstromes nicht mit Emissionsraten (d. h. zum Beispiel Staub- oder Ges.-C-Frachten) verwechselt werden dürfen. Aus messtechnischen Gründen (hohe Messunsicherheit für den kurzzeitigen Brennstoffverbrauch bzw. den Abgasvolumenstrom in umsatzschwachen Phasen) ist eine Bestimmung tatsächlicher spezifischer Staubfrachten (d.h. in mg/MJ oder g/h) nicht mit ausreichend hoher zeitlicher Auflösung möglich. Der Anstieg der Staubemission am Ende des Abbrands wäre bei Betrachtung der Staubfracht (in g/h) vermutlich nicht zu beobachten.

Aufgrund der stark schwankenden Emissionen während eines Abbrands ist es zur Charakterisierung einer Feuerung – auch im Vergleich zu anderen Anlagen – erforderlich, dass die Messung einen vollständigen Abbrand vom Auflegen bis zum vollständigen Ausbrand des Brennstoffs erfasst. Die nachfolgenden Messungen basieren auf dieser Vorgehensweise.

Tabelle 33: Charakterisierung der Abbrandphasen - Mittelwerte über jeweils einen Abbrand. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg

Abbrand Nr.	O ₂ (%)	Staub (mg/Nm^3)	CO (mg/Nm^3)	NO _x (mg/Nm^3)	Ges.-C (mg/Nm^3)
1	15,7	69	3.024	165	148
2	14,9	65	2.517	147	36
3	15,0	79	2.480	144	73

5.6.2 Einfluss von Brennstoffart und Aschegehalt

In der Praxis werden je nach Region verschiedenste Holzbrennstoffe eingesetzt. Während in ländlich strukturierten Gebieten eher Scheitholz zum Einsatz kommt, werden Holzbriketts wegen des geringeren Lagerplatzbedarfs überwiegend in städtischen Gebieten eingesetzt. Die Rindenbriketts stellen dagegen eher einen Nischenbrennstoff dar, der als Kohlebrikett-Ersatz angeboten wird und eher dem Erhalt der Zündfähigkeit über einen längeren Zeitraum dient.

Zwischen den „Standardbrennstoffen“ Buche, Birke und Fichte sind nur geringe Unterschiede bei den Staubemissionen feststellbar. Lediglich das Fichtenscheitholz ohne Rin-

de verursacht mit etwa 110 mg/Nm^3 höhere Emissionen (Abbildung 49), wobei hier eigentlich ein gegenteiliger Effekt erwartet worden war. Ebenso waren bei den Holzbriketts aufgrund der standardisierten Form eher niedrigere Staubemissionen erwartet worden, dagegen kommt es hier – wie schon beim Kachelofenheizeinsatz (vgl. Kapitel 5.5.1) – zu einer leichten Erhöhung der Staubemission, wenngleich der gemessene Wert von 96 mg/Nm^3 wesentlich niedriger liegt als beim Kachelofenheizeinsatz. Auch hier lässt sich die Erhöhung nicht durch einen schlechteren Ausbrand erklären. Ausschlaggebend ist möglicherweise, dass das Brikett sich stark in der Länge ausdehnt und dabei in kleine Segmente zerfällt, wodurch Staubpartikel freigesetzt werden.

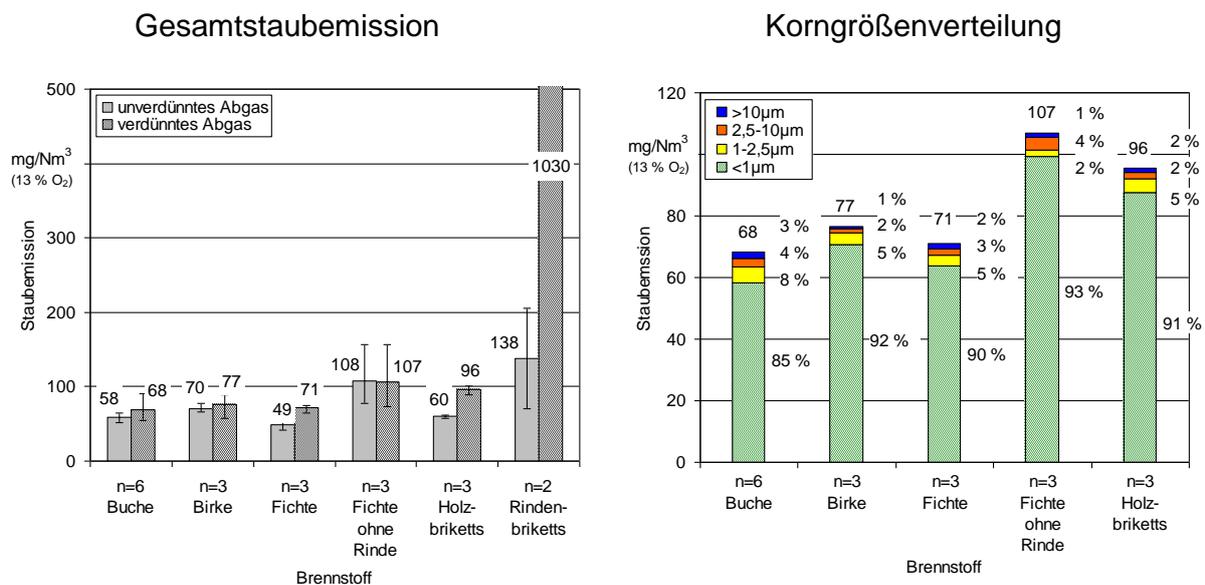


Abbildung 49: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg (n = Anzahl Messungen)

Als völlig ungeeigneter Brennstoff erwiesen sich die Rindenbriketts. Schon während der Messungen zeigte sich, dass anstelle einer Verbrennung nur ein langsames Schwelen erfolgt. Damit deuteten sich auch schon die extrem hohen Staubemissionen im verdünnten Abgas an ($> 1000 \text{ mg/Nm}^3$, Abbildung 49), die vor allem durch Kondensation von Kohlenwasserstoffen bei der Abkühlung mit Verdünnungsluft zu erklären sind. Gründe für den schlechten Ausbrand sind vor allem in der glatten Oberfläche und in dem hohen Aschegehalt (8 %) des Brennstoffs zu suchen.

Die Korngrößenverteilung zeigt das gleiche Bild wie schon beim Kachelofenheizeinsatz. Den überwiegenden Staubanteil (ca. 85 bis 95 %) tragen die Partikel bis $1 \mu\text{m}$ aerodynamischem Durchmesser bei (Abbildung 49). Bei Rindenbriketts konnte wegen der hohen Staubkonzentration keine Korngrößenverteilung über einen kompletten Abbrand bestimmt werden.

Bei den gasförmigen Abgasbestandteilen sind – mit Ausnahme der Rindenbriketts – nur wenige Unterschiede zwischen den Brennstoffen erkennbar. Bei den Holzbriketts fallen lediglich die vergleichsweise günstigen Gesamt-C-Werte auf, zumal diese etwas im Widerspruch zu den leicht erhöhten Staubwerten stehen. Auch der feuerungstechnische Wirkungsgrad ist mit Ausnahme der Rindenbriketts (29 %) nahezu konstant bei 62 bis 66 % (Tabelle 34).

Tabelle 34: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Brennstoffarten. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg

Brennstoffart	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Buchenscheitholz	66 %	15,3	2609	162	84
Birkenscheitholz	65 %	16,1	3177	151	195
Fichtenscheitholz	66 %	15,7	2659	117	159
Fichtenscheitholz ohne Rinde	62 %	15,1	2844	70	81
Holzbrikett	64 %	15,4	2600	122	29
Rindenbrikett	29 %	19,8	13078	473	2977

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.6.3 Einfluss der Brennstoffaufbereitung

Eine in der Praxis entscheidende Frage ist die Scheitgröße. Aus zwei Gründen werden oft die größeren Scheite bevorzugt. Zum einen ist der Arbeitsaufwand beim Spalten geringer; zudem ist die Abbranddauer im Regelfall bei großen Scheiten auch länger, was längere Nachlegeintervalle bedeutet. Wenn schnell eine hohe Feuerungsleistung erzielt werden soll, werden dagegen eher kleine Scheite eingesetzt.

In den Versuchen wurde, wie vom Hersteller vorgegeben, eine Brennstoffmenge von 1,4 kg verwendet, wobei die Scheitmasse zwischen 0,35 und 1,4 kg variierte. In den Ergebnissen zeigt sich, dass die „Normalvariante“ mit einer Scheitgröße von 0,7 kg die besten Ergebnisse lieferte, sowohl bei den Staubemissionen (68 mg/Nm³, vgl. Abbildung 50), als auch bei den Komponenten CO und Gesamt-C, die die Ausbrandqualität charakterisieren (vgl. Tabelle 35). Die kleinen Scheite sind hinsichtlich der Ausbrandqualität ähnlich gut zu beurteilen. Allerdings führen diese zu einem raschen und heftigen Abbrand aufgrund der großen Oberfläche, was sich bei den Staubemissionen negativ bemerkbar macht. Diese liegen mit 108 mg/Nm³ um mehr als 50 % über denen der normalen Scheite. Der umgekehrte Fall liegt bei den großen Scheiten vor. Hier wirkt sich vor allem das ungünstige Oberfläche-Volumenverhältnis aus; die Brennraumtemperatur ist daher sehr niedrig und somit steigen die Staub-, CO- und Gesamt-C-Emissionen im Vergleich zur „Normalvariante“ stark an. Bei den Staubemissionen beträgt dieser Anstieg fast 300 %, was sich bereits bei den hohen Gesamt-C-Konzentrationen (981 mg/Nm³) andeutet.

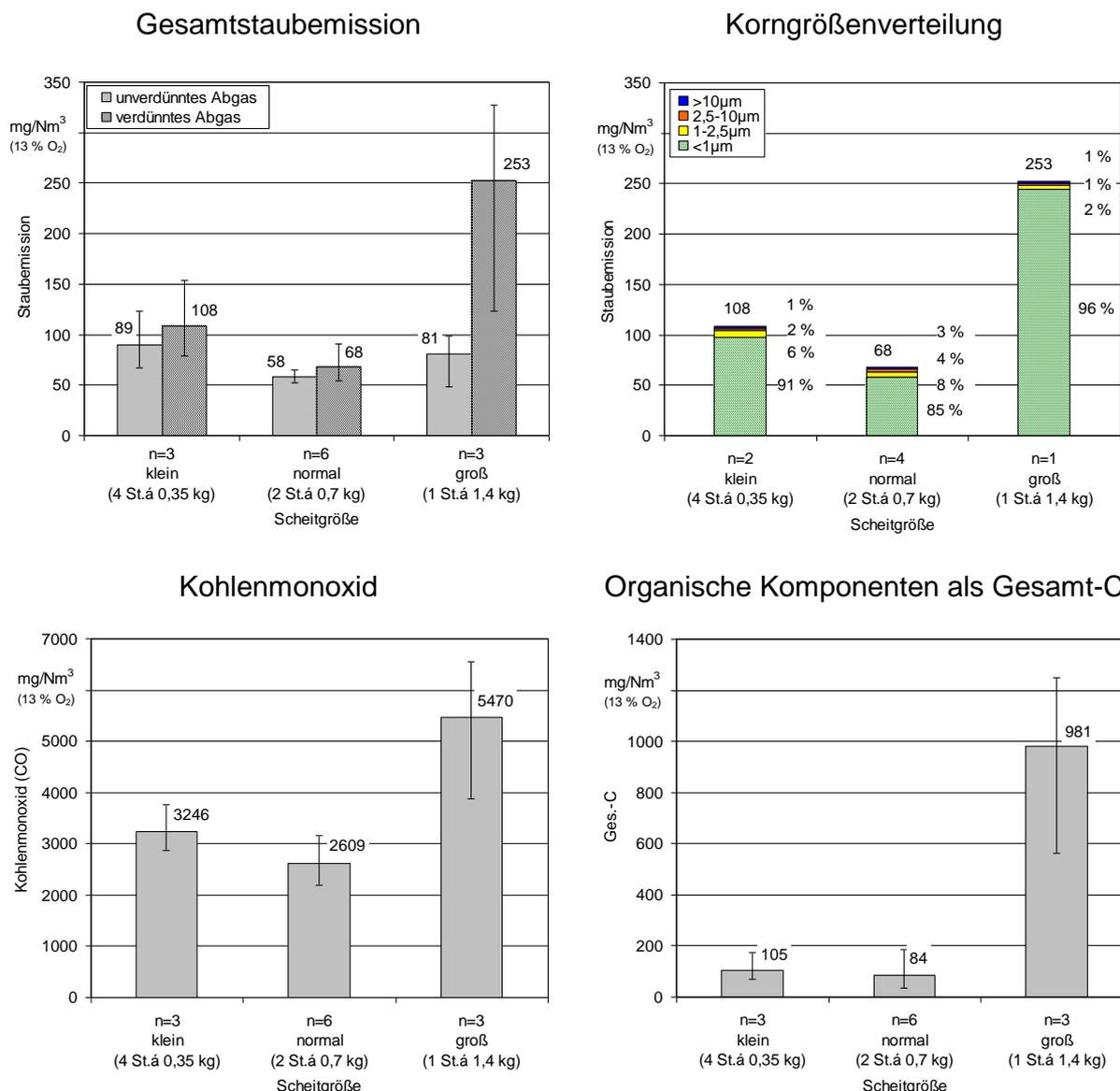


Abbildung 50: Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg (n = Anzahl Messungen)

Tabelle 35: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Scheitgröße. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg

Scheitgröße	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
klein (4 St. á 0,35 kg)	68 %	13,8	3.246	115	105
normal (2 St. á 0,7 kg)	66 %	15,3	2.609	162	84
groß (1 St. á 1,4 kg)	49 %	17,5	5.470	219	981

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

Zur Korngrößenverteilung ist festzustellen, dass bei schlechterer Ausbrandqualität, d.h. bei zu kleinen oder zu großen Scheiten, auch der Anteil der Partikel mit weniger als 1 µm aerodynamischen Durchmesser zunimmt (Abbildung 50). Generell ist außerdem festzuhalten, dass die Nachteile zu kleiner Scheite geringer sind als bei Verwendung zu großer Scheite. Wie beim Kachelofen erscheint es auch beim Kaminofen wichtig, dass vom Hersteller eine Obergrenze für die empfohlene Einzelscheitgröße festgelegt wird.

5.6.4 Einfluss der Auflagemenge

Wie bei allen Einzelfeuerstätten ist die aufgelegte Brennstoffmenge eine der wichtigsten benutzerbedingten Einflussgrößen. Der große Feuerraum und die große Sichtscheibe führen häufig dazu, dass der Kaminofenbetreiber mehr Brennstoff auflegt als vom Hersteller vorgegeben ist, um ein möglichst eindrucksvolles Flammenspiel beobachten zu können. In den hier durchgeführten Messungen zeigte sich jedoch, dass schon eine Verdoppelung der Brennstoffmasse von 1,4 kg auf 2,8 kg Buchenscheitholz eine etwa doppelt so hohe durchschnittliche Staubemission bewirken kann (Abbildung 51). Diese Beobachtung bestätigt sich zwar beim Fichtenscheitholz nicht, allerdings liegt hierzu nur eine gültige Vergleichsmessung vor. Die Wiederholungsmessungen bei dieser Variante mussten schon vor Ende der Messzeit abgebrochen werden, da der Druckverlust über die Filterplatten zu groß wurde. Würde man diese abgebrochenen Messungen gelten lassen, käme ein wesentlich höherer Mittelwert von ca. 150 mg/Nm³ für die Messung bei 2,8 kg Fichte zustande.

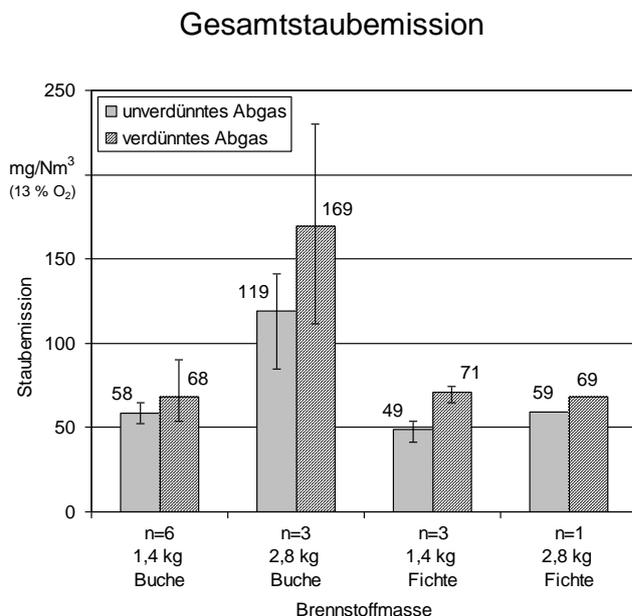


Abbildung 51: Gesamtstaubgehalt bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchen-/Fichtenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg / 2,8 kg (n = Anzahl Messungen)

Als Fazit aus diesen Versuchen kann festgehalten werden, dass die vom Hersteller vorgegebenen Brennstoffauflagemengen unbedingt einzuhalten sind, da bei Nichtbeachtung mit hohen Extremwerten für die Staubemission zu rechnen ist.

Aufgrund der hohen Staubemission konnte bei doppelter Auflagemenge keine Korngrößenverteilung über den gesamten Messzeitraum ermittelt werden.

Tabelle 36: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Brennstoffmasse. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchen-/ Fichtenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg / 2,8 kg

Brennstoffmasse / Brennstoffart	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
1,4 kg / Buche	66 %	15,3	2609	162	84
2,8 kg / Buche	70 %	12,2	6161	110	501
1,4 kg / Fichte	66 %	15,7	2659	117	159
2,8 kg / Fichte	71 %	11,8	1901	92	48

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.6.5 Einfluss des Brennstoffwassergehalts

Der Wassergehalt im Brennstoff (hier: Buchenscheitholz) wurde in 3 Stufen (12 % / 20 % / 30 %) variiert. Bei den beiden niedrigen Wassergehaltsvarianten (12 % und 20 %) zeigte sich ein einheitliches Emissionsniveau von ca. 70 mg/Nm³ Staub (Abbildung 52 oben links). Wesentlich höhere Staubemissionen mit durchschnittlich 1.144 mg/Nm³ wurden bei einem Brennstoffwassergehalt von 30 % gemessen. Deutlich zu erkennen ist bei dieser Variante zudem die große Differenz zwischen unverdünntem und verdünntem Abgas. Sie ist bedingt durch den hohen Anteil an Kohlenwasserstoffen (Abbildung 52 unten rechts), die im verdünnten Abgas auskondensieren und sich zu Staubpartikeln zusammenlagern. Die extrem hohen Kohlenwasserstoffemissionen kommen durch die niedrigen Feuerraumtemperaturen zustande. Der Abbrand dieser Scheite erwies sich größtenteils als Schwelbrand, da nicht genügend Wärme vorhanden war, um das Holz zügig zu trocknen.

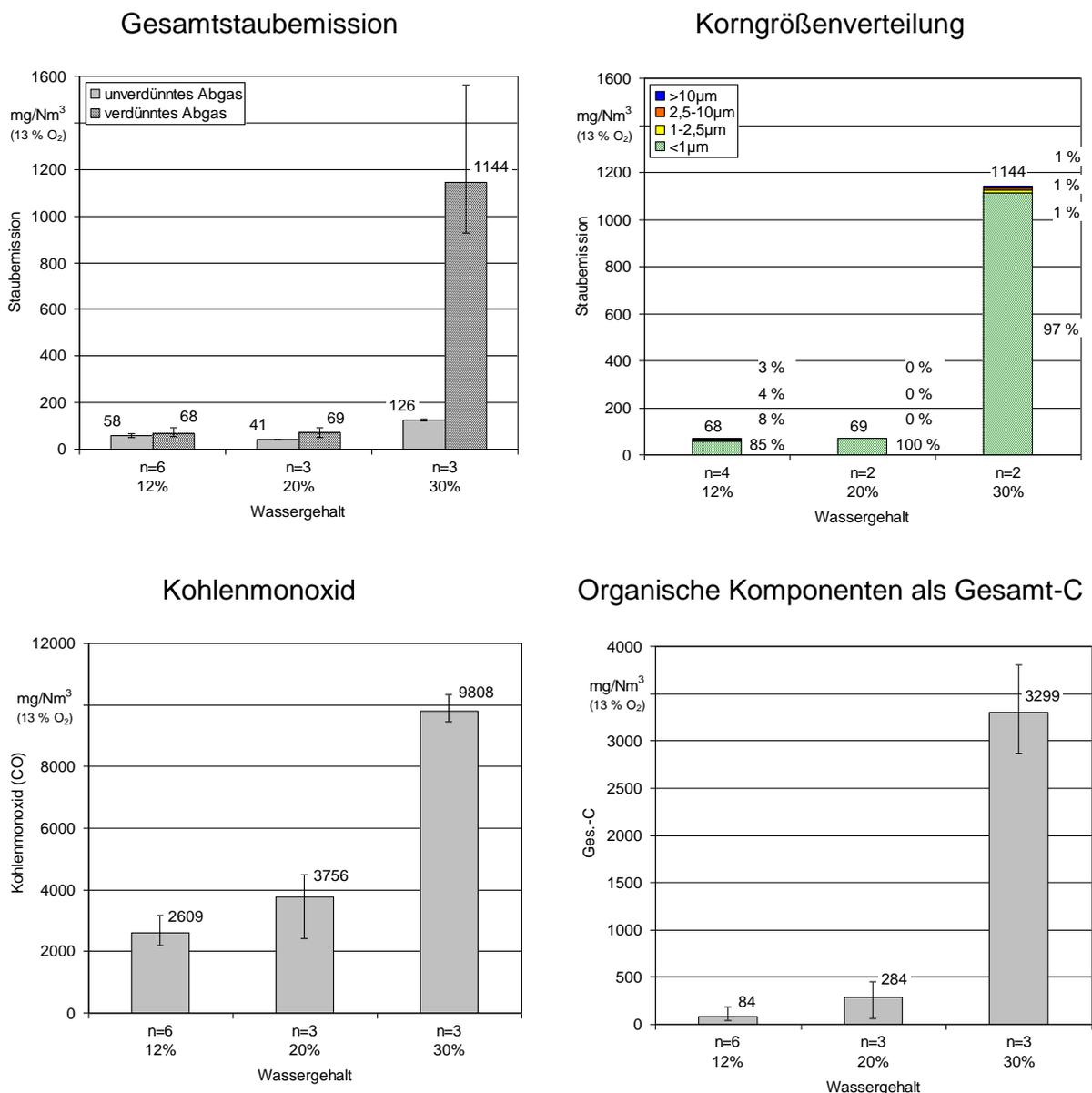


Abbildung 52: Gesamtstaubgehalt, Korngrößenverteilung, Kohlenmonoxid und Gesamt-C bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 20 % / 30 % Wassergehalt (n = Anzahl Messungen)

Ohne einen Versuchsaufbau mit Verdünnungstunnel wäre eine derartig extreme Verbrennungssituation bei den Staubemissionen nicht ohne weiteres erkennbar gewesen. Staubmessungen im unverdünnten Abgas hätten hier den Eindruck entstehen lassen, dass die Feuerstätte durchaus auch mit derartig nassem Holz einigermaßen zurechtkommen könnte. Staubemissionen, die nach der herkömmlichen Methode (unverdünntes Abgas) durchgeführt werden, stellen somit nur einen wenig geeigneten Parameter für die Charakterisierung der Ausbrandgüte bei unterschiedlichen Wassergehalten dar. Aus die-

sem Grund sollte auch die 20 %-Marke beim Wassergehalt aus emissionsschutzfachlicher Sicht als Obergrenze für Kaminöfen angesehen werden.

Die Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 1 µm stellen mit 85 bis 99 % den größten Anteil an der Staubemission (Abbildung 52 oben rechts). Bei den übrigen Messgrößen ist besonders auf den Anstieg der NO_x-Emissionen bei der hohen Wassergehaltsstufe hinzuweisen. Hier sind auch ein deutlicher Einbruch beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad sowie Extremwerte bei den CO-Emissionen zu verzeichnen (Tabelle 37).

Tabelle 37: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichem Brennstoffwassergehalt. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Scheitlänge: 25 cm, Brennstoffmasse: 1,4 kg bei 12 % bzw. äquivalente Masse bei 20 % / 30 % Wassergehalt

Wassergehalt	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
Stufe 1 (12 %)	66 %	15,3	2.609	162	84
Stufe 2 (20 %)	63 %	15,6	3.756	151	284
Stufe 3 (30 %)	39 %	18,3	9.808	384	3.299

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.6.6 Einfluss der Zugbedingungen

Nicht jede Einzelfeuerstätte ist mit einer Drosselklappe im Abgasrohr ausgestattet. Dies hat zur Folge, dass je nach Kaminbauart und Witterung der Kaminzug schwankt und zum Teil der vom Hersteller vorgegebene Förderdruck von ca. -12 Pa nicht mehr eingehalten werden kann. Deshalb wurde der Kaminzug während der Versuche zusätzlich auf -22 Pa bzw. -32 Pa erhöht. Aus Abbildung 53 ist zu erkennen, dass die Veränderung des Kaminzugs die Staubemissionen offenbar nicht unmittelbar beeinflusst. Alle Staubmesswerte liegen zwischen 66 und 73 mg/Nm³. Auch bei der Korngrößenverteilung im Staub ändert sich kaum etwas, die Partikel bis 1 µm aerodynamischen Durchmesser machen auch hier mindestens 85 % des Gesamtstaubs aus.

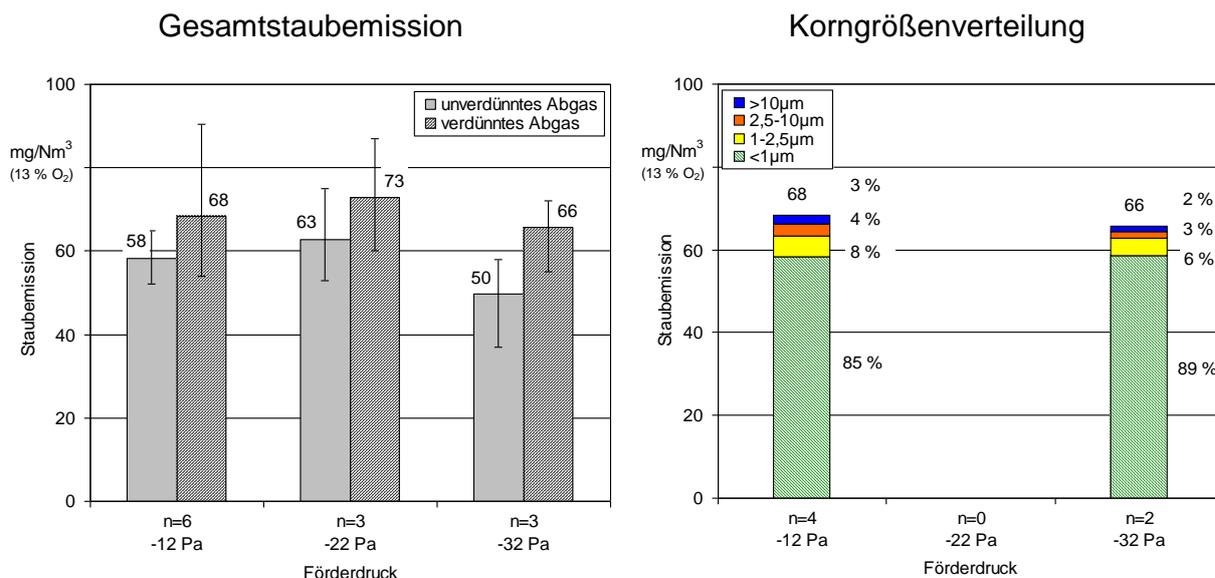


Abbildung 53: Gesamtstaubgehalt und Korngrößenverteilung bei unterschiedlichen Förderdrücken (-12 Pa / -22 Pa / -32 Pa). Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg

Wie beim Kachelofenheizeinsatz ist allerdings festzustellen, dass der Wirkungsgrad bei erhöhtem Förderdruck deutlich sinkt. Während bei Normalbedingungen 66 % Wirkungsgrad erreicht werden, sind es bei höherem Kaminzug nur noch ca. 50 % (Tabelle 38).

Tabelle 38: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlichen Förderdrücken (-12 Pa / -22 Pa / -32 Pa). Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg

Förderdruck	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
-12 Pa (normal)	66 %	15,3	2.609	162	84
-22 Pa (erhöht)	51 %	17,1	3.794	196	141
-32 Pa (stark erhöht)	52 %	16,0	2.937	165	43

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

5.6.7 Anwendereinflüsse (Fehlbedienung & Regelung)

Ein typischer Fehler bei der Bedienung von Kaminöfen ist das vorzeitige Schließen der Verbrennungsluft. Beim untersuchten Kaminofen soll der Primärluftschieber im Betrieb mit Holz immer geschlossen sein, der Sekundärluftschieber steht dann auf Mittelstellung. Als einzige Regelmöglichkeit bietet sich hier das Öffnen und Schließen der Sekundärluftzufuhr an. Für den Vergleich wurde der Sekundärluftschieber einmal, wie in der Betriebsanleitung vorgegeben, auf halb offen gestellt und er war in einer zweiten Variante komplett geschlossen.

Bei den Staubemissionen ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Varianten zu erkennen. So sind im „Standardbetrieb“ 68 mg/Nm^3 Staub zu verzeichnen, im „Fehlbetrieb“ 74 mg/Nm^3 . Die Korngrößenverteilung verschiebt sich im Betrieb mit geschlossenem Sekundärluftschieber hin zu den feineren Korngrößen (Abbildung 54).

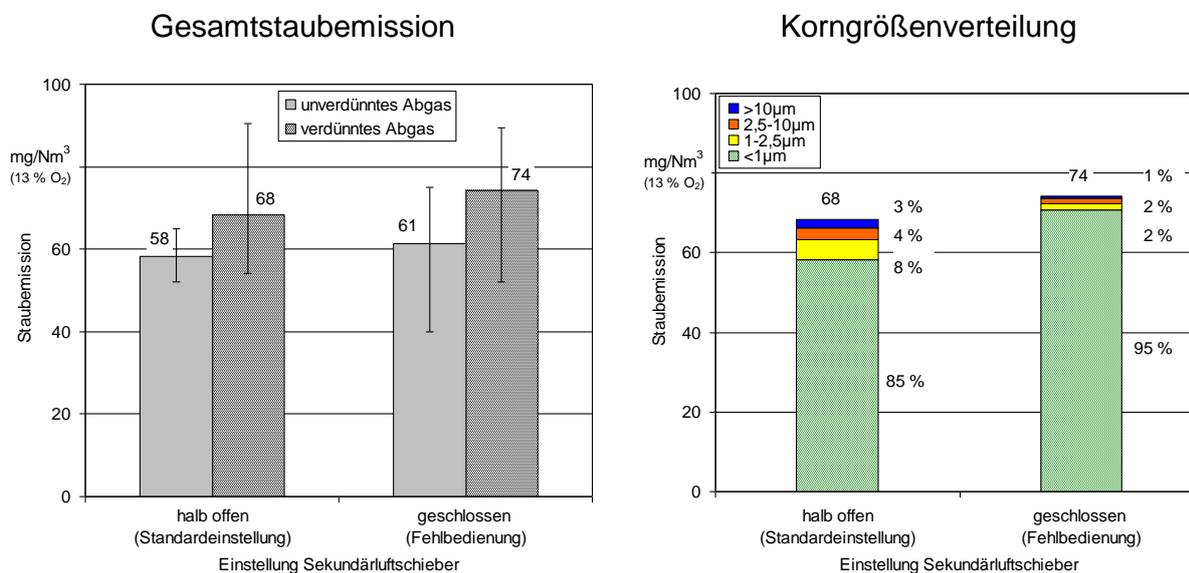


Abbildung 54: Gesamtstaubgehalt und Staub-Korngrößenverteilung bei unterschiedlicher Einstellung des Sekundärluftschiebers. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg

Auch bei den sonstigen Emissionen sind keine signifikanten Abweichungen zwischen den beiden Betriebsweisen feststellbar. Lediglich der feuerungstechnische Wirkungsgrad steigt von 66 % bei „Standardbetrieb“ auf 74 % bei „Fehlbetrieb“. Gleichzeitig sinkt der Restsauerstoffgehalt im Abgas auf 12,8 % (vgl. Tabelle 39). Aufgrund dieses immer noch hohen Restsauerstoffgehalts beeinflusst das Schließen der Sekundärluftzufuhr die Emissionen kaum. Ursache für die trotzdem noch genügend vorhandene Verbrennungsluftmenge könnten die sogenannten Tertiärluftöffnungen sein, die nicht regelbar und damit ständig offen sind. Ein sogenannter "Quälbrand" wird dadurch vermieden.

Tabelle 39: Zusammenstellung der sonstigen Messergebnisse bei unterschiedlicher Einstellung des Sekundärluftschiebers. Feuerung: Kaminofen Moon (Wodtke). Brennstoff: Buchenscheitholz, Länge: 25 cm, Masse: 1,4 kg

Einstellung des Sekundärluftschiebers	Wirkungsgrad feuerungstechnisch bei 20 °C ^a	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Ges.-C (mg/Nm ³)
halb offen (Standardeinstellung)	66 %	15,3	2609	162	84
geschlossen (Fehlbedienung)	74 %	12,8	3096	120	90

^a Wirkungsgrad bezogen auf den Messzeitraum

6 Ergebnisse zu den Sekundärmaßnahmen

Neben den in Kapitel 5 dargestellten brennstoff- und anlagenbedingten "primären" Einflussgrößen, bei denen die Schadstoffbildung bereits bei der Entstehung vermieden bzw. vermindert werden soll, können die anfallenden Schadstoffemissionen auch mit Hilfe von nachträglichen Maßnahmen im Rahmen sogenannter "Sekundärmaßnahmen" abgetrennt werden. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden zwei Nachbehandlungssysteme, ein elektrostatischer Abscheider sowie ein Wärmetauscher zur nachträglichen Abgaskondensation (Brennwerttechnik) untersucht. Die technische Beschreibung dieser Bauteile erfolgt im Kapitel 3.4.2. Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse aus der Kombination dieser Abscheider mit zwei der hier untersuchten Holz-Zentralheizungsanlagen dargestellt.

6.1 Elektrostatischer Abscheider

Der elektrostatische Abscheider der Firma Spanner Re², Neufahrn in Niederbayern wurde als Sekundärmaßnahme in den Rauchgasweg des Scheitholzkessels Fröling FHG Turbo 3000 eingebaut. Die Bestimmung der Staubabscheidegrade erfolgte durch Parallelmessung mit zwei einheitlichen Staubprobenahmesystemen. Während der durchschnittlichen Messdauer von ca. 60 min. wurden – bis auf eine Ausnahme – Reingasgehalte von unter 10 mg/Nm³ Staub erreicht (vgl. Abbildung 55).

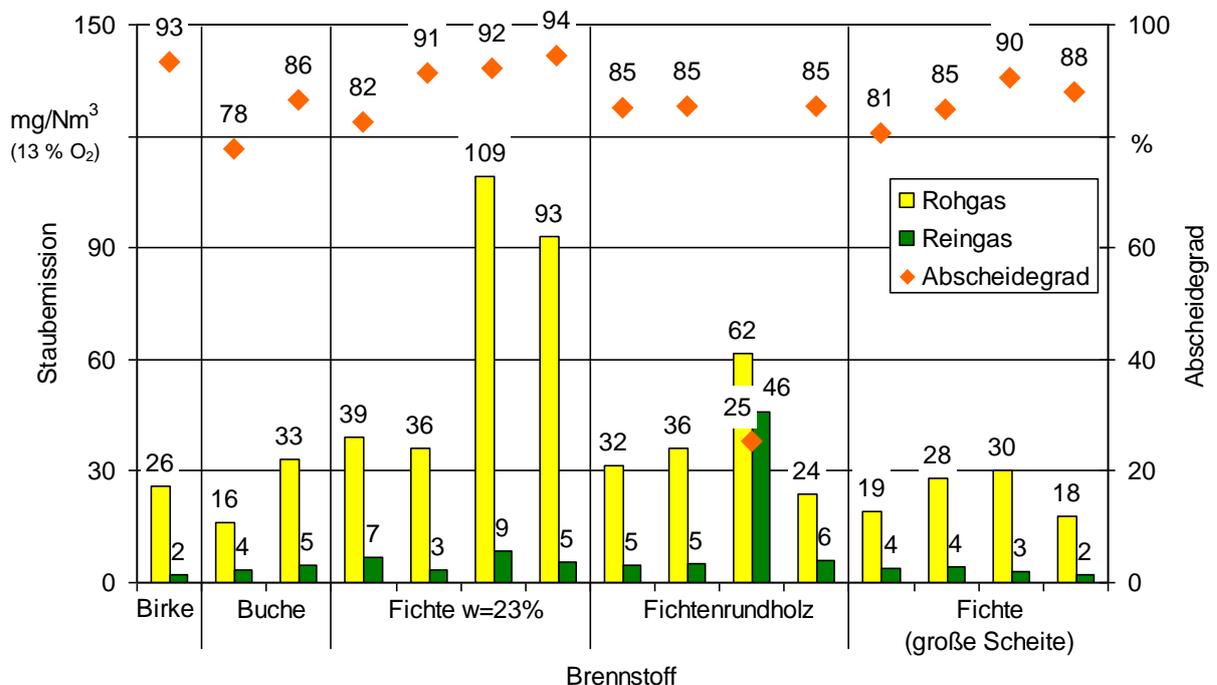


Abbildung 55: Abscheidung in einem elektrostatischen Abscheider in Kombination mit einem Scheitholzkessel. Darstellung einzelner Wertepaare. Abscheider: Fa. Spanner Re². Feuerung: Scheitholzkessel FHG Turbo 3000 (Fröling)

Selbst bei hohen Staubemissionen (Fichte, $w = 23\%$) konnte dieses Niveau gehalten werden und somit kamen bei dieser Variante auch die höchsten Abscheidegrade von über 90 % zustande. Lediglich bei einer von fünfzehn Messungen war ein Durchschlagen, d. h. ein Kurzschluss des Filters beobachtet worden, was wahrscheinlich auf die in diesem Fall erhebliche Staubemission mit hohem Kohlenstoffanteil zurückzuführen ist. Im Allgemeinen zeigte sich der Abscheider allerdings sehr betriebssicher und einfach zu bedienen. Eine Abreinigung wäre schätzungsweise frühestens nach 4 h im Dauerbetrieb notwendig, das heißt ca. einmal pro Brennstoffauflage. Bei normalem Betrieb mit gutem Brennstoff können die Intervalle aber durchaus auch wesentlich länger sein.

Auswirkungen des Abscheiders auf die Korngrößenverteilung im Staub können, wie in Abbildung 56 zu sehen, kaum festgestellt werden. Es gibt lediglich eine leichte Verschiebung hin zu mehr Submikronpartikeln, d.h. es werden mehr grobe als feine Partikel abgeschieden. Eine Ausnahme bilden die Messungen mit Buchenscheitholz, bei denen der umgekehrte Effekt eintritt.

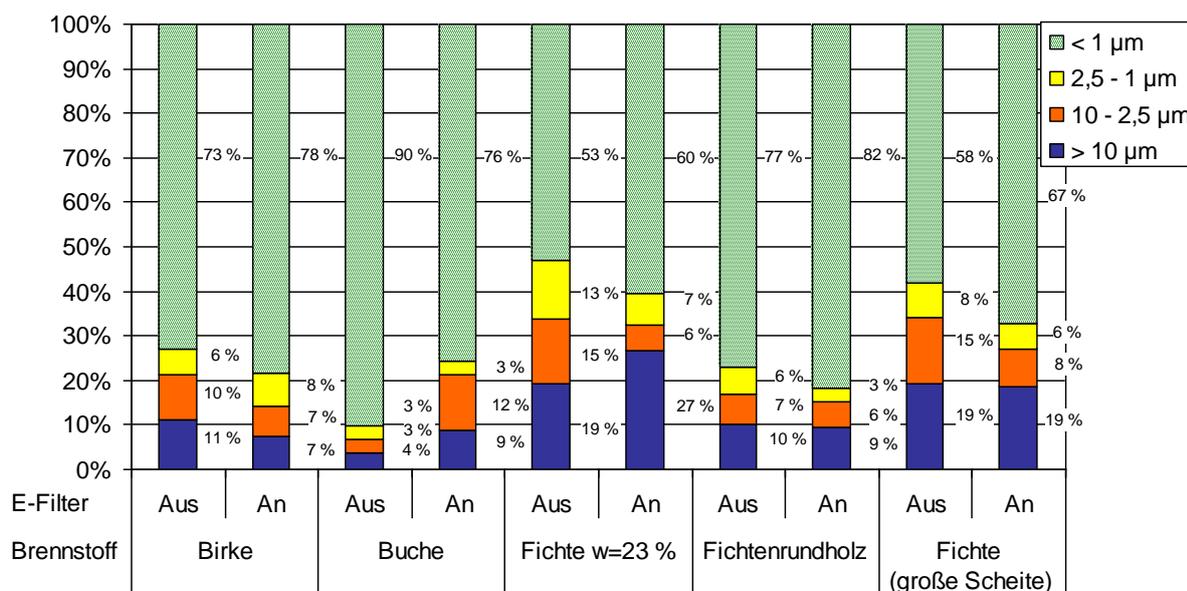


Abbildung 56: Wirkung des elektrostatischen Abscheiders auf die Korngrößenverteilung in den Stäuben. Mittelwerte aus je 2 Wiederholungsmessungen. Abscheider: Fa. Spanner Re². Feuerung: Scheitholzessel FHG Turbo 3000 (Fröling).

6.2 Kondensationswärmetauscher

Der Einbau eines Sekundärwärmetauschers mit Kondensationswirkung (Brennwerttechnik) führt zu einer signifikanten Minderung der Staubkonzentration über das ablaufende Kondensat. Dieser Effekt wurde in mehreren Versuchsreihen nachgewiesen. Abbildung 57 zeigt die Gesamtstaubemission, gemessen nach VDI 2066, vor und nach dem Zusatzwärmetauscher sowie die daraus errechneten Abscheidegrade in den einzelnen, zeitgleich durchgeführten Parallelmessungen. Vor allem bei den Fichtenhackschnitzeln

ohne Rinde ließen sich Abscheidegrade von ca. 35 % erreichen. Weniger gut war die Abscheidung dagegen bei den Versuchen mit Rinde und Buchenhackschnitzeln. Insgesamt zeigen sich relativ große Schwankungen zwischen den einzelnen Wiederholungsmessungen. Daher sind brennstoffbedingte Unterschiede kaum erkennbar. Im Mittel ist somit von einer Staubkonzentrationsminderung im Abgas in Höhe von ca. 30 % auszugehen.

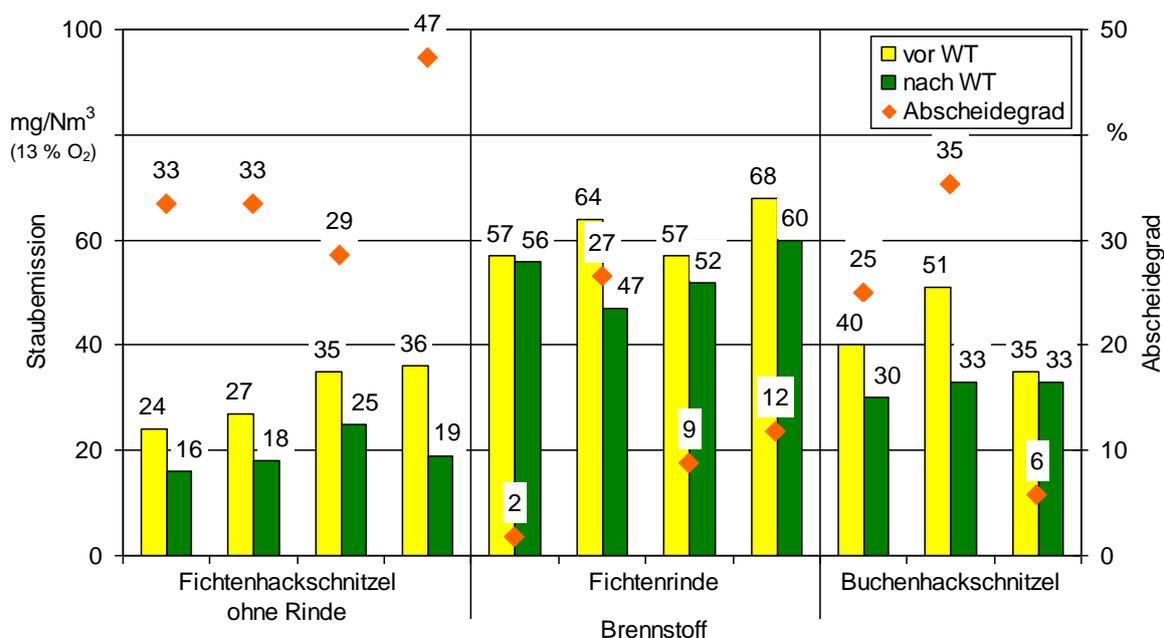


Abbildung 57: Staubabscheidung in einem kondensierenden Sekundärwärmetauscher ("Brennwertnutzung") in Kombination mit einem Hackschnitzelkessel (HDG Compact 50). Hier: Abscheidung bezogen auf die Staubkonzentration im Abgas. Darstellung aller einzelnen Wertepaare aus jeweils vier Wiederholungsmessungen, Brennstoffwassergehalte bei 16 bis 23 % und Rücklauftemperatur bei 25 °C (WT Wärmetauscher)

Neben der Staubabscheidung führt der Einbau des Sekundärwärmetauschers aber auch zu einer deutlichen Steigerung des Wärmeertrages und somit zu einer entsprechend höheren Brennstoffausnutzung. Im Mittel über alle Versuche lag diese Wirkungsgradsteigerung bei 10 Prozentpunkten. Der zusätzliche Wärmeertrag, der sich ohne weiteren Brennstoffverbrauch ergibt, führt im Gesamtsystem zu einem Staubminderungseffekt, da ja bezogen auf die erzeugte Wärmeinheit weniger Staub anfällt. Dieser Zusammenhang lässt sich mit Hilfe der Staubemission bezogen auf die Kilowattstunde Wärme darstellen (Abbildung 58). Bei den Fichtenhackschnitzeln ohne Rinde ergibt sich somit eine Emissionsminderung von ca. 45 % und im Mittel über alle Versuche errechnet sich ein Minderungswert von 35 %. Allerdings ist hierbei darauf hinzuweisen, dass ein Kondensationswärmetauscher nur dann sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn eine Möglichkeit zur Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme besteht. In der Praxis bedeutet dies, dass eine Fußboden- bzw. Wandflächenheizung oder eine Schwimmbadheizung vorlie-

gen sollte, um ausreichend niedrige Rücklauftemperaturen für die wirksame Abkühlung und Kondensation der Abgase zur Verfügung zu stellen.

Der Einbau des Sekundärwärmetauschers führte auch zu einer veränderten Korngrößenverteilung der anfallenden Stäube. Das zeigt Abbildung 59. Dargestellt sind die mit drei Brennstoffen durchgeführten Versuche, in denen (zeitlich versetzt) jeweils vor und nach der Kondensationsstufe gemessen wurde. Die Tatsache, dass nach der Kondensation der Anteil der Submikronpartikel (bis 1 µm) um ca. 10 bis 25 Prozentpunkte auf Werte von 94 bis 95 % ansteigt, deutet darauf hin, dass vornehmlich die größeren Partikel durch den Kondensationseffekt abgeschieden werden.

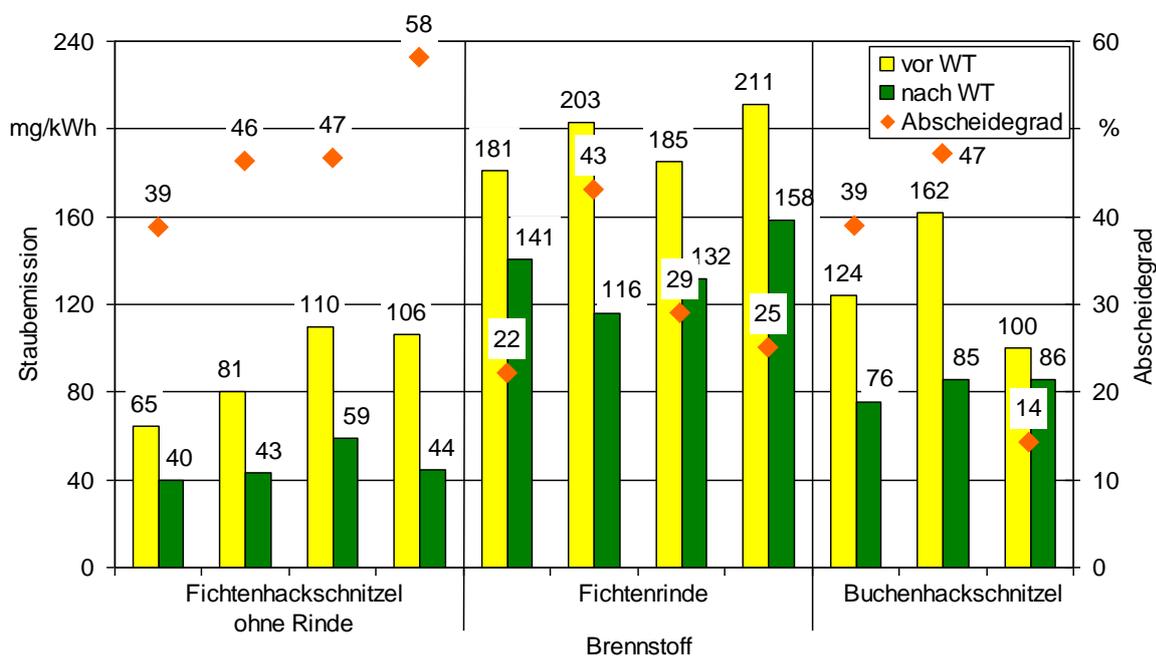


Abbildung 58: Staubabscheidung in einem kondensierenden Sekundärwärmetauscher ("Brennwertnutzung") in Kombination mit einem Hackschnitzelkessel (HDG Compact 50). Hier: Abscheidung bezogen auf die Netto-Wärmeerzeugung. Darstellung aller einzelnen Wertepaare aus jeweils vier Wiederholungsmessungen, Brennstoffwassergehalte bei 16 bis 23 % und Rücklauftemperatur bei 25 °C (WT Wärmetauscher)

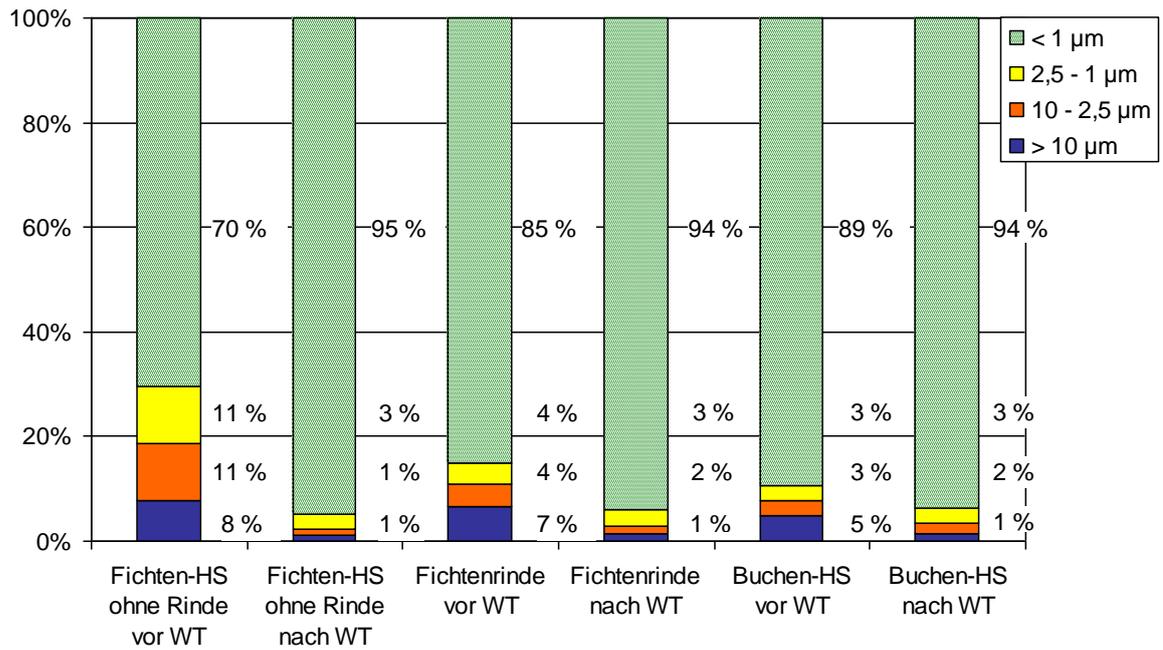


Abbildung 59: Wirkung des Sekundärwärmetauschers mit kondensierender Wirkung ("Brennwertnutzung") auf die Korngrößenverteilung in den Stäuben (WT Wärmetauscher). Mittelwerte aus je 2 Wiederholungsmessungen

7 Gegenüberstellung der untersuchten Feuerungsanlagen

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Kapitel 5.1 bis 5.6 zusammengefasst, um im Rahmen einer Gesamtschau eine Gegenüberstellung der Schadstoffemissionen aus den untersuchten Feuerungsanlagen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden für jede Feuerung jeweils 10 bis 12 Einzelmessungen ausgewählt. Bei der Berechnung der Mittelwerte aus den Messergebnissen wurden nur Standardbrennstoffe mit den anlagenüblichen Wassergehalten berücksichtigt. Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Fehlbedienungen (z. B. erhöhter Kaminzug, abweichende Scheitgrößen, abweichende Brennstoffmengen) blieben dabei jedoch unberücksichtigt. Tabelle 40 zeigt die bei der Mittelwertbildung berücksichtigten Brennstoffe und ihre Wassergehaltsstufen.

Tabelle 40: Übersicht der bei der Gegenüberstellung der einzelnen Feuerungsanlagen berücksichtigten Versuchsvarianten

Feuerungsanlage	Brennstoffart	Brennstoffwassergehalt	Anzahl der Messungen
Pelletkessel	Holzpellets	8 %	10
Hackschnitzelkessel	Fichtenhackschnitzel	22 %	10
	Buchenhackschnitzel	16 %	
Scheitholzessel	Fichtenscheitholz	12 %	10
	Buchenscheitholz	14 %	
	Birkenscheitholz	18 %	
Kachelofen	Fichtenscheitholz	11 %	12
	Buchenscheitholz	12 %	
	Birkenscheitholz	12 %	
Kaminofen	Fichtenscheitholz	12 %	12
	Buchenscheitholz	12 %	
	Birkenscheitholz	10 %	
Ölkessel	Heizöl EL	-	10
	Heizöl EL, schwefelarm	-	

7.1 Gesamtstaub und Korngrößenverteilungen

Die Gesamtstaubemissionen für die untersuchten Kessel wurden als Mittelwert über 10 bis 12 Einzelmessungen ermittelt. Die Mittelwerte sowie die zugehörigen Spannweiten sind in Abbildung 60 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Unterscheidung der Holzfeuerungen in zwei Gruppen möglich ist: einerseits die Gruppe der drei Kesselanlagen mit Werten zwischen 20 und 34 mg/Nm³ und andererseits die beiden Einzelfeuerstätten mit Werten von 58 bzw. 72 mg/Nm³. Der größere konstruktive und regelungstechnische Aufwand bei den Kesselanlagen führt somit auch zu geringeren Emissionen. Aber auch bei den Emissionen der Einzelfeuerstätten ist positiv zu vermerken, dass die Höchstwerte der Spannweite stets unter 100 mg/Nm³ liegen, so dass damit bereits ohne Sekundärmaßnahmen der in der ersten Stufe der Novellierung der 1.BImSchV vorgeschlagene Staubgrenzwert von 0,1 g/Nm³ eingehalten werden könnte [22]. Neben den Mittelwerten sind auch die in Abbildung 60 enthaltenen Spannweiten zu beachten. Ledig-

lich der Pelletkessel weist nur geringe Schwankungen der Einzelwerte auf. Hier wirkt sich der stark standardisierte Brennstoff eindeutig positiv aus und sorgt für stabile Verbrennungsbedingungen, die zu geringen Schwankungen der Emissionen führen. Alle anderen Feuerungsanlagen weisen deutlich größere Schwankungen auf, die durch die Inhomogenität des Brennstoffes und durch die Änderungen der Verbrennungsbedingungen innerhalb einer Abbrandperiode verursacht werden.

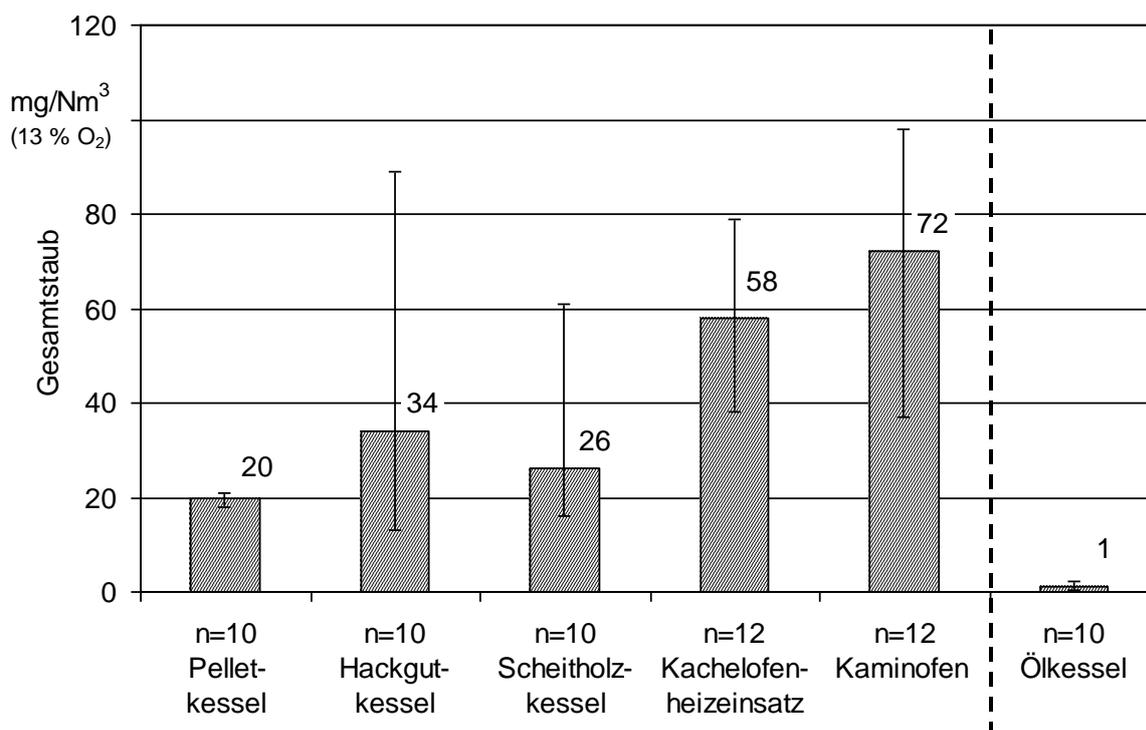


Abbildung 60: Mittlere Staubemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen)

Die Verteilung der Staubemissionen auf die 4 Größenklassen ($> 10 \mu\text{m}$, $2,5\text{-}10 \mu\text{m}$, $1\text{-}2,5 \mu\text{m}$ und $< 1 \mu\text{m}$) ist in Abbildung 61 dargestellt. Mit einem Massenanteil von 80 bis 90 % in der Größenklasse $< 1 \mu\text{m}$ ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Feuerungsanlagen. Lediglich der Scheitholz-kessel weist mit einem Wert von 70 % auffällig geringere Anteile dieser Größenklasse auf. Die jeweils verbleibenden Anteile verteilen sich relativ gleichmäßig auf die drei übrigen Größenklassen, wobei diese aufgrund der geringen Massenanteile nur von untergeordneter Bedeutung sind.

Da sich die verschiedenen Feuerungssysteme hinsichtlich der Korngrößenverteilung kaum unterscheiden, ist die Gesamtstaubemission als die wesentliche Bewertungskenngröße anzusehen. In wieweit bei Verwendung von Impaktoren mit anderen als den hier gewählten Trenngrenzen auch hinsichtlich der Korngrößen stärkere Unterschiede zutage getreten wären, bleibt somit offen. Eine weitere Differenzierung bei der Staubbewertung ermöglicht dann erst die chemische und physikalische Untersuchung der Staubproben.

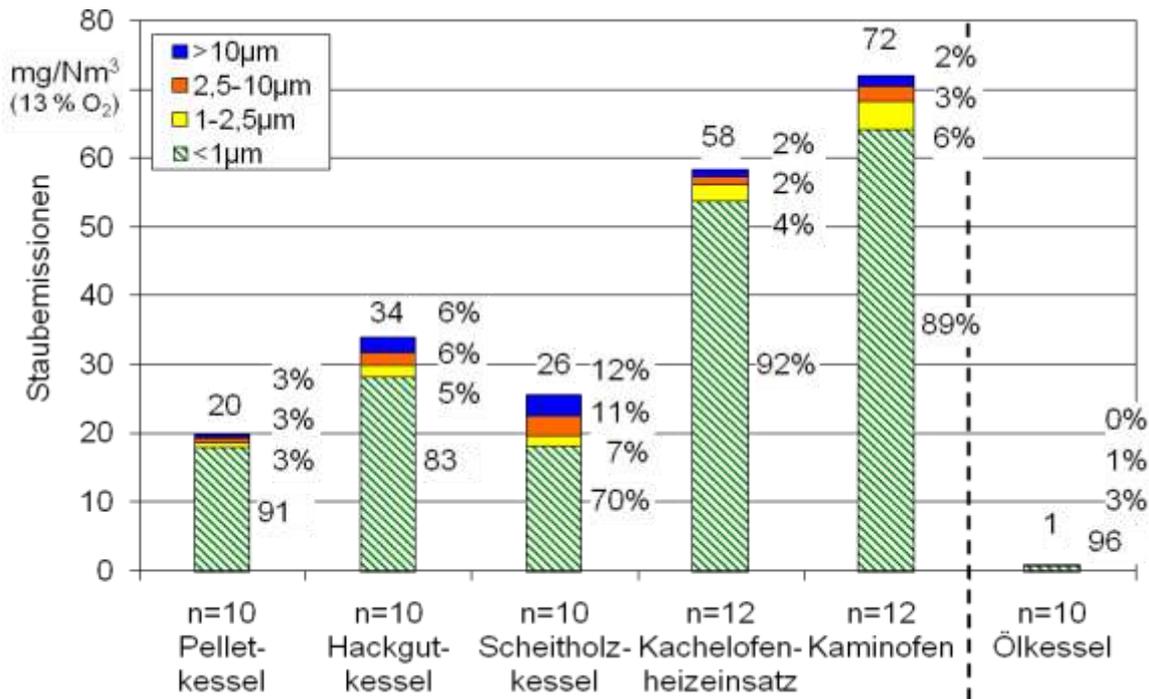


Abbildung 61: Korngrößenverteilung der Staubemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40

7.2 Gasförmige Abgaskomponenten

Analog zu den Partikelemissionen wurden die Mittelwerte der gasförmigen Emissionen für alle Feuerungsanlagen aus den Versuchsergebnissen mit den in Tabelle 40 aufgeführten Brennstoffen berechnet. Zunächst sollen die Emissionen an Kohlenmonoxid betrachtet werden, die einen wichtigen Indikator für die Ausbrandqualität des Abgases darstellen. In Abbildung 62 sind die mittleren Kohlenmonoxidemissionen der untersuchten Feuerungen dargestellt. Es ergibt sich eine deutliche Reihung vom Pelletkessel mit den geringsten Emissionen (23 mg/Nm^3) über Hackgutkessel (133 mg/Nm^3), Scheitholz-kessel (297 mg/Nm^3) und Kachelofenheizeinsatz (1.638 mg/Nm^3) bis zum Kaminofen, der mit 2.815 mg/Nm^3 die höchsten CO-Emissionen verursachte. Diese Werte zeigen für alle Feuerungen auch den inzwischen erreichten, relativ hohen Entwicklungsstand, zumal die derzeit geltenden und zum Teil auch die zukünftig geplanten Grenzwerte der 1. BImSchV mehr oder weniger deutlich unterschritten werden. Diese zukünftig geplanten CO-Grenzwerte sehen in der ersten Stufe Anforderungen von $1,0 \text{ g/Nm}^3$ (Zentralheizungskessel mit Scheitholz oder Hackschnitzel), $0,5 \text{ g/Nm}^3$ (Holzpelletkessel) bzw. bei $2,0 \text{ g/Nm}^3$ (Kamin- und Kachelöfen) vor [22], wobei sich die Prüfung von der hier gewählten praxisnahen Durchführung unterscheidet, so dass die Typenprüfergebnisse vor allem bei den Einzelfeuerstätten deutlich günstiger ausfallen (vgl. hierzu Kapitel 7.5). Die niedrigen CO-Emissionen von Pellet- und Hackgutkesseln sind durch die kontinuierliche Betriebsweise und die gute konstruktive Ausführung mit gestufter Luftzugabe und ausreichend bemessener Verweilzeit begründet. Die kontinuierliche Betriebsweise ermöglicht eine gute Anpassung von Brennstoff- und Luftmenge und führt so zu einem guten Ausbrand.

Bei absätzig beschickten Anlagen kann diese Anpassung durch eine Regelung erfolgen. Sowohl der Scheitholzkessel als auch der Kachelofeneinsatz waren mit einer Regelung ausgerüstet, wobei eine Verbrennungsluftregelung bei Scheitholzkesseln dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Auch der Scheitholzkessel zeigt somit deutlich, dass moderne Holzessel einen vollständigen Ausbrand der Abgase gewährleisten und nur sehr geringe Mengen an unverbrannten Bestandteilen emittieren. Mit CO-Emissionen von ca. 300 mg/Nm^3 werden der aktuelle (4 g/Nm^3) und der geplante (1 g/Nm^3) Grenzwert der 1. BImSchV deutlich unterschritten.

Die beiden Einzelfeuerstätten haben konstruktionsbedingt nicht die Möglichkeiten zur Optimierung der Ausbrandqualität wie Kesselanlagen. Aufgrund der geringeren Abmessungen sind die Verweilzeiten deutlich geringer, was zu höheren Anteilen an unvollständig ausgebrannten Komponenten im Abgas führt. Ein weitere Ursache des unvollständigen Ausbrands sind die bei den meisten modernen Einzelfeuerstätten eingebauten, großen Sichtscheiben die zu einer niedrigeren Brennraumtemperatur führen. Zusätzlich wirken beim Kaminofen auch die geringere Masse und das damit verbundene geringere Wärmespeichervermögen einem vollständigen Ausbrand entgegen. Hinzu kommt, dass das bei diesem Kaminofen angewendete Feuerungsprinzip des Durchbrandes zu einer stärkeren Ausprägung unterschiedlicher, teilweise ungünstiger Verbrennungsphasen führt, deren Nachteile auch durch regelungstechnische Eingriffe nur begrenzt ausgeglichen werden können.

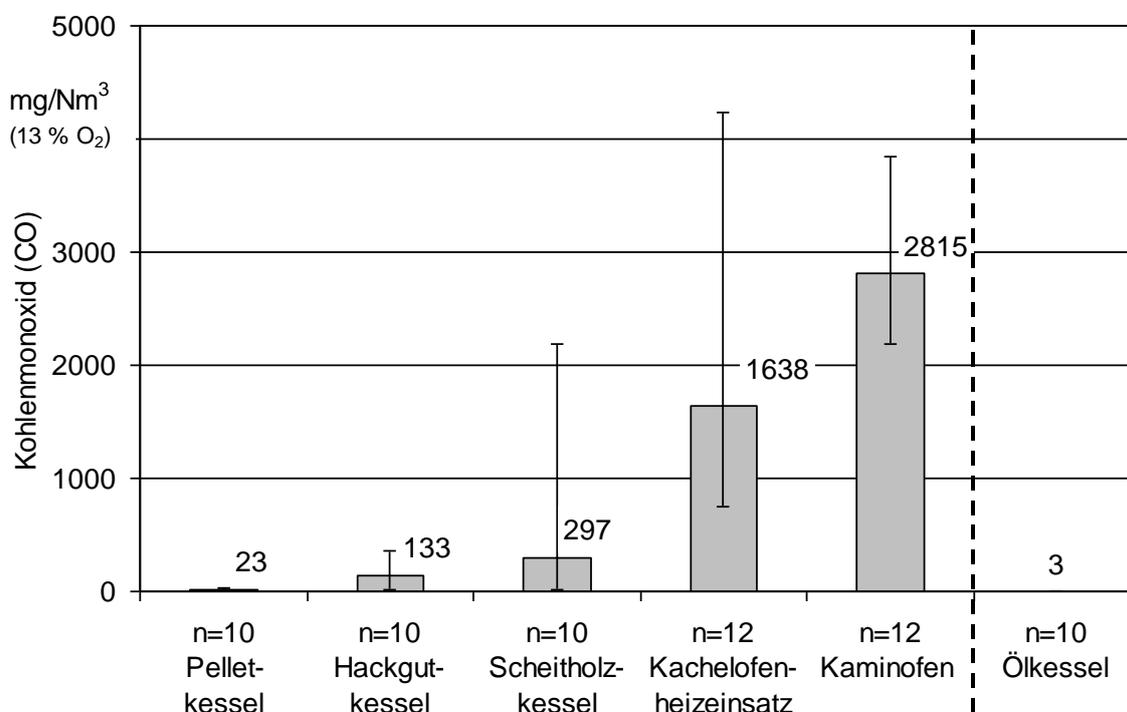


Abbildung 62: Mittlere Kohlenmonoxidemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen)

Neben Kohlenmonoxid sind die Emissionen an organischen Stoffen ein weiterer Indikator für die Ausbrandqualität. In Abbildung 63 sind die Mittelwerte der Gesamt-C-Emissionen für alle Feuerungsanlagen dargestellt. Hierbei zeigt sich das gleiche Bild wie bei den Kohlenmonoxidemissionen. Aufgrund des Ausfalls eines Messgerätes konnten die Werte für den Pellet- und den Scheitholzkessel nicht ermittelt werden. Jedoch auch ohne diese Werte kann von der gleichen Reihung der untersuchten Feuerungen wie bei den CO-Emissionen ausgegangen werden, da hier auch die gleichen Ursachen wirken.

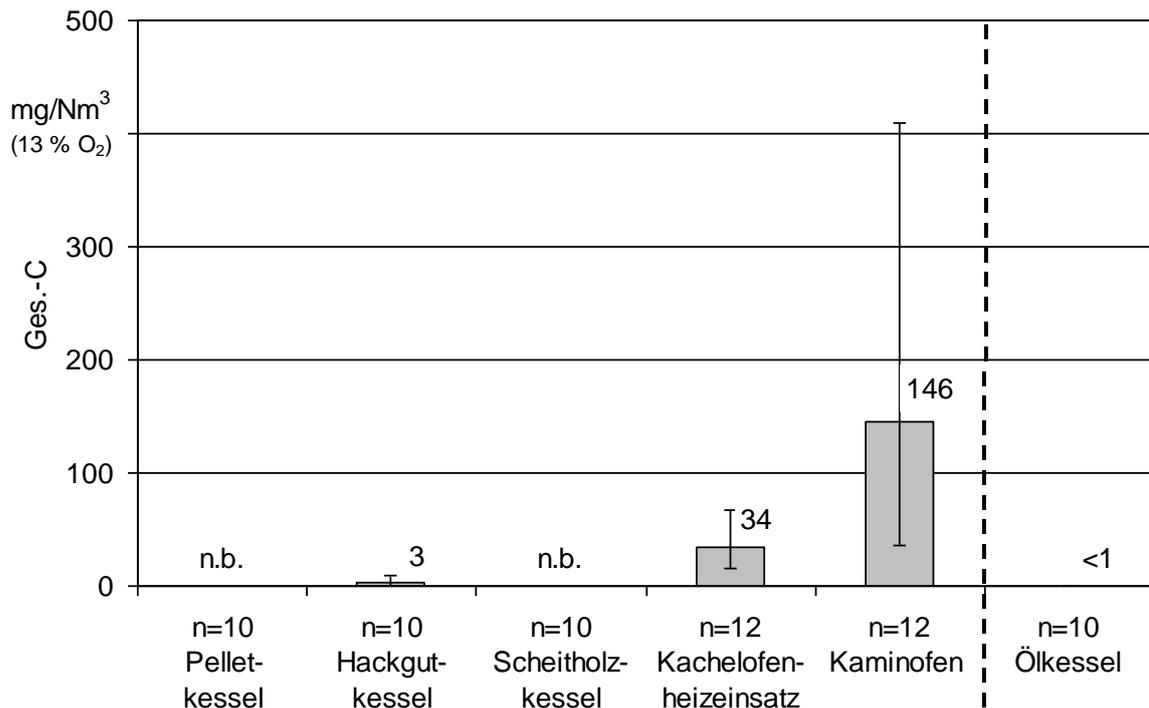


Abbildung 63: Mittlere Emissionen an organischen Stoffen (angegeben als Ges.-C) der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen; n.b. = nicht bestimmt)

Neben Kohlenmonoxid und organischen Stoffen (Ges.-C) wurden auch die Emissionen an Stickoxiden bestimmt. Die Mittelwerte der verschiedenen Feuerungsanlagen sind in Abbildung 64 dargestellt. Bei den Stickoxiden ergeben sich deutlich geringere Unterschiede zwischen den einzelnen Feuerungsanlagen. Für die beiden kontinuierlich beschickten Kesselanlagen (Pelletkessel, Hackgutkessel) wurden Werte um 190 mg/Nm^3 bestimmt, während bei den absätzig beschickten Anlagen (Scheitholzkessel, Kachelofeneinsatz, Kaminofen) Werte zwischen 140 und 160 mg/Nm^3 gemessen wurden.

Die wesentliche Ursache für die Stickoxidemissionen ist der im Brennstoff enthaltene Stickstoff, der jedoch nur zu einem geringen Anteil zu Stickoxiden oxidiert wird. Der überwiegende Anteil wird als molekularer Stickstoff (N_2) emittiert. Die geringfügig höheren Emissionen der beiden kontinuierlich beschickten Anlagen sind durch höhere Verbrennungstemperaturen und die damit verbundenen höheren Oxidationsraten zu erklä-

ren. Ein Hinweis auf niedrigere Verbrennungstemperaturen bei den beiden Einzelfeuerstätten wird auch durch die höheren Sauerstoffgehalte im Abgas gegeben. Die Einzelfeuerstätten haben hier Werte, die meist über 13 % liegen, während die Kesselanlagen meistens mit Sauerstoffgehalten unter 11 % betrieben wurden (vgl. hierzu Kapitel 5).

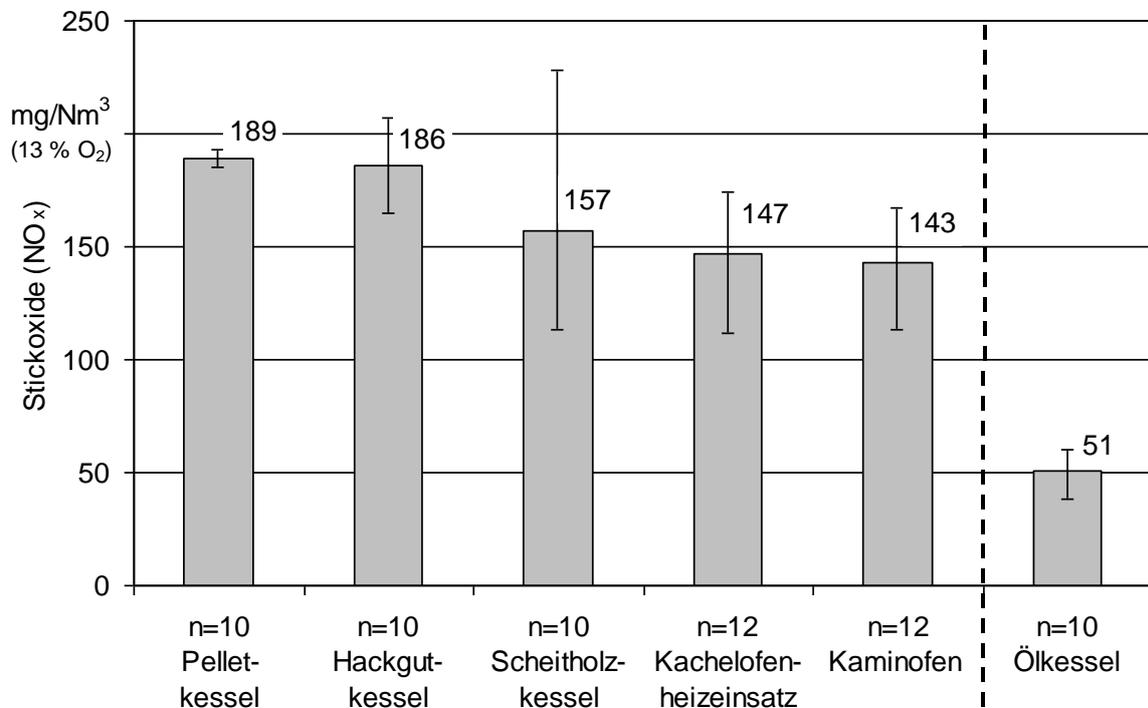


Abbildung 64: Mittlere Stickoxidemissionen der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40

7.3 Wirkungsgrad

Bei Einzelfeuerstätten erfolgt die Wärmeabgabe nicht – wie bei den Zentralheizungskesseln – über das Kesselwasser, sondern über Wärmestrahlung und Luftkonvektion, so dass eine Bestimmung des Kesselwirkungsgrades nach der direkten Methode hier nicht möglich wäre. Da aber sowohl Kesselanlagen als auch Einzelfeuerstätten hier gegenübergestellt werden sollen, kann für diesen Vergleich ausschließlich der nach der indirekten Methode bestimmte feuerungstechnische Wirkungsgrad herangezogen werden. Bei der Berechnung dieses feuerungstechnischen Wirkungsgrades werden die Verluste durch fühlbare Wärme im Abgas (Abgasverlust), die Verluste durch Unverbranntes im Abgas (verursacht durch den Gehalt an CO und Ges.-C) sowie die Verluste durch Unverbranntes in der Asche (unvollständiger Ausbrand) berücksichtigt.

Die Wirkungsgrade der untersuchten Holzfeuerungen sind in Abbildung 65 dargestellt. Die beiden kontinuierlich beschickten Kesselanlagen (Pelletkessel und Hackgutkessel) erreichten mit 93 % die höchsten Werte. Bei den beiden Einzelfeuerstätten kamen mit 76 % (Kachelofen) bzw. 66 % (Kaminofen) deutlich geringere Wirkungsgrade zustande. Der Scheitholz-kessel nimmt mit 88 % feuerungstechnischem Wirkungsgrad eine Mittelstellung ein.

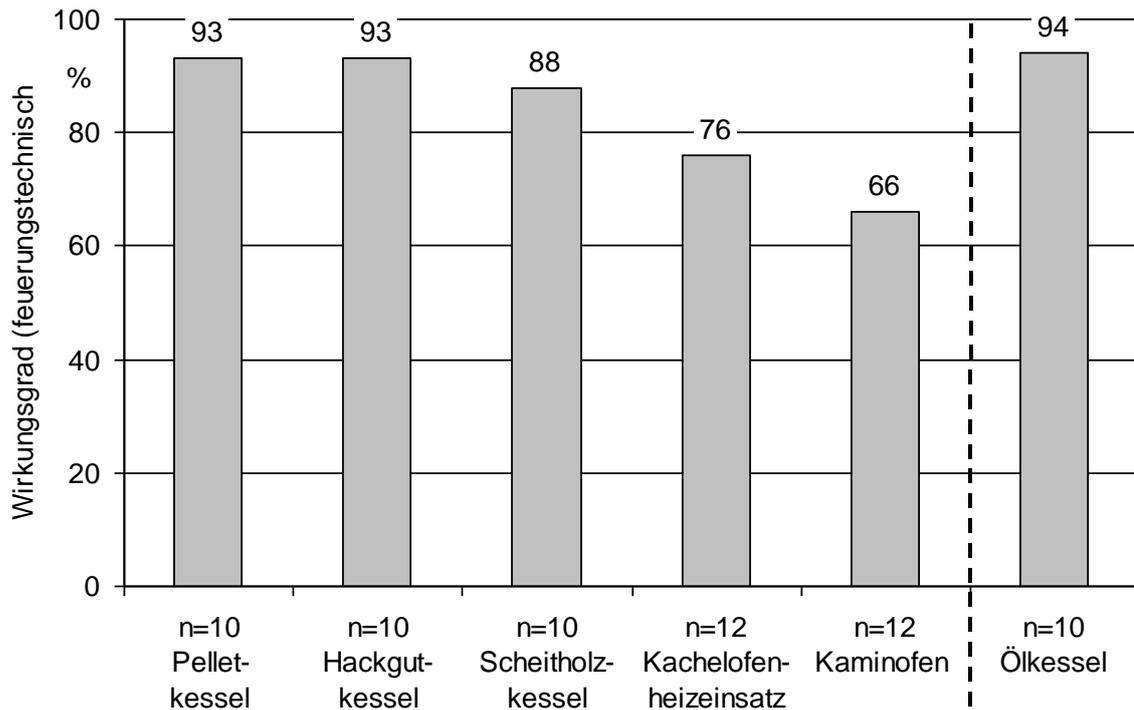


Abbildung 65: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad der untersuchten Feuerungen bei Berücksichtigung der Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40

Der größte Einzelbeitrag zum Gesamtverlust ist bei allen Feuerungen dem Verlust an fühlbarer Wärme im Abgas zuzuschreiben. Die hohen Verluste der Einzelfeuerstätten werden hier durch die hohen Abgastemperaturen und die aufgrund des höheren Luftüberschusses höheren Abgasvolumenströme verursacht. Die höheren Konzentrationen von CO und Ges.-C im Abgas der Einzelfeuerstätten tragen dagegen nur unwesentlich zur Wirkungsgradminderung bei, ihr Anteil am Gesamtverlust (Unverbranntes im Abgas) macht in den meisten Fällen weniger als 1 Prozentpunkt Einbuße im Wirkungsgrad aus.

7.4 Emissionen bezogen auf den Brennstoffeinsatz

Ergänzend zu den Angaben der Emissionen als Massenkonzentration werden in diesem Kapitel die Emissionen bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie angegeben. Diese Form der Berechnung wird teilweise zur Angabe von Grenzwerten verwendet. Hinzu kommt, dass diese Emissionsangabe auch für die Abschätzung von Emissionsfaktoren verwendet wird. Die Emissionen werden als Mittelwert der Versuche mit den Standardbrennstoffen entsprechend Tabelle 40 berechnet und sind in Abbildung 66 für die Parameter Gesamtstaub, Stickoxide, Kohlenmonoxid und organische Komponenten dargestellt.

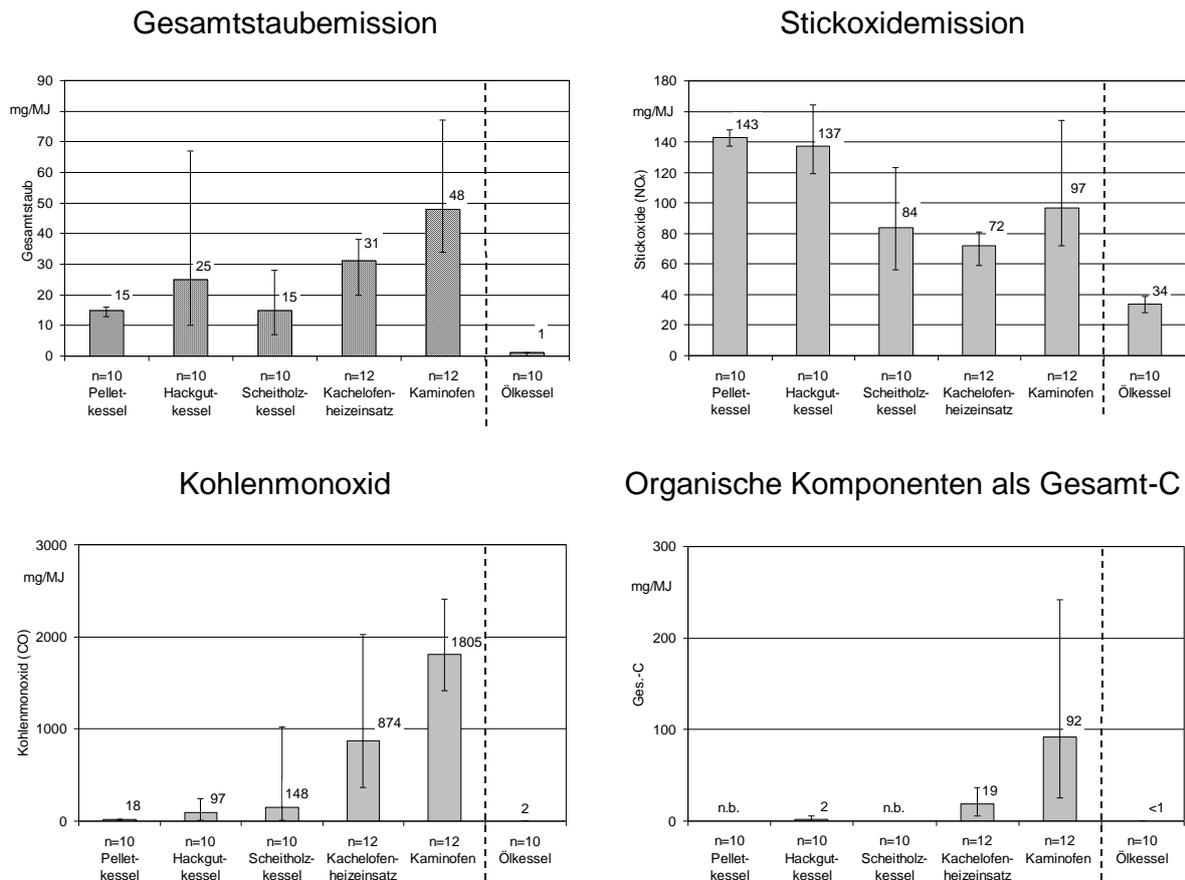


Abbildung 66: Emissionen von Gesamtstaub, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und organischen Komponenten der untersuchten Holzfeuerungen bezogen auf den Brennstoffeinsatz für die Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen; n.b. = nicht bestimmt)

Da für die untersuchten Feuerungen sehr ähnliche Brennstoffe verwendet wurden und auch bei den Betriebsbedingungen keine wesentlichen Unterschiede bestanden, ergeben sich auch für die Umrechnungsfaktoren von mg/Nm^3 auf mg/MJ für die einzelnen Feuerungen nur geringe Unterschiede. Die Werte in Abbildung 66 geben damit dieselben Verhältnisse wieder, die bereits in Kapitel 7.1 und 7.2 beschrieben wurden.

7.5 Ergebnisse der Prüfstandsmessungen bei der Typenprüfung

Im Folgenden werden die im Vorhaben gewonnenen Ergebnisse der Kapitel 7.1 und 7.2 den Messergebnissen gegenübergestellt, die bei den jeweiligen Typenprüfungen der untersuchten Feuerungen gewonnen wurden. Bei dieser Gegenüberstellung ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Gründen nur bedingt vergleichbar sind und daher eine Übereinstimmung nicht zwangsläufig zu erwarten ist. Die im Rahmen des Vorhabens am TFZ durchgeführten Messungen sollten den Praxisbetrieb unter

definierten und reproduzierbaren Bedingungen abbilden. Unterschiede in den Messergebnissen können durch folgende Ursachen begründet sein:

- **Einstellung der Anlage:** Vor der Typenprüfung ist üblicherweise Personal des Herstellers anwesend, das für eine optimale Einstellung der Anlage vor der Prüfung sorgt. Bei den Messungen am Prüfstand des TFZ wurden die Anlagen nach einer Unterweisung durch den Hersteller durch Personal des TFZ eingestellt.
- **Versuchsbrennstoffe:** Bei Typenprüfungen werden nur optimale Brennstoffe eingesetzt. Das TFZ verwendete dagegen handelsübliche Brennstoffe, die von einem kommerziellen Brennstoffhändler bezogen wurden.
- **Versuchsdauer:** Die Messung beginnt bei Typenprüfungen für Einzelfeuerstätten 3 Minuten nach der Brennstoffauflage und endet nach 30 Minuten. Bei den Messungen am Prüfstand wurde unmittelbar nach der Brennstoffauflage mit der Messung begonnen und die Messung erfolgte über die vollständige Abbrandperiode.
- **Staubmessung:** Die Messungen des TFZ wurden mit einem Verdünnungstunnel durchgeführt. Daher können aufgrund der Kondensation organischer Abgasbestandteile gegenüber den Messungen bei der Typenprüfung höhere Staubgehalte gemessen werden. Diese Unterschiede werden bei den Einzelfeuerstätten in den Ergebnisdarstellungen der Kapitel 5.5 und 5.6 jeweils ausgewiesen.

In Abbildung 67 sind die gemittelten Emissionen der Holzfeuerungen aus Abbildung 60 bis Abbildung 64 den Messwerten der untersuchten Anlagen bei den jeweiligen Typenprüfungen gegenübergestellt. Bedingt durch die vorstehend beschriebenen methodischen Unterschiede bei der Messung und Versuchsdurchführung ergeben sich teilweise deutliche Unterschiede.

Insbesondere bei den beiden Einzelfeuerstätten (Kachelofeneinsatz und Kaminofen) werden bei den Gesamtstaubemissionen durch das TFZ deutlich höhere Werte als bei der Typenprüfung gemessen, da hier durch den Verdünnungstunnel organische Komponenten kondensiert werden und zu einer Mehrung der Staubemissionen führen. Die Unterschiede bei den 3 Kesselanlagen (Pelletkessel, Hackgutkessel und Scheitholzessel) sind – in absoluten Zahlen – weniger gravierend und eher auf Unterschiede in der Methodik sowie auf die üblichen Schwankungen bei Messungen mit biogenen Brennstoffen zurückzuführen. Hinzu kommt, dass auch die Messunsicherheiten bei der Gesamtstaubbestimmung zunehmen, je niedriger die gemessenen Staubkonzentrationen im Abgas liegen.

Auch bei den Kohlenmonoxidemissionen sind die größten Unterschiede bei den beiden Einzelfeuerstätten erkennbar. Hier führen offensichtlich die Anstrengungen zur Optimierung der Anlageneinstellung und des Versuchsablaufes bei der Typenprüfung zu deutlich besseren Ergebnissen, zumal hierdurch auch die strengeren Grenzwerte des DIN_{plus}-Gütesiegels nachgewiesen werden sollen (vgl. hierzu Kapitel 2.1). Bei den Kesselanlagen sind die Unterschiede nicht mehr so deutlich, da bei diesen Anlagen insgesamt schon ein sehr niedriges Niveau hinsichtlich der Kohlenmonoxidemissionen erreicht ist.

Bei den Stickoxidemissionen sind lediglich bei den beiden kontinuierlich beschickten Kesselanlagen größere Unterschiede zu erkennen, während bei den handbeschickten

Anlagen (Scheitholzkessel, Kachelofeneinsatz und Kaminofen) eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wird. Die Unterschiede können beim Hackgutkessel eventuell noch durch die Brennstoffqualität erklärt werden. Für den Unterschied beim Pelletkessel ist aufgrund des standardisierten Brennstoffes zunächst keine Begründung offensichtlich.

Der Vergleich der Emissionen an gasförmigen organischen Stoffen ist lediglich für die beiden Einzelfeuerstätten sinnvoll, da bei 2 Kesselanlagen für die Messungen des TFZ wegen eines Messgeräteausfalls keine Werte vorliegen. Hier ergibt sich ein sehr uneinheitliches Bild. Während beim Kachelofenheizeinsatz durch das TFZ deutlich geringere Werte bestimmt wurden als bei der Typenprüfung, kehren sich die Verhältnisse beim Kaminofen um. Da beim Kaminofen auch bei den meist parallel verlaufenden CO-Emissionen in der Typenprüfung geringere Werte gemessen worden waren, als beim TFZ, erscheint der Wert bei den Ges.-C-Emissionen plausibel. Der hohe Wert für Ges.-C in der Typenprüfung des Kachelofens war jedoch wegen der gleichzeitig geringen CO-Emissionen nicht zu erwarten gewesen.

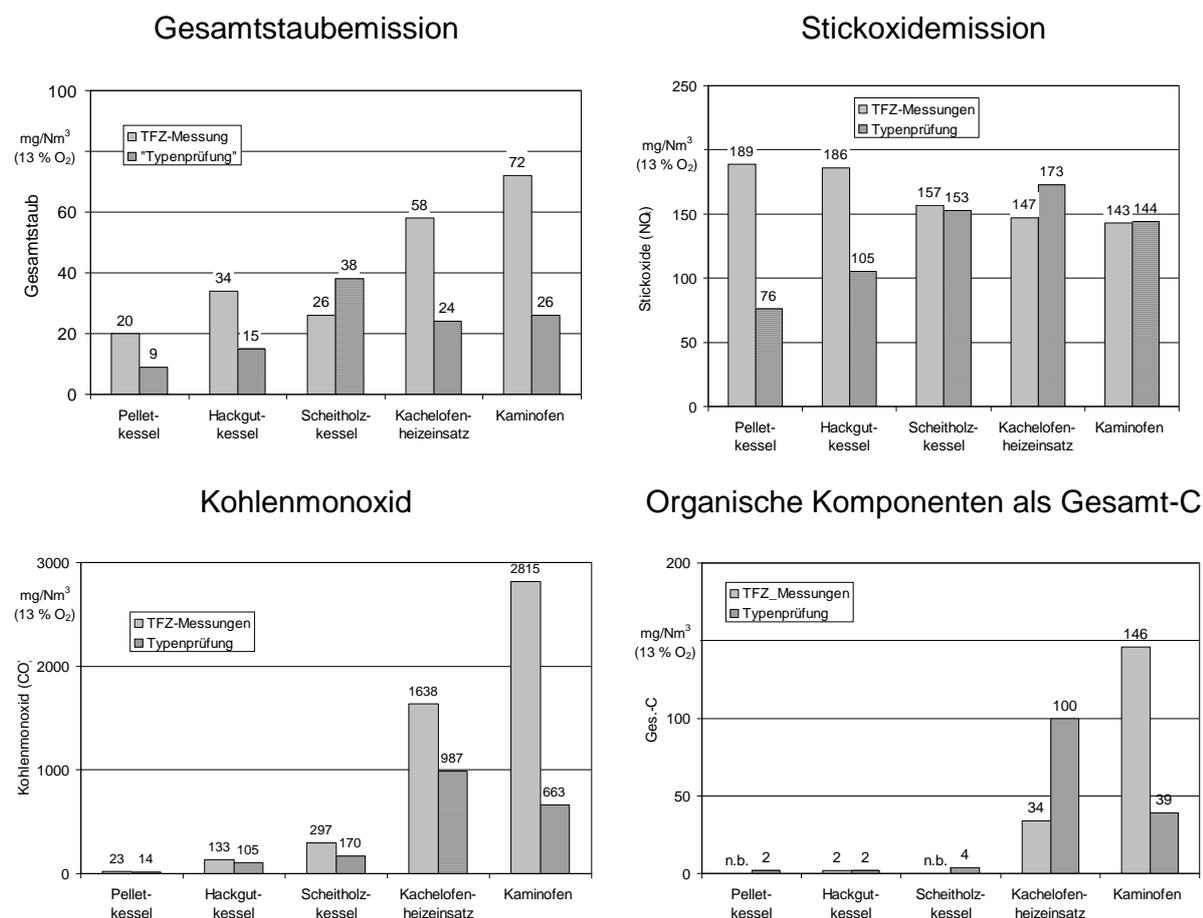


Abbildung 67: Emissionen von Gesamtstaub, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und organischen Komponenten der untersuchten Holzfeuerungen bei der Typenprüfung und bei den Standardversuchsvarianten gemäß Tabelle 40 (n = Anzahl Messungen; n.b. = nicht bestimmt)

8 Zusammenfassung

Als Feinstaub werden Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als $10\ \mu\text{m}$ bezeichnet; unterhalb von $2,5\ \mu\text{m}$ Durchmesser spricht man von lungengängigem Feinstaub. Solche Partikel gelten als besonders schädlich, wenn sie aus Verbrennungsprozessen stammen. Häusliche Feuerungsanlagen für Holzbrennstoffe tragen mit einem Anteil von ca. 10 % wesentlich zu den Feinstaubemissionen (PM_{10}) in Deutschland bei. Vor allem Einzelfeuerstätten und kleine Zentralheizungskessel für Scheitholz, Hackschnitzel oder Pellets, werden in letzter Zeit vermehrt als Verursacher angesehen. Über die tatsächlichen Emissionen unter variablen Einsatzbedingungen mit verschiedenen Brennstoffen und bei wechselndem Bedienerverhalten besteht allerdings noch ein hohes Maß an Unsicherheit. Auch Fragen nach den Minderungsmöglichkeiten bis hin zur Beschaffenheit dieser Stäube sind derzeit nur wenig erforscht worden. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsprojektes wurden daher die Feinstaubemissionen moderner Holzfeuerungen auf dem Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) bestimmt. Besondere Aufmerksamkeit wurde den verschiedenen Möglichkeiten zur Beeinflussung bzw. Minderung dieser Emissionen gewidmet. Neben der Brennstoffqualität (insbesondere dem Wassergehalt) wurden auch verschiedene Bedienerereinflüsse als Ursache für erhöhte Emissionen identifiziert.

Vorgehen. Die Messungen erfolgten an fünf Holzfeuerungen (Pelletkessel, Scheitholzkessel, Hackschnitzelkessel, Kachelofenheizeinsatz und Kaminofen) und einem Heizölkessel. Dabei wurde auch eine Bestimmung der Massenanteile des Staubausstoßes in den Größenklassen $<1\ \mu\text{m}$, 1 bis $2,5\ \mu\text{m}$, $2,5$ bis $10\ \mu\text{m}$ und $>10\ \mu\text{m}$ durchgeführt. Die Ermittlung der Korngrößenverteilung von Abgaspartikeln erfolgte mittels eines Kaskadenimpaktors; die Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes im Abgas wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 durchgeführt. Bei den Messungen an den beiden Einzelfeuerstätten wurde zusätzlich ein Verdünnungstunnel, in dem das Abgas auf Temperaturen unter $60\ ^\circ\text{C}$ (mittleres Verdünnungsverhältnis 1:5,7) abgekühlt wurde, eingesetzt, wobei sowohl im verdünnten als auch im unverdünnten Abgas gemessen wurde.

Stand der Staubemissionen. Für die Versuche wurden Holzfeuerungen ausgewählt, die den aktuellen Stand der Technik repräsentieren. Die drei Kesselanlagen verursachen Staubemissionen zwischen 20 und $34\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ (bei 13 % O_2), wobei der niedrigste Wert vom Pelletkessel erreicht wird. Die Staubemissionen der beiden Einzelfeuerstätten liegen mit 58 bzw. $72\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ deutlich darüber. Das insgesamt niedrige Niveau der Staubemissionen zeigt den inzwischen erreichten hohen Entwicklungsstand moderner Holzfeuerungen, zumal in Deutschland für Zentralheizungskessel über $15\ \text{kW}$ Nennwärmeleistung noch der bis März 2010 geltende Staubgrenzwert von $150\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ deutlich unterschritten wird.

Korngrößenverteilungen. Die Korngrößenverteilungen der Stäube aus den jeweiligen Feuerungen weisen kaum Unterschiede auf. Im Mittel sind lediglich geringe Anteile von 2 bis 12 % der Korngrößenklasse $>10\ \mu\text{m}$ zuzuordnen und gelten damit nicht als Feinstaub. Dagegen lassen sich etwa 70 bis 90 % der Staubmasse der Größenfraktion mit

weniger als 1 µm aerodynamischem Durchmesser zuordnen. Da sich die verschiedenen Feuerungssysteme hier nur wenig unterscheiden, ist die Gesamtstaubemission als die wesentliche Bewertungskenngröße anzusehen.

Brennstoffeinflüsse. Die Brennstoffqualität kann einen entscheidenden Einfluss auf Höhe und Qualität der Feinstaubemissionen einer Holzfeuerung haben. Als wesentliche Kriterien sind der Wasser- und Aschegehalt sowie die Brennstoffaufbereitung zu nennen, während die verwendete Holzart meist nur einen geringen Einfluss ausübt. Beim Wassergehalt, beispielsweise, sind die Staubemissionen eines Scheitholzkessels bis ca. 23 % unbeeinflusst. Erst die weitere Steigerung des Wassergehaltes auf 31 % zeigt ein deutliches Ansteigen der Staubemissionen auf über 400 mg/Nm³. Brennstoffe mit Wassergehalten dieser Größenordnung können von der hier eingesetzten Feuerung nicht mehr emissionsarm verbrannt werden. Damit werden auch die Herstellerempfehlungen bestätigt, die einen maximalen Wassergehalt von 25 % nennen. Für Einzelfeuerstätten ist eine geringere Wassergehaltsobergrenze festzustellen, da bereits Brennstoffwassergehalte zwischen 20 und 25 % zu einem merklichen Anstieg der organischen Abgasbestandteile führen.

Neben dem Wassergehalt kann auch die Brennstoffaufbereitung einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten einer Feuerung haben. Insbesondere bei Einzelfeuerstätten besteht ein entscheidender Einfluss der Scheitgröße auf die Staubemissionen. Hierbei zeigt sich beispielsweise, dass sowohl relativ kleine als auch relativ große Scheite (bei gleicher Länge und gleicher Gesamtmasse) zu einem Anstieg der Staubemissionen führen können, wobei zu große Scheite kritischer zu beurteilen sind als zu kleine.

Dies wird insbesondere bei Betrachtung der Messwerte im verdünnten Abgas deutlich. Der Einsatz des großen Scheites führt zu unvollständiger Verbrennung mit hohem Gehalt an gasförmigen organischen Verbindungen im Abgas. Bei diesen Betriebsbedingungen besteht auch ein großes Potenzial an kondensierbaren Stoffen im Abgas. Diese im heißen Abgas gasförmigen Stoffe kondensieren bei der Verdünnung und der damit verbundenen Abkühlung und werden als zusätzliche Partikelmasse erfasst. Bei Messungen im verdünnten Abgas werden somit die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten noch deutlicher und zum Teil werden auch erheblich höhere Staubemissionen gemessen. Das gilt vor allem dann, wenn die Verbrennung relativ unvollständig verläuft.

Bedienungseinflüsse. Der Bediener der Feuerung kann auf mancherlei Weise Einfluss auf die Schadstoffemissionen ausüben. Das gilt vor allem für die Wahl der Brennstoffmenge. Am Beispiel der Staubemissionen eines Kachelofeneinsatzes bei verschiedenen Auflagemengen wird dies deutlich. Die mittlere Menge mit 4,5 kg entspricht dabei der Herstellerempfehlung. Die Staubemission, die im unverdünnten Abgas gemessen wurde, stieg mit zunehmender Auflagemenge von 29 mg/Nm³ auf 51 mg/Nm³. Bei Betrachtung der Messung im verdünnten Abgas zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Hier führen sowohl die kleinere als auch die größere Brennstoffauflage zu höheren Emissionen.

Sekundärmaßnahmen. Wenn die Schadstoffbildung nicht schon bei der Entstehung vermieden bzw. vermindert werden kann, können die Staubemissionen auch mit Hilfe

von nachträglichen ("Sekundär-")Maßnahmen abgeschieden werden. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden zwei Nachbehandlungssysteme, ein elektrostatischer Abscheider (Spanner R²) sowie ein Wärmetauscher zur nachträglichen Abgaskondensation (SGL Carbon) untersucht.

Beim Einbau in den Rauchgasweg eines 30 kW-Scheitholzkessels erreichte der Elektroabscheider während der durchschnittlichen Messdauer von ca. 60 Minuten in insgesamt 15 Versuchen nahezu durchweg Reingas-Staubgehalte von unter 10 mg/Nm³. Dabei wurden meist Abscheidegrade von 80 bis 90 % erzielt. Die Auswirkungen auf die Korngrößenverteilung im Staub blieben gering, es kam lediglich zu einer leichten Verschiebung zu mehr Submikronpartikeln, d. h. es werden mehr grobe als feine Partikel abgeschieden.

Auch der Einbau eines Sekundärwärmetauschers mit Kondensationswirkung (Brennwerttechnik) führte zu einer signifikanten Minderung der Staubkonzentration über das ablaufende Kondensat. Dieser Effekt wurde in mehreren Versuchsreihen nachgewiesen. Vor allem bei den Fichtenhackschnitzeln ohne Rinde ließen sich Abscheidegrade von ca. 35 % erreichen. Weniger gut war die Abscheidung dagegen bei den Versuchen mit Rinde und Buchenhackschnitzeln. Im Mittel ist somit von einer Staubkonzentrationsminderung im Abgas in Höhe von ca. 30 % auszugehen. Außerdem kommt es zu einer veränderten Korngrößenverteilung der anfallenden Stäube, da auch hier vornehmlich die größeren Partikel abgeschieden werden. Mit dem Einbau eines derartigen Sekundärwärmetauschers kann zudem der Wärmeertrag nennenswert gesteigert werden was zu einer entsprechend höheren Brennstoffausnutzung führt. Im Mittel über alle Versuche lag diese Wirkungsgradsteigerung bei 10 Prozentpunkten.

Messtechnische Konsequenzen. Die Ergebnisse einer Staubbestimmung können durch den Versuchsaufbau stark beeinflusst werden. Bei Vorhandensein von kondensierbaren organischen Substanzen im Abgas kommt es bei deren Abkühlung zu einer Erhöhung der gemessenen Staubkonzentration infolge von Kondensation. Wenn mit Abgasverdünnung zur Erreichung möglichst realitätsgetreuer Emissionsbedingungen gearbeitet wird ist – je nach Konzentration der gasförmigen organischer Kohlenstoffverbindungen (d. h. Ges.-C) – mit einem Staub-Mehrfund von bis zu 400 % und darüber zu rechnen. Diese Beobachtung gilt vor allem für Messungen an Einzelfeuerstätten.

Fazit. Durch die Ausschöpfung aller Möglichkeiten ist insbesondere bei den handbeschickten Einzelfeuerstätten auch ohne Sekundärmaßnahmen (Staubabscheider) noch eine erhebliche Reduzierung der Staubemissionen erreichbar. Beispielsweise können durch den Einsatz geeigneter Einrichtungen zur Regelung und Feuerungsüberwachung bei Einzelfeuerstätten Fehlbedienungen, die zu höheren Emissionen führen, vermieden werden. Weitere Minderungen sind durch gezielte Verbesserung der Brennstoffqualität zu erreichen. Niedrige Wasser- und Aschegehalte im Brennstoff sowie eine an die Feuerung angepasste Scheitgröße führen ebenfalls zur Senkung der Staubemission. Das Gleiche gilt auch für die strikte Einhaltung der Herstellervorgaben hinsichtlich der jeweils nachzulegenden Brennstoffmenge.

9 Quellenverzeichnis

- [1] Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. (2. vollst. überarbeitete - Auflage). Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2007, 224 S.
- [2] MSI - Marketing Research for Industry Ltd: Der Markt für moderne Feuerstätten - Deutschland. Frankfurt: Eigenverlag (2004); 155 S.
- [3] DinCertco 2005: Zertifizierungsprogramm: Kaminöfen für feste Brennstoffe mit schadstoffarmer Verbrennung nach DIN 18891 und DIN 18891/A2 (Stand: April 2005). DIN CERTCO, Berlin, www.dincertco.de
- [4] DinCertco 2005: Zertifizierungsprogramm: Kamineinsätze und -kassetten für feste Brennstoffe mit schadstoffarmer Verbrennung nach DIN 18895 (Stand: April 2005). DIN CERTCO, Berlin, www.dincertco.de
- [5] DinCertco 2005: Zertifizierungsprogramm: Kachelofen- und/oder Putzofen-Heizeinsätze für feste Brennstoffe mit schadstoffarmer Verbrennung nach DIN EN 13229 (Stand: April 2005). DIN CERTCO, Berlin, www.dincertco.de
- [6] Kaminkehrer-Innung Niederbayern: Unveröffentlichte Erhebung zu Kaminkehrermessungen in Niederbayern für 2004. Kaminkehrer-Innung Niederbayern, Moosthenning
- [7] HKI – Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V., Frankfurt. Schreiben vom 09.03.2006
- [8] DIN EN 303-5, Teil 5 (06/1999): Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistungen bis 300 kW. Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag
- [9] DIN EN 304 (01/2004): Heizkessel - Prüfredeln für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag
- [10] VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung – Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag
- [11] VDI 2066, Blatt 2 (08/1993): Messen von Partikeln - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte - Filterkopfgeräte. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag
- [12] VDI 2066, Blatt 3 Entwurf (04/1986): Messen von Partikeln - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag
- [13] VDI 2066, Blatt 7 (08/1993): Messen von Partikeln - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte - Planfilterkopfgeräte. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag
- [14] VDI 2066, Blatt 5 (11/1994): Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen; Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren – Kaskadenimpaktor. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag

- [15] DIN 18891 - 1 (12/1992): Kaminöfen für feste Brennstoffe; Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [16] DIN EN 13229 (10/2005): Kamineinsätze einschließlich offene Kamine für feste Brennstoffe - Anforderungen und Prüfungen; Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag
- [17] DIN 51731 (10/1996): Prüfung fester Brennstoffe - Preßlinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung; Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag
- [18] DIN 51603 – 1 (09/2003): Flüssige Brennstoffe - Heizöle - Teil 1: Heizöl EL; Mindestanforderungen; Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag
- [19] Hartmann, H.; Roßmann, P.; Link, H.; Marks, A. (2004): Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher. Berichte aus dem TFZ, Nr. 2, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Selbstverlag, Straubing, 49 S.
- [20] Hartmann, H.; Roßmann, P.; Turowski, P.; Link, H., Marks, A. (2006): Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden. Berichte aus dem TFZ, Nr. 10, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Selbstverlag, Straubing, 84 S.
- [21] DIN CEN/TS 14961 (05/2005): Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen; Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag
- [22] BMU 2008: Entwurf der Novelle "Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen", 1.BImSchV), Kabinettvorlage 2008

Berichte im Rahmen dieser Schriftenreihe

Berichte aus dem TFZ:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion - Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte –
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse aus bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis -
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente im Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen - Marktüberlegungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen

