

**Universität Stuttgart**

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)  
Universität Stuttgart

**Überprüfung der Wirksamkeit von Staubabscheidern  
für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 30972 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Michael Struschka

Patricia Winter

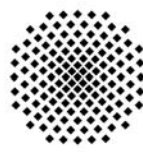
Günter Baumbach

März 2015

© 2015

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)  
Universität Stuttgart

Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichts: <http://www.ifk.uni-stuttgart.de/>



**Abteilung  
Reinhaltung der Luft**

## **Überprüfung der Wirksamkeit von Staubabscheidern für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 30972 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Michael Struschka  
M.Sc. Patricia Winter  
Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Baumbach

31. März 2015



**Institut für Feuerungs- und  
Kraftwerkstechnik (IFK)**



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30972</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>107.600 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Überprüfung der Wirksamkeit von Staubabscheidern für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe</b>				
<b>Stichworte</b>	Staubabscheider, Abscheideleistung, Biomassefeuerungen, 1. BImSchV, DIN SPEC 33999				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>18 Monate</b>	<b>2.6.2013</b>	<b>2.12.2014</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	nach Absprache				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Universität Stuttgart Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Pfaffenwaldring 23 70569 Stuttgart			Tel	0711 685-63487
				Fax	0711 685-63491
				Projektleitung	Dr.-Ing. Michael Struschka
				Bearbeiter	M.Sc. Patricia Winter
<b>Kooperationspartner</b>					

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Im privaten Bereich werden kleine Holzfeuerungen verstärkt zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt. In den Kleinf Feuerungsanlagen ist die Verbrennung oftmals nicht optimal, so dass erhöhte Emissionen, u.a. von Feinstäuben, entstehen. Deshalb werden inzwischen von verschiedenen Herstellern nachrüstbare Staubabscheider angeboten. In diesem Projekt sollen einheitliche und reproduzierbare Methoden (Prüfbedingungen) zur Überprüfung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern für chargenweise beschickte Einzelraumfeuerstätten im Geltungsbereich der 1. BImSchV entwickelt, erprobt und validiert werden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Zur Festlegung von Prüfbedingungen für die Überprüfung und Bewertung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern für Einzelraumfeuerstätten sowie zur Erprobung und Validierung der Methode sollen Prüfstandsversuche an Kaminöfen mit nachgeschalteten Staubabscheidern durchgeführt werden. Bei den Abbränden sollen die Verbrennungsbedingungen so gewählt werden, dass gute, schlechte bzw. auch sehr schlechte Bedingungen eingestellt werden, wodurch zum einen die Konzentration von Produkten unvollständiger Verbrennung ansteigt und zum anderen sich auch die Partikeleigenschaften ändern. Hierbei ist zu klären, inwieweit reproduzierbare Abbrandverläufe bei den unterschiedlichen Bedingungen bei diesen Feuerstätten erreicht werden können.

Des Weiteren wird untersucht, welche Anforderungen an den Prüfstandsaufbau, die Messstellen und die eingesetzte Staubmesstechnik zu stellen sind, damit verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse mit bekannten Messunsicherheiten erhalten werden. Festzulegen ist hier u.a., ob vor und nach Staubabscheider zeitgleich zu messen ist, ob neben einer Staubmesseinrichtung nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 auch andere Messverfahren geeignet sind und wie lange die einzelnen Staubprobenahmen dauern sollen.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Als Endergebnis der durchgeführten Untersuchungen steht ein angepasstes Prüfverfahren für Staubabscheider in Kombination mit Einzelraumfeuerstätten zur Verfügung, welches in der Norm DIN SPEC 33999 (Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, Dezember 2014) beschrieben wird. Wesentliche Erkenntnisse aus den Untersuchungen wurden bei der Ausarbeitung dieser Norm für den Bereich „Prüfung von Abscheidern für handbeschickte Feuerungen ohne Gebläse“ berücksichtigt. Dies betrifft u.a. die Anforderungen an den Aufbau des Prüfstandes und der eingesetzten Messtechnik, die Ausführung der Messstrecken für die Staubprobenahmen und die Festlegung der Prüfbedingungen bei den Abbrandversuchen. Außerdem erfolgten anhand der Erfahrungen aus diesem Projekt die Festlegungen zum Betrieb der Feuerstätten, die Durchführung der Staubmessungen, die Auswertung und die Bewertung der Messungen.

Die größte Unsicherheit bei der Bewertung der Abscheidegrade für die nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen ergibt sich bei einer großen Streuung der Ergebnisse, wie dies z.B. beim untersuchten Elektrofilter A der Fall war. In der Norm wurde zur Begrenzung des Prüfaufwandes festgelegt, dass je Abgaszustand, d.h. je Verbrennungsqualität, 5 Staubmessungen zur Bestimmung des Abscheidegrades durchzuführen sind. Hierdurch können sich hohe Standardabweichungen für den berechneten Abscheidegrad ergeben (z.B. Werte im Bereich des Elektrofilters A). Eine Anforderung an eine einzuhaltende Standardabweichung, und damit an eine Begrenzung der Unsicherheit der Abscheidegradbestimmung, hätte in diesen Fällen eine wesentliche Erhöhung des Prüfaufwandes zur Folge.

Um die Aussagekraft der Prüfergebnisse zu erhöhen und um Staubminderungseinrichtungen mit stabilen Abscheidegraden nicht zu benachteiligen, wurde in der Norm die Ermittlung eines signifikanten Abscheidegrades eingeführt, indem die erweiterte Ergebnisunsicherheit (d.h. bei 5 Messwerten zum Abscheidegrad ungefähr die 2,7 fache Standardabweichung) berücksichtigt wird.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Wesentliche Projektergebnisse wurden in die Norm DIN SPEC 33999 (Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, Dezember 2014) übernommen und sind damit allgemein zugänglich.

## ***Fazit***

Im Rahmen dieses Projekts wurden grundlegende Untersuchungen zur Festlegung von Prüfbedingungen für die Überprüfung und Bewertung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern für Einzelraumfeuerstätten durchgeführt. Wesentliche Untersuchungsergebnisse wurden bei der Ausarbeitung der entsprechenden berücksichtigt und sind Bestandteil der Prüfnorm.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangslage und Zielsetzung .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Holzverbrennung und Partikelentstehung.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau .....</b>	<b>10</b>
4.1	Aufbau des Prüfstands .....	10
4.2	Messtechnik.....	11
4.3	Kaminöfen.....	15
4.4	Staubabscheider.....	20
<b>5</b>	<b>Voruntersuchungen .....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Versuchsergebnisse der Gerätekombinationen.....</b>	<b>28</b>
6.1	Kombination Kaminofen 1 mit Elektrofilter A .....	28
6.2	Kombination Kaminofen 2 mit Elektrofilter A .....	40
6.3	Vergleich Kombination Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter A.....	44
6.4	Kombination Kaminofen 1 mit Elektrofilter B .....	46
6.5	Kombination Kaminofen 2 mit Elektrofilter B .....	51
6.6	Vergleich Kombination Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter B.....	55
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>60</b>





## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Funktionsprinzip Partikelaufladung und -abscheidung in einem Elektrofilter (Kaltschmitt et al., 2009).....	2
Abbildung 3.1	Abbrandverhalten von Holz (Kaltschmitt et al., 2009) .....	6
Abbildung 3.2	Arten und Eigenschaften von Partikeln aus der Holzverbrennung (Nussbaumer, 2010).....	8
Abbildung 3.3	Partikelarten und ihre Eignung für Elektroabscheider (Lauber und Nussbaumer, 2010).....	9
Abbildung 3.4	Zusammenhang zwischen Partikelanzahlkonzentration und Partikelgröße (Mobilitätsdurchmesser) für die Verbrennungsphasen Start - Betrieb - Ausbrand bei einem Speicherofen (Wieser et al., 2001) .....	9
Abbildung 4.1	schematischer Versuchsaufbau mit Messgrößen und Messstellen.....	11
Abbildung 4.2	schematischer Messaufbau (Axarlis, 2011) für die gravimetrische Staubbestimmung nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) (oben) und Weg des Probengases (unten).....	13
Abbildung 4.3	Verfahrensschritte für die Behandlung der Filterhalter (links) und der Spülgläser (rechts) bei der Bestimmung der Staubkonzentration im Abgas der Kaminöfen .....	14
Abbildung 4.4	Kaminofen 1 vom Typ Lagos des Herstellers Hase (2012) .....	16
Abbildung 4.5	Kaminofen 2 vom Typ blueline 4W des Herstellers Buderus (2007) .....	17
Abbildung 4.6	Holzaufgabe im Kaminofen 1 .....	18
Abbildung 4.7	Beispielhafte Verläufe der CO <sub>2</sub> - und CO-Konzentrationen bei guter Verbrennung (oben) und bei schlechter Verbrennung (unten) beim Kaminofen 2 .....	20
Abbildung 4.8	Aufbau des elektrostatische Staubabscheider vom Typ Zumikron der Firma Kutzner + Weber GmbH (nach Rüegg, 2015) .....	21
Abbildung 4.9	Prototyp des ITC am KIT (links, Bologna und Woletz, 2014) und Coronaentladung in einem rohrförmigen Reaktor (rechts, Paur et al., 2012) .....	22
Abbildung 5.1	Messpositionen im Abgasrohr zur Untersuchung des Konzentrationsprofils .....	25
Abbildung 6.1	Staubablagerungen an der Düse der Entnahmesonde für die Staubmessung an Messstelle 2 (links) und zugehöriger Staubfilter mit Staubagglomeraten .....	29
Abbildung 6.2	Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung).....	33
Abbildung 6.3	Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung).....	36
Abbildung 6.4	Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter	

	Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / Hauptverbrennung).....	39
Abbildung 6.5	Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 2 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung).....	43
Abbildung 6.6	Mittelwerte der Staubkonzentrationen im Rohgas, der Abscheidegrade sowie der Standardabweichungen für die Kombination Kaminofen 1 und 2 mit jeweils Elektrofilter A .....	45
Abbildung 6.7	Untersuchungsergebnisse von Kiener et al. (2010) mit Elektrofilter Zumikron in Kombination mit Kaminofen Moon des Herstellers Wodtke .....	46
Abbildung 6.8	Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung).....	50
Abbildung 6.9	Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 2 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung).....	54
Abbildung 6.10	Mittelwerte der Staubkonzentrationen im Rohgas, der Abscheidegrade sowie der Standardabweichungen für die Kombination Kaminofen 1 und 2 mit jeweils Elektrofilter B .....	56
Abbildung 9.1	Fotos eines Staubaufbaus (oben) und einer Sonde zur Staubprobenahme für die gravimetrische Staubbestimmung nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [2006].....	60
Abbildung 9.2	Einbausituation Abscheider Zumikron der Firma Kutzner + Weber GmbH .....	61
Abbildung 9.3	Einbausituation Prototyp des Instituts für Technische Chemie (ITC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).....	62

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Übersicht über Staubabscheider mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt (Stand März 2015).....	3
Tabelle 2.2	Übersicht über Einbaumöglichkeiten und beispielhafte Entwicklungen von Kleinelektrofiltern (Quelle der Abbildungen: Turowski, 2011).....	4
Tabelle 3.1	Partikeltypen aus der Verbrennung von Holz (Oser et al , 2003).....	7
Tabelle 4.1	Abstände der Messstellen (MS) im Versuchsaufbau.....	10
Tabelle 4.2	Messgeräte, Messprinzipien und Prüfgaskonzentrationen.....	12
Tabelle 4.3	Staubkonzentrationen an den Messstellen 0, 2 und 4 bei zeitgleicher Probenahme über 30 Minuten sowie Holzaufgabemengen, Unterdrücke im Abgasrohr, Gaskonzentrationen und Gastemperaturen.....	15
Tabelle 4.4	Angaben zum Kaminofen 1 vom Typ Lagos des Herstellers Hase (2012) .....	16
Tabelle 4.5	Angaben zum eingesetzten Buchenholz .....	18
Tabelle 4.6	Einstellung der Luftschieber beim Kaminofen 2 für Messungen bei guter Verbrennung.....	19
Tabelle 4.7	Anforderungen und Eigenschaften Partikelabscheider Zumikron [7] .....	22
Tabelle 5.1	Dichtheitsüberprüfung der Messtrecke anhand eines Abbrandversuchs mit Braunkohlenbriketts .....	24
Tabelle 5.2	Messwerte der Untersuchung des Konzentrationsprofils an den Messstellen 1 und 2 und der Referenzmessstelle 0 (hier: Position b in der Rohrmitte).....	25
Tabelle 5.3	Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 bei zeitgleicher Probenahme über 30 Minuten sowie Holzaufgabemengen, Unterdrücke im Abgasrohr, Gaskonzentrationen und Gastemperaturen.....	27
Tabelle 6.1	Staubkonzentrationen an den Messstellen 0, 2, 4 bzw. 4 und 5 sowie Holzaufgabemengen, Unterdrücke im Abgasrohr, Gaskonzentrationen und Gastemperaturen (Messreihen 1-3: 30 Minuten Probenahmedauer / Messreihen 5-7: 15 Minuten Probenahme).....	29
Tabelle 6.2	Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 1 und Elektrofilter A.....	30
Tabelle 6.3	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	31
Tabelle 6.4	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	32
Tabelle 6.5	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung).....	34
Tabelle 6.6	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und	

	Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung).....	35
Tabelle 6.7	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / gute Verbrennung / Hauptverbrennung).....	37
Tabelle 6.8	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / schlechte Verbrennung / Hauptverbrennung).....	38
Tabelle 6.9	Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 2 und Elektrofilter A.....	40
Tabelle 6.10	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	41
Tabelle 6.11	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	42
Tabelle 6.12	Mittelwerte und mittlere Standardabweichungen der Gas- und Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 bzw. 4 für die Kombinationen Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter A .....	44
Tabelle 6.13	Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 1 und Elektrofilter B.....	47
Tabelle 6.14	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	48
Tabelle 6.15	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	49
Tabelle 6.16	Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 2 und Elektrofilter B.....	51
Tabelle 6.17	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	52
Tabelle 6.18	Betriebsparamter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung).....	53
Tabelle 6.19	Mittelwerte und mittlere Standardabweichungen der Gas- und Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 bzw. 4 für die Kombinationen Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter B .....	55

## **Kurzfassung**

Bedingt durch die stetig steigenden Preise für Erdöl und Gas und um nachwachsende Energieträger stärker zu nutzen, werden Holzbrennstoffe vermehrt als Zusatzheizung eingesetzt. Der Absatz und die Bestandszahlen von Einzelraumfeuerstätten nehmen deshalb seit einigen Jahren kontinuierlich zu. Diese tragen somit immer stärker zum Feinstaubaufkommen aus Holzfeuerungen bei. Um den weiteren Anstieg der Biomassenutzung durch diese kleinen Feuerungen nicht zu stoppen, arbeiten Feuerstättenhersteller und Zulieferer aus diesem Bereich an technischen Lösungen, um die Feinstaubemissionen aus Feuerstätten zu reduzieren. Eine mögliche Sekundärmaßnahme zur Minderung der Staubemissionen bei Einzelraumfeuerstätten besteht im Einsatz von elektrostatischen Partikelabscheidern, die entweder direkt in die Feuerstätte integriert sein kann oder im Abgasweg installiert ist. Bislang existiert jedoch weder auf europäischer Ebene noch in Deutschland eine Vereinbarung über ein Prüfverfahren, um die Qualität von Abscheidern verschiedener Hersteller zu vergleichen bzw. einen „Normabscheidegrad“ als Vergleichskriterium zuverlässig zu bestimmen.

In diesem Projekt wurde deshalb am Beispiel von zwei Kaminöfen und zwei elektrostatischen Staubabscheidern untersucht, wie eine einheitliche und reproduzierbare Methode zur Überprüfung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern gestaltet werden könnte.

Zur Untersuchung der Einflüsse von Randbedingungen (z.B. Messpositionen, Probenahmedauer und Zeitpunkt der Probenahme während dem Abbrandverlauf, Feuerstättentyp, Brennstoff) auf die Bestimmung der Staubkonzentration vor und nach Staubabscheidern und damit die ermittelte Wirksamkeit wurden umfangreiche Prüfstandsmessungen mit den ausgewählten Kaminöfen und Elektrofiltern mit dem Brennstoff Buchenholz durchgeführt.

Die wesentlichen Untersuchungsergebnisse wurden bei der Ausarbeitung der Norm DIN SPEC 33999 (Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, Dezember 2014) im Bereich „Prüfung von Abscheidern für handbeschickte Feuerungen ohne Gebläse“ berücksichtigt. Somit steht jetzt ein erstes abgestimmtes Prüfverfahren für nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen für Anlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV zur Verfügung.



## 1 Einleitung

Bedingt durch die stetig steigenden Preise für Erdöl und Gas und um nachwachsende Energieträger stärker zu nutzen, werden Holzbrennstoffe vermehrt als Zusatzheizung eingesetzt. Der Absatz und die Bestandszahlen von Einzelraumfeuerstätten (z.B. Kaminöfen) nehmen deshalb seit einigen Jahren kontinuierlich zu. Diese tragen somit immer stärker zum Feinstaubaufkommen aus Holzfeuerungen bei. Um den weiteren Anstieg der Biomassenutzung durch diese kleinen Feuerungen nicht zu stoppen, arbeiten Feuerstättenhersteller und Zulieferer aus diesem Bereich (z.B. Hersteller von Schornsteinsystemen) an technischen Lösungen, um die Feinstaubemissionen aus Feuerstätten zu reduzieren. Hierzu werden primäre Maßnahmen, z.B. Optimierungen der Verbrennungsbedingungen durch eine verbesserte Luftzuführung oder durch den Einsatz von Verbrennungssteuerungen oder sekundäre Maßnahmen eingesetzt.

Eine mögliche Sekundärmaßnahme zur Minderung der Staubemissionen bei Einzelraumfeuerstätten besteht im Einsatz von elektrostatischen Partikelabscheidern, die entweder direkt in die Feuerstätte integriert sein kann oder im Abgasweg installiert ist. Bislang existiert jedoch weder auf europäischer Ebene noch in Deutschland eine Vereinbarung über ein Prüfverfahren, um die Qualität von Abscheidern verschiedener Hersteller zu vergleichen bzw. einen „Normabscheidegrad“ als Vergleichskriterium zuverlässig zu bestimmen.

In diesem Projekt sollen deshalb einheitliche und reproduzierbare Methoden (Prüfbedingungen) zur Überprüfung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV entwickelt, erprobt und validiert werden.

Als Endergebnis soll ein an verschiedenen Einzelraumfeuerstätten und Abscheidertypen angepasstes Prüfverfahren als validierte Norm zur Verfügung stehen, in der die Methoden zur Überprüfung der Wirksamkeit der Staubabscheider genau beschrieben sind. Hierzu hat die Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN eine Arbeitsgruppe gebildet, die parallel zum Projekt die Norm DIN SPEC 33999 (Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, Dezember 2014) erarbeiten sollte. Der Zweck der Norm ist es, den Aufbau des Prüfstandes und das Prüfverfahren für den Einsatz von Staubabscheidern an Einzelraumfeuerstätten und an Heizkesseln exakt zu beschreiben, so dass vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, auch wenn die Prüfung von verschiedenen Prüfinstituten durchgeführt wird.

Um die Einflüsse von Randbedingungen (z.B. Messpositionen, Probenahmedauer und Zeitpunkt der Probenahme während dem Abbrandverlauf, Feuerstättentyp) auf die Bestimmung der Staubkonzentration vor und nach Staubabscheidern und damit die ermittelte Wirksamkeit zu untersuchen, wurden Prüfstandsmessungen mit jeweils zwei unterschiedlichen Kaminöfen und zwei elektrostatischen Staubabscheidern mit Buchenholz durchgeführt.

## 2 Ausgangslage und Zielsetzung

Sekundärmaßnahmen zur Abgasreinigung bei Einzelraumfeuerstätten lassen sich allgemein in filternde und elektrische Abscheider sowie Katalysatoren unterteilen. Zur Reduktion der Staubemissionen wurden bisher filternde und elektrische Abscheider sowie auch Mischformen entwickelt. Zur Emissionsminderung von Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und zum Teil Stickstoffoxiden werden Katalysatoren eingesetzt.

Einen gewissen Trend gibt es in die Richtung der elektrischen Staubabscheider für den Bereich der kleineren bis mittleren Leistungen der Feuerungsanlagen, wie Einzelraumfeuerstätten und Zentralheizungen. Insgesamt gibt es allerdings nach wie vor große Probleme mit dauerhafter und verlässlicher Funktionstüchtigkeit, der Akzeptanz seitens der Endnutzer und einer vergleichbaren Feststellung von deren Wirksamkeit (siehe z.B. Kiener et al., 2010).

Elektrostatische Abscheider sind schon seit langem Stand der Technik bei z.B. großen Feuerungsanlagen der Energie- und Prozesswärmeerzeugung. Grundsätzlich kann anhand der Bauform in Röhren- und Plattenelektrofilter unterschieden werden. In beiden werden Staubteilchen und Nebeltröpfchen in einem starken elektrischen Feld aufgeladen (z.B. negativ) und, angetrieben durch die Feldkräfte, an einer Niederschlags- oder der Röhrenwand abgeschieden (Funktionsprinzip siehe Abbildung 2.1).

Die physikalischen Grundlagen (Corona-Entladung) sind in einschlägiger Literatur genauer beschrieben (z.B. Böttner (2002); VDI-Richtlinie 3678, 2011).

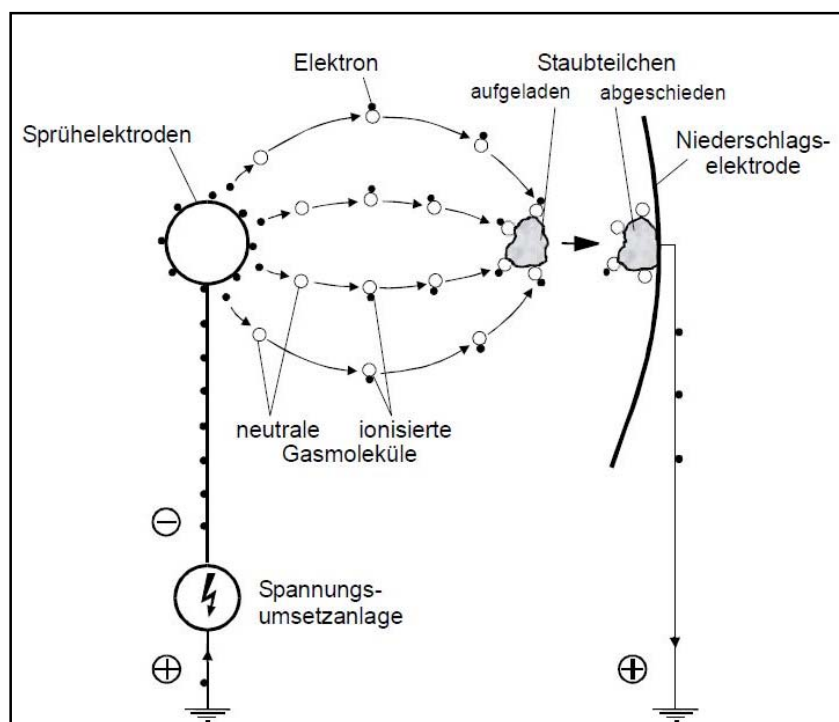


Abbildung 2.1 Funktionsprinzip Partikelaufladung und -abscheidung in einem Elektrofilter (Kaltschmitt et al., 2009)



In den letzten Jahren wurden viele Entwicklungen von kleinen Elektrofiltern für den nachgeschalteten Einsatz bei Biomassefeuerungen mit kleiner Leistung gestartet, allerdings wurden bisher nur wenige Produkte bis zur Serienreife entwickelt und sind am Markt erhältlich bzw. haben eine für den Einbau notwendige Bauartzulassung für Deutschland. Eine Übersicht über zugelassene Staubabscheider vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zeigt Tabelle 2.2.

**Tabelle 2.1 Übersicht über Staubabscheider mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt (Stand März 2015)**




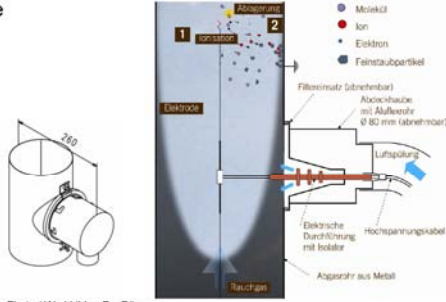

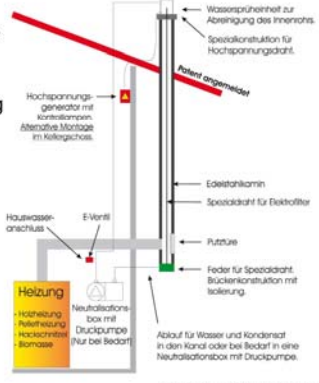
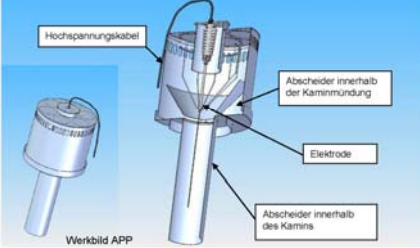

Zulassungsnummer	Zulassungsgegenstand	Antragsteller	Datum
Z-7.4-3442	Staubabscheider für Abgasanlagen, System „Zumik@on“	Kutzner + Weber GmbH, Maisach	14.3.2011
Z-7.4-3451	Staubabscheider für Abgasanlagen, System „OekoTube OT2“	OekoSolve AG, Eschen (LI)	3.8.2011
Z-7.4-3471	Staubabscheider für Abgasanlagen, System „Future Refine“	Karl Schröder Nachf., Kamen	5.3.2013
Z-7.4-3472	Staubabscheider für Abgasanlagen, System „AL-TOP“	Karl Schröder Nachf., Kamen	5.6.2013
Z-7.4-3475	Staubabscheider „MAHLE Pure Heat“ für handbeschickte Feuerungsanlagen für den Brennstoff Scheitholz	MAHLE Industriefiltration GmbH, Öhringen	13.11.2014

Die Vorgehensweise und die Anforderungen für die bauaufsichtlichen Zulassung von der Feuerung nachgeschalteten Staubfiltern werden vom DIBt vorgegeben, wobei ein Schwerpunkt auf der Überprüfung von Sicherheitsanforderungen (Betriebssicherheit, Sicherheit bei Rußbrand, elektrische Sicherheit und mechanische Festigkeit) liegt. Die Überprüfung der Wirkungsweise des Staubabscheiders wird ebenfalls verlangt, allerdings ist das anzuwendende Prüfverfahren nicht vollumfänglich beschrieben. Die grundsätzliche Funktionsweise des Staubabscheiders wird als gegeben angesehen, wenn eine minimale Abscheideleistung von 30 % bei der Prüfung nachgewiesen wird. Weitergehende Anforderungen bestehen in diesem Punkt nicht (DIBt, 2011).

Eine Übersicht über Einbaumöglichkeiten und beispielhafte Entwicklungen von Elektrofiltern zeigt Tabelle 2.2. Mögliche Einbauorte für die Elektrofilter sind unmittelbar in oder an der Feuerung, im Verbindungsstück zwischen Feuerung und Schornstein, im Schornstein oder auf der Schornsteinmündung.

Die meisten der aufgeführten Filtersysteme zeichnen sich dadurch aus, dass die Staubabscheidung in einem Abgasrohr oder dem Schornstein stattfindet, wobei der Abscheideraum für den Staub nicht klar definiert ist. Die Abreinigung des Systems und die Entnahme des abgeschiedenen Staubes sollen in diesen Fällen durch Fachpersonal (z.B. Schornsteinfeger) und nicht durch den Betreiber der Feuerstätte selbst erfolgen.

Tabelle 2.2 Übersicht über Einbaumöglichkeiten und beispielhafte Entwicklungen von Kleinelektrofiltern (Quelle der Abbildungen: Turowski, 2011)

Einbringungsort	Beispiel
unmittelbar in oder an der Feuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Typ: Airbox (für Kamineinsätze),</li> <li>➤ Zubehör-Aufsatz für Feuerungen des Herstellers bis 15 kW</li> <li>➤ Manuelle Reinigung durch Benutzer nach 100 h Betrieb</li> <li>➤ Status: marktverfügbar (nur für Spartherm-Feuerungen)</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Photo / Werkbild: Fa. Spartherm</p>
im Verbindungsstück zwischen Feuerung und Schornstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Typ: Zumikron</li> <li>Entwicklung: Fa. Rüegg, Schweiz, Herstellung: Kutzner+Weber</li> <li>➤ hauptsächlich für Einzelraumfeuerungen</li> <li>➤ Spülluftgebläse zur Elektrodenreinigung</li> <li>➤ manuelle Staubentnahme</li> <li>➤ Status: marktverfügbar</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">Photo / Werkbilder: Fa. Rüegg</p>
im Schornstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Typ: Feinstaubkiller</li> <li>➤ Elektrode über gesamte Schornsteinlänge</li> <li>➤ automatische Reinigung durch Spülwasserkreislauf</li> <li>➤ Partikelentnahme als Schlammablagerung</li> <li>➤ erste positive Prüfstandsmessungen</li> <li>➤ Status: Einzelherstellung bzw. Einzelabnahme</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">Photos: TFZ      Werkbild: TH-Alternativ-Energie</p>
auf der Schornsteinmündung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Typ: APP R<sub>esidential</sub> ESP</li> <li>➤ Schornsteinaufbau</li> <li>➤ keine aktive Abreinigung</li> <li>➤ in Prüfstandsversuchen gute Abscheideleistung</li> <li>➤ Status: Prototyp / Feldversuche</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center; font-size: small;">Werkbild APP      Photos:TFZ</p>

In diesem Projekt sollen einheitliche und reproduzierbare Methoden (Prüfbedingungen) zur Überprüfung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern für chargenweise beschickte Einzelraumfeuerstätten im Geltungsbereich der 1. BImSchV entwickelt, erprobt und validiert werden. Im Endergebnis soll ein Prüfverfahren zur Verfügung stehen, in der die Methoden zur Überprüfung der Wirksamkeit der Staubabscheider genau und nachvollziehbar beschrieben sind. Dieses Prüfverfahren soll Bestandteil der DIN SPEC 33999 (Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, Dezember 2014) werden, damit die Wirksamkeit neuer Staubabscheider nach einem einheitlichen, nachvollziehbaren und der späteren Praxis angepassten Verfahren bewertet werden kann. Gleichzeitig soll mit dem neuen Bewertungsverfahren eine gute Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfungen erreicht werden.

Hierzu werden in dem Projekt die Anforderungen an die einsetzbare Staubmesstechnik, die Durchführung der Abbrandversuche, die verschiedenen einzustellenden Betriebszustände für die Abbrandversuche und die Bewertung der Ergebnisse beschrieben. Zur Festlegung von gut durchführbaren, verständlichen und nachvollziehbaren Prüfbedingungen werden Untersuchungen auf dem Prüfstand mit zwei unterschiedlichen Kaminöfen in Kombination mit zwei verschiedenen Staubabscheidern bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchgeführt. Hierbei wird jeweils untersucht, wie sich das Abscheideverhalten der Staubabscheider in Abhängigkeit der Randbedingungen verändert. Mit untersucht wird auch die Fragestellung, inwieweit eine Anforderung an die Dauerbelastbarkeit der Staubabscheider in der Prüfnorm enthalten sein soll.

Nicht betrachtet werden Filter die auf der Schornsteinmündung installiert werden, da in diesen Fällen üblicherweise keine Auslaufstrecke vorhanden ist und derzeit eine Messung nach 1.BImSchV an diesen Filtern nicht durchgeführt werden kann.

### 3 Holzverbrennung und Partikelentstehung

Die Verbrennung von Holzbrennstoffen stellt eine Kombination verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse (Trocknung - thermische Zersetzung - homogene Oxidations- und Reduktionsreaktionen - heterogene Verbrennung des festen Kohlenstoffes) dar. Diese Prozesse laufen nach der Brennstoffaufgabe gleichzeitig, aber mit unterschiedlicher Intensität ab. Dieses Abbrandverhalten von Holzbrennstoffen ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt.

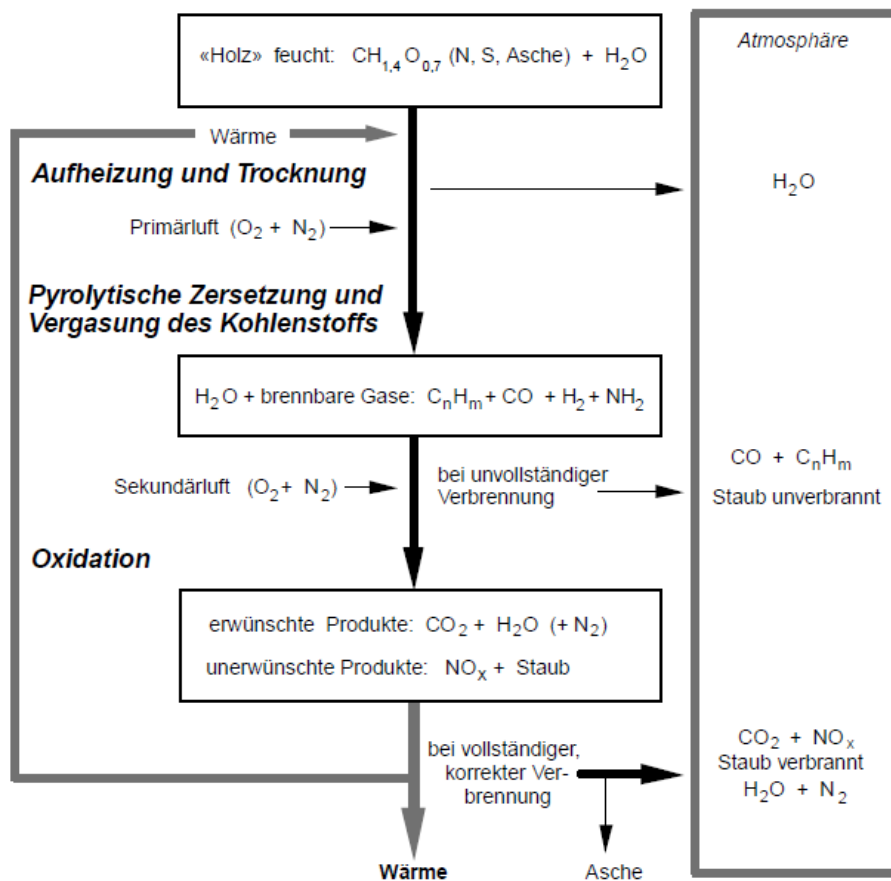


Abbildung 3.1 Abbrandverhalten von Holz (Kaltschmitt et al., 2009)

Das Abbrandverhalten von Holz zeigt sich bei kleinen chargenweise beschickten Feuerungen (z.B. Kaminöfen) in einem typischen Konzentrationsverlauf wichtiger gasförmiger Abgaskomponenten. So ist zuerst eine Anbrennphase mit niedriger Feuerraumtemperatur und niedriger CO<sub>2</sub>-Konzentration und meist hohen CO- und VOC-Konzentrationen (VOC Volatile Organic Compounds – in Abbildungen z.T. als C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> bezeichnet) im Abgas erkennbar. Der Anteil dieser Verbrennungsphase am Gesamtabbrand kann sich, in Abhängigkeit des verwendeten Brennstoffes und der konstruktiven Ausführung der Feuerstätte, im Bereich von 4 % bis über 10 % bewegen. Lang andauernde Anbrennphasen mit hohen VOC- und Partikelkonzentrationen bestimmen maßgeblich das Emissionsverhalten der Geräte bezüglich dieser Schadstoffe.

In der anschließenden Hauptverbrennungsphase werden meist hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas erreicht. In dieser Phase des Abbrandes können zeitweise örtliche Luftmangelsituationen unterschiedlicher Ausprägung auftreten, die erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und Partikel) zur Folge haben. Die Hauptverbrennungsphase hat im Allgemeinen einen zeitlichen Anteil von etwas weniger als 30 bis 40 % am Gesamtabbrand.

In der Ausbrandphase nimmt der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas, der ein Maß für den Brennstoffumsatz darstellt, und damit die Verbrennungstemperatur deutlich ab. Deshalb treten in dieser Verbrennungsphase wieder höhere CO-Konzentrationen im Abgas auf. Befindet sich neben Holzkohle auch noch nicht vollständig entgaster Brennstoff im Feuerraum, dies kann z.B. bei einer zu geringen Feuerraumbelastung in der Hauptverbrennungsphase oder bei der Verwendung von zu großen Holzstücken der Fall sein, treten auch noch hohe VOC-Konzentrationen im Abgas auf. Durch die im allgemeinen lange Dauer der Ausbrandphase, der Anteil dieser Verbrennungsphase bewegt sich zwischen 50 bis 70 % des Gesamtabbrandes, trägt diese in nicht unerheblichem Umfang zur CO-Gesamtemission (und ggf. auch zur VOC-Gesamtemission) bei. Liegen in der Ausbrandphase noch höhere VOC-Konzentrationen vor, sind auch die Partikelkonzentrationen im Abgas höher als in Fällen sehr geringer VOC-Konzentrationen. Hier liegen die Partikelkonzentrationen meist vergleichsweise niedrig und werden größtenteils durch anorganische Verbindungen (z.B. Kaliumverbindungen) verursacht.

Bei der Holzverbrennung ergeben sich Partikelemissionen sowohl bei vollständiger als auch bei unvollständiger Verbrennung (siehe Tabelle 3.1): Diese können, je nach Verbrennungs- und Abgasbedingungen, in fester und flüssiger Form vorliegen. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der entstehenden Partikel werden ebenfalls durch die Verbrennungsqualität beeinflusst. Außerdem können Partikel durch das Mitreisen von Brennstoff- oder Ascheteilchen ins Abgas gelangen.

**Tabelle 3.1 Partikeltypen aus der Verbrennung von Holz (Oser et al , 2003)**

Partikel aus vollständiger Verbrennung	Partikel aus unvollständiger Verbrennung
mineralische Bestandteile des Holzes (z.B. CaO)	elementarer Kohlenstoff (Holzkohle)
Fremdteile, die am Holz anhaften (Sand, Erde)	organischer Kohlenstoff in Form von nicht verbrannten Holzbestandteilen
Salze (Sulfate, Chloride, Karbonate, Hydroxide, Oxide, Nitrate, ionische Verbindungen)	organischer Kohlenstoff in Form von Teer
Metalloxide (z.B. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	organischer Kohlenstoff in Form von Ruß

Aufgrund der stark schwankenden Verbrennungsbedingungen während des Abbrandverlaufs bei Einzelraumfeuerstätten variieren auch die Partikelanzahlkonzentrationen und die Partikelzusammensetzungen im Abgas dieser Anlagen in einem weiten Bereich. Neben Salzen, die sich auch bei guten Verbrennungsbedingungen aus Aschebestandteilen bilden, werden in unterschiedlichen Anteilen und abhängig vom Abbrandverlauf und den gerade vorliegen-

den Bedingungen, wie z.B. Temperatur in den Reaktionszonen und örtlichem Luftüberschuss, Ruß und kondensierbare organische Verbindungen emittiert. In Abbildung 3.2 sind die Partikelarten und -eigenschaften aus der Holzverbrennung in ihren Reinformen in der Übersicht dargestellt (Nussbaumer, 2010).





Partikelarten und -eigenschaften	Flammen-Verbrennung			Pyrolyse
	T hoch (> 800°C) O <sub>2</sub> = 0	– Mix –	T hoch (> 800°C) O <sub>2</sub> ideal	T tief viel oder wenig O <sub>2</sub>
				
Art	<b>Russ</b>	↔	<b>Salz</b>	Condensable Organic Compounds <b>COC</b>
Aufbau	EC / BC chemisch / optisch C/H > 6...8	↔	C als Karbonat (CC) u.a. Salze	OC = TC-EC-CC C/H < 2
Farbe	schwarz	↔	weiss	braun   keine
Gesundheit	toxisch karzinogen entzündlich	↔	kaum toxisch kaum karzinogen entzündlich (kaum Si)	stark toxisch stark karzinogen entzündlich
Klima: Direkt	↑ absorbiert Licht und wärmt Atm.*	↔	↓ streut Licht und kühlt Atm.	↓ streut und absorbiert
Klima: Indirekt	↑ Schnee-Albedo ↓	↓	↓	↓
Alle Partikel wirken als Keime für Wolken und kühlen durch Cloud albedo und Cloud lifetime effect				

Abbildung 3.2 Arten und Eigenschaften von Partikeln aus der Holzverbrennung (Nussbaumer, 2010)

Die verschiedenen Partikelarten weisen auch unterschiedliche elektrische Eigenschaften auf und lassen sich demnach auch unterschiedlich gut mit Elektrofiltern abscheiden, siehe Abbildung 3.3. Die Wirksamkeit von Elektrofiltern wird nicht nur von den Partikeleigenschaften, sondern auch von der Partikelanzahlkonzentration bestimmt. Bei hohen Partikelanzahlkonzentrationen, die z.B. in der Anbrandphase der chargenweise beschickten Einzelraumfeuerstätten auftreten, nehmen die Abscheideleistungen kleiner Elektrofiltern meist deutlich ab. Ein beispielhafter Zusammenhang zwischen Partikelanzahlkonzentration und Partikelgröße für die unterschiedliche Verbrennungsphasen (Start - Betrieb - Ausbrand) bei einer Einzelraumfeuerstätte der Bauart Speicherofen ist in Abbildung 3.4 dargestellt.


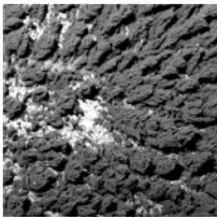

Eigenschaft	Salze	Ruß	COC
Elektrische Leitfähigkeit	mittel	hoch	gering/ isolierend
Schichtaufbau	homogen	verästelt	homogen
Schicht			
	Stabile Schicht	Wiedereintrag	Klebrige Schicht/ Rücksprühen
Eignung für Elektroabscheider	ideal	gering	gering

Abbildung 3.3 Partikelarten und ihre Eignung für Elektroabscheider (Lauber und Nussbaumer, 2010)

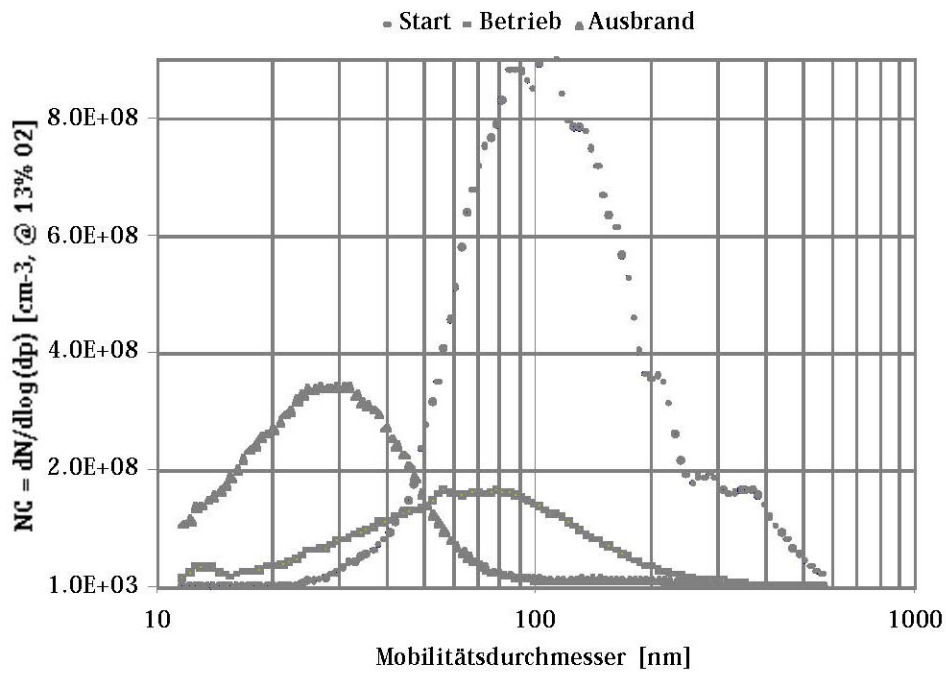


Abbildung 3.4 Zusammenhang zwischen Partikelanzahlkonzentration und Partikelgröße (Mobilitätsdurchmesser) für die Verbrennungsphasen Start - Betrieb - Ausbrand bei einem Speicherofen (Wieser et al., 2001)

## 4 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde ein Prüfstand aufgebaut, an den die beiden ausgewählten Elektrofilter jeweils in Kombination mit den beiden Kaminöfen für die Abbrandversuche angeschlossen wurden. Der Prüfstand war so konzipiert, dass zwei oder auch drei Staubmessungen jeweils zeitgleich vor und hinter dem Staubabscheider durchgeführt werden konnten. Unvermeidbare Schwankungen in den Abbrandverläufen wirken sich hierdurch nicht negativ auf die Aussagekraft der Versuchsergebnisse aus.

### 4.1 Aufbau des Prüfstands

Die folgende Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Versuchsaufbau im Technikum des IFK mit den erfassten Messgrößen. An die jeweils eingesetzten Kaminöfen schloss sich eine metallische Messstrecke mit einem Durchmesser von 150 mm an, in der Messöffnungen zur Staub- und Gasprobenahme sowie zur Messung von Abgastemperatur und Unterdruck im Abgasrohr angebracht waren. Die genauen Abstände der Messöffnungen sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Die Staubabscheider waren nach der Messstelle 0 (als Messstelle Rohgas bezeichnet) in die Rauchrohrestrecke integriert. An den Messstellen 1 bis 5 nach dem Staubabscheider (als Messstellen Reingas bezeichnet) konnten in festgelegten Abständen zu den Staubabscheidern jeweils Staubprobenahmen durchgeführt werden. Hierdurch konnte ermittelt werden, ab welcher Entfernung vom Staubabscheider keine Konzentrationsänderung des Staubes mehr messbar war.

Der Unterdruck im Abgasrohr (Schornsteinzug) wurde bei kalter Feuerung auf einen festgelegten Wert derart eingestellt, dass sich i.d.R. an der Messstelle 0 ca. 12 Pa als Mittelwert des Abbrandes ergab.

**Tabelle 4.1 Abstände der Messstellen (MS) im Versuchsaufbau**

Anschlussstutzen Kaminofen	MS 0	Abscheider	MS 1	MS 2	MS 3	MS 4	MS 5
88 cm	30 cm	82 cm	87 cm	130 cm	90 cm	90 cm	
Abstand Abscheider MS 4: 389 cm							



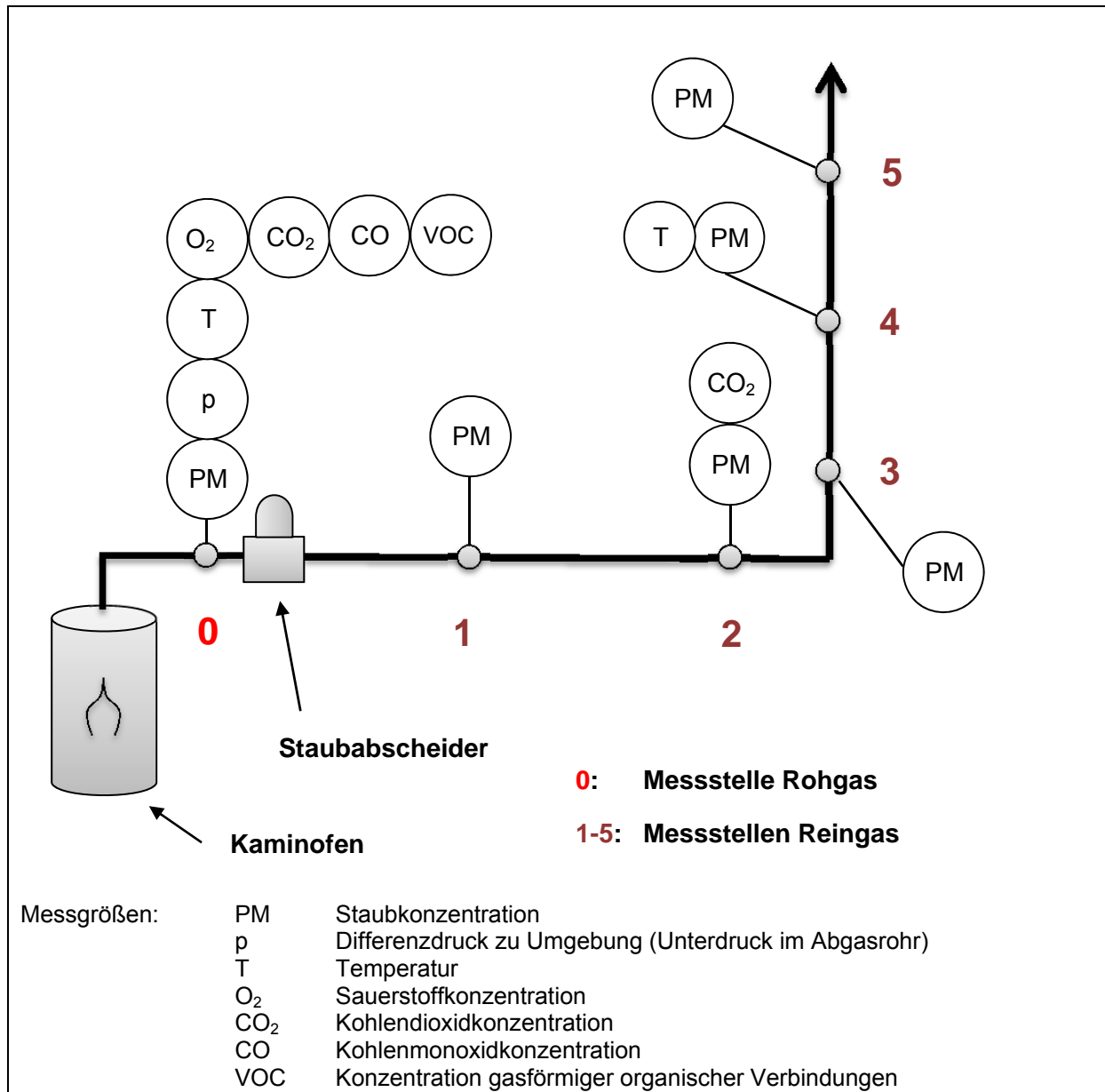


Abbildung 4.1 schematischer Versuchsaufbau mit Messgrößen und Messstellen

## 4.2 Messtechnik

### Bestimmung der Gaskonzentrationen

Zur Beschreibung des Abbrandverlaufs wurden jeweils an der Messstelle 0 (Rohgas) die Konzentration von O<sub>2</sub>; CO und VOC gemessen. Des Weiteren wurde zur Umrechnung der Messgrößen für CO, VOC und Staub auf den Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% jeweils an zwei Messstellen (MS 0 - Rohgas) und eine Messstelle im Reingas (z.B. MS 2) zeitgleich die CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen, da es durch eventuelle Undichtigkeiten bzw. durch Spül-luft des Staubabscheiders zu einer Verdünnung des Abgases führt und dadurch zu einer Konzentrationsabnahme. In Tabelle 4.2 sind die verwendeten Gasmessgeräte, deren Mess-

prinzipien und die Prüfgaskonzentrationen zu entnehmen. Mit aufgeführt sind die eingesetzten Thermolemente und die verwendete Druckmessdose.

**Tabelle 4.2 Messgeräte, Messprinzipien und Prüfgaskonzentrationen**

Messgröße	Messgerät Typ / Hersteller	Messprinzip	Messbereich	Konzentration Prüfgas
CO <sub>2</sub> (Rohgas)	Binos / Leybold- Heraeus	nichtdispersive Infrarotabsorption	0-20 Vol%	12,0 Vol% 16,0 Vol%
CO <sub>2</sub> (Reingas)	Binos / Leybold- Heraeus	nichtdispersive Infrarotabsorption	0-20 Vol%	12,0 Vol% 16,0 Vol%
O <sub>2</sub> (Rohgas)	EL3020 / ABB	Paramagnetismus	0-25 Vol%	8,04 Vol%
CO (Rohgas)	Binos / Leybold- Heraeus	nichtdispersive Infrarotabsorption	0-1.000 ppm 0-5 Vol%	798 ppm 0,701 Vol%
VOC (Rohgas)	FID 1230 / Testa	Flammenionisations- detektor	0-1000 ppm 0-10.000 ppm	807 ppm Propan
Temperatur (Rohgas)	NiCr-Ni / Thermolement	Thermospannung	270 bis 1372 °C	-
Druck (Rohgas)	PTSXR / Airflow	Druckmessumformer Piezoresistiver Effekt	0-100 Pa	-

Zu Beginn und am Ende jedes Messtages wurden die Gasgeräte mit Stickstoff zur Überprüfung der Gerätenullpunkte und mit Prüfgasen kalibriert. Diese Gasaufgaben erfolgten teils direkt am Anschluss für die Messstelle (Dichtigkeitsprüfung der Probenentnahme und Probengasaufbereitung mit Entnahmesonde, Vorfilter, Heizschläuchen, Pumpe und Messgaskühler) bzw. direkt an den Messgeräten. Die ermittelten Gerätedriften wurden bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt und diese entsprechend korrigiert.

### Bestimmung der Staubkonzentrationen

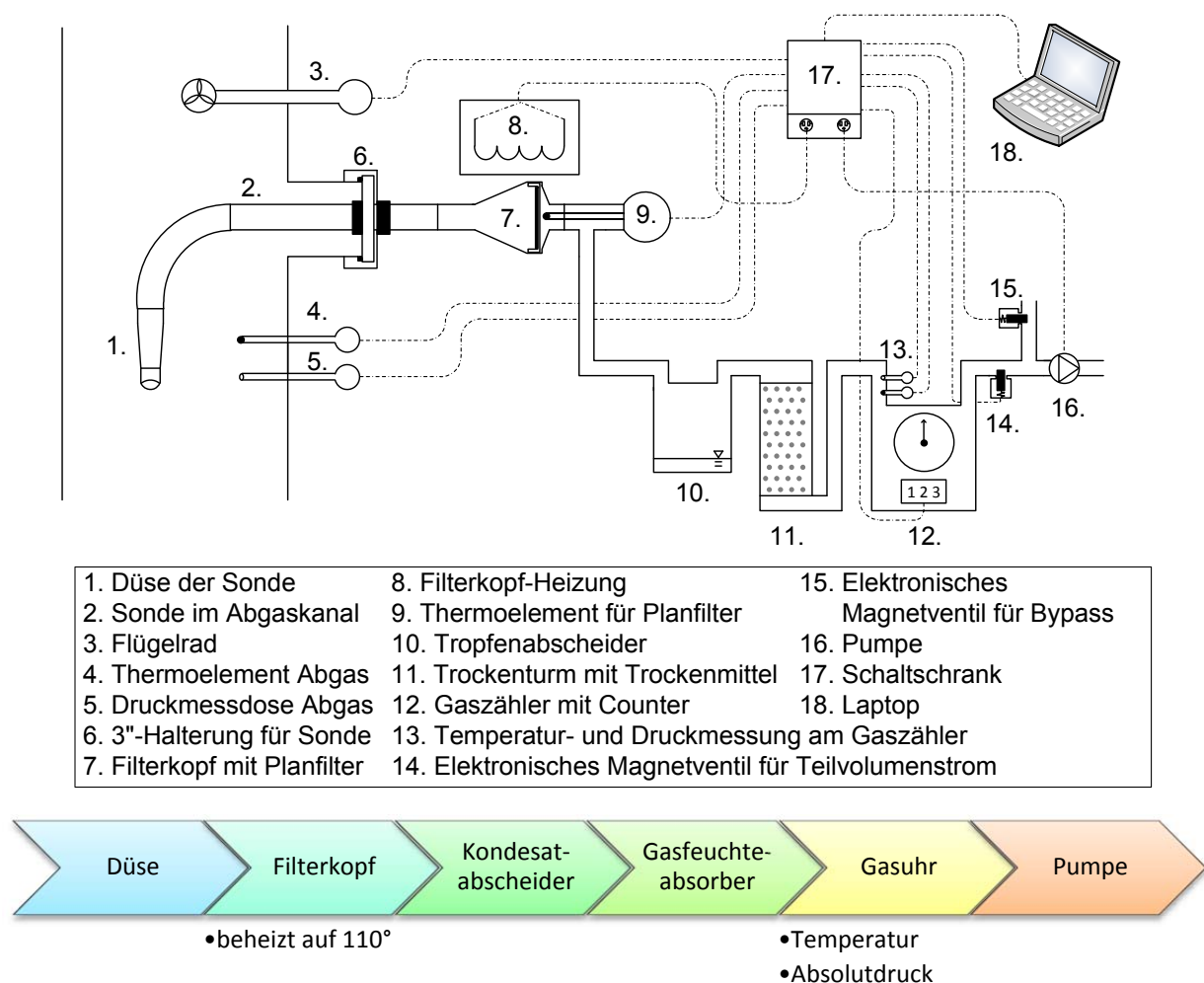
Bei den Abbrandversuchen Versuchen wurden jeweils 2 Staubmesseinrichtungen eingesetzt, um sowohl die Rohgas- als auch die Reingaskonzentration zeitgleich bestimmen zu können. Unvermeidbare Schwankungen der Staubkonzentrationen während eines Abbrandes bzw. zwischen den verschiedenen Abbränden hatten deshalb keine Auswirkung auf die Aussagekraft zur Wirksamkeit der eingesetzten Staubabscheider.

Die Staubmessungen erfolgten gravimetrisch nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt1 (VDI 2066, 2006), mit Anpassungen für den Einsatz an Einzelraumfeuerstätten entsprechend den Vorgaben der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (VDI 4206, 2015) vorgenommen wurden. Bei dem Staubmessverfahren handelt es sich um ein quantitatives Verfahren, bei dem ein Teilvolumenstrom isokinetisch aus einem Hauptvolumenstrom abgesaugt und über einen Filter geleitet wird. Dabei wird der Staub auf einem vorab gewogenen Filter abgeschieden. Durch Rückwägung des beladenen Filters wird die Staubmasse ermittelt. Zusätzlich werden Stau-

ablagerungen in der Entnahmesonde berücksichtigt. Aus den beiden Staubmassen (Filter und Ablagerungen) und dem abgesaugten Volumen ergibt sich die Staubkonzentration.

Bei den Messungen waren die Planfilterkopfgeräte mit den Staubfiltern außerhalb des Abgasrohres aufgebaut und wurden elektrisch beheizt (auf ca. 100 °C), um eine Kondensation von Wasserdampf zu vermeiden. Der Teilvolumenstrom wird von einer Pumpe abgesaugt, im Trockenturm (Trockenmittel ist Silikagel) getrocknet und dann von einem Gaszähler elektronisch mit einem Counter erfasst. Am Gaszähler werden auch Temperatur und Druck gemessen, um das abgesaugte Abgasvolumen auf Normvolumen umzurechnen.

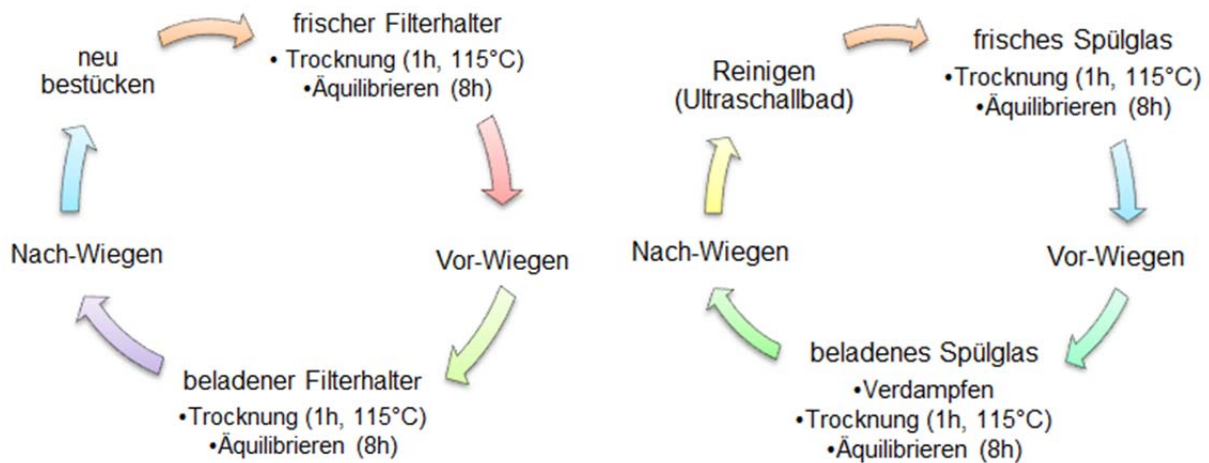
Für die gravimetrische Staubbestimmung wurden zwei identische Messeinrichtungen aufgebaut, die alle Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) erfüllen. Die Besonderheit des Messaufbaus ist die automatische und kontinuierliche Regelung des Durchflusses, um die isokinetische Probenahme zu jedem Zeitpunkt der Messung zu gewährleisten. Der schematische Messaufbau ist in Abbildung 4.2 dargestellt, Fotos eines Aufbaus und einer verwendeten Sonde sind in Abbildung 9.1 im Anhang dargestellt.



**Abbildung 4.2** schematischer Messaufbau (Axarlis, 2011) für die gravimetrische Staubbestimmung nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) (oben) und Weg des Proben-gases (unten)

Vor und nach den Messungen werden die Filter samt Filterhalter jeweils für eine Stunde in einem Trockenofen bei 115 °C ausgeheizt und anschließend im Exsikkator für mindestens 8 h gelagert. Danach erfolgt jeweils die Wägung der Filter. Als Filtermedien kamen Planfilter aus Quarzfaser mit einem Durchmesser von 50 mm der Firma Munktell (Typ MK 360) zum Einsatz, die sowohl günstige hygroskopisch Eigenschaften als auch einen sehr hohen Abscheidegrad aufweisen.

Nach jeder Messung wird die Entnahmesonde mit destilliertem Wasser und einer Lösung (je 50 % Aceton und Isopropanol) gereinigt und die Spülflüssigkeit in einem Spülglas gesammelt. Hiermit werden auch Staubablagerungen vor dem Filter in der Entnahmesonde erfasst. Die Spügläser werden ebenfalls für jeweils eine Stunde in einem Trockenofen bei 115 °C ausgeheizt und anschließend im Exsikkator für mindestens 8 h gelagert. Die Verfahrensschritte zur Behandlung der Staubfilter und der Spügläser sind in Abbildung 4.3 in der Übersicht dargestellt.



**Abbildung 4.3** Verfahrensschritte für die Behandlung der Filterhalter (links) und der Spügläser (rechts) bei der Bestimmung der Staubkonzentration im Abgas der Kaminöfen

Die bei der Probenahme gesammelte Masse des Gesamtstaubes ergibt sich somit aus der Filterbeladung und der Partikelmasse der Spülung. Die Staubkonzentration errechnet sich durch den Bezug der Gesamtstaubmasse auf das abgesaugte trockene Abgasvolumen bezogen auf Normbedingungen (1.013,25 mbar und 273,15 K).

Mit den eingesetzten Messeinrichtungen können die Staubkonzentrationen im Abgas mit hoher Präzision und gut reproduzierbar gemessen werden. Die Messunsicherheit des Messverfahrens liegt im Bereich von < 5 % (z.B. Struschka et al., 2012).

Zur Überprüfung, ob sich Staubablagerungen in der Messstrecke auf die Berechnung des Abscheidegrades auswirken, wurden an den Messstellen 0, 2 und 4 (siehe Abbildung 4.1) zeitgleich mit drei identischen Messeinrichtungen Staubproben gesammelt und die Konzentrationen bestimmt. Diese Abbrandversuche wurden am Kaminofen 1 (siehe Kapitel 4.3) durchgeführt, hierbei war das Adapterstück des Elektrofilters A (siehe Kapitel 4.4) im Abgas-

weg montiert und mit einem Blinddeckel verschlossen, d.h. diese Messreihe wurde ohne Elektrofilter durchgeführt. Exemplarisch sind hierzu die Ergebnisse von 2 Messreihen als Mittelwerte über 30 Minuten in Tabelle 4.3 aufgeführt.

**Tabelle 4.3 Staubkonzentrationen an den Messstellen 0, 2 und 4 bei zeitgleicher Probenahme über 30 Minuten sowie Holzaufgabemengen, Unterdrücke im Abgasrohr, Gaskonzentrationen und Gastemperaturen**

Messstelle:	0	2	4	0 - 4	
Messreihe	Staub * [mg/m <sup>3</sup> ]			Mittelwert Staub [mg/m <sup>3</sup> ]	max. Abweichung zu Mittelwert in [%]
1	96	99	98	98	2,0
2	76	79	78	78	-2,0

Messstelle:		0 - Rohgas					4
Messreihe	Holzaufgabe [kg]	Unterdruck [Pa]	Temperatur [°C]	O <sub>2</sub> [Vol%]	CO * [mg/m <sup>3</sup> ]	VOC * [mgC/m <sup>3</sup> ]	Temperatur [°C]
1	1,78	11,8	335	10,2	1.056	54	70
2	1,45	10,9	324	9,5	1.769	191	63

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Aus dem Vergleich der jeweils zeitgleich gemessenen Staubkonzentrationen an den Messstellen 0, 2 und 4 ist ersichtlich, dass bei einer maximalen Abweichung von rund  $\pm 2\%$  der Einzelwerte von den Mittelwerten der Messreihen eine Staubablagerung in der Messtrecke nicht feststellbar ist.

### 4.3 Kaminöfen

Für die Untersuchungen wurden die beiden Staubabscheider mit jeweils 2 verschiedenen Kaminöfen kombiniert, sodass zum einen Vergleiche über Kreuz möglich sind und zum anderen eine gewisse Bandbreite an unterschiedlichen Feuerungskonstruktionen abgebildet wird. Es wurde ein Vertreter für installierte ältere Kaminöfen und ein modernes Gerät ausgewählt.

#### Kaminofen 1

Als Vertreter für einen modernen Kaminofen wurde ein Gerät des Herstellers Hase vom Typ Lagos mit einer Nennwärmeleistung von 5 kW (siehe Abbildung 4.4) verwendet. Bei diesem Gerät handelt es sich um eine Zeitbrandfeuerstätte für einen geschlossenen Betrieb. Nach Angaben des Herstellers erfüllt der Kaminofen die Emissionsgrenzwerte der 2. Stufe der 1. BImSchV, wesentliche Angaben zum Kaminofen sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

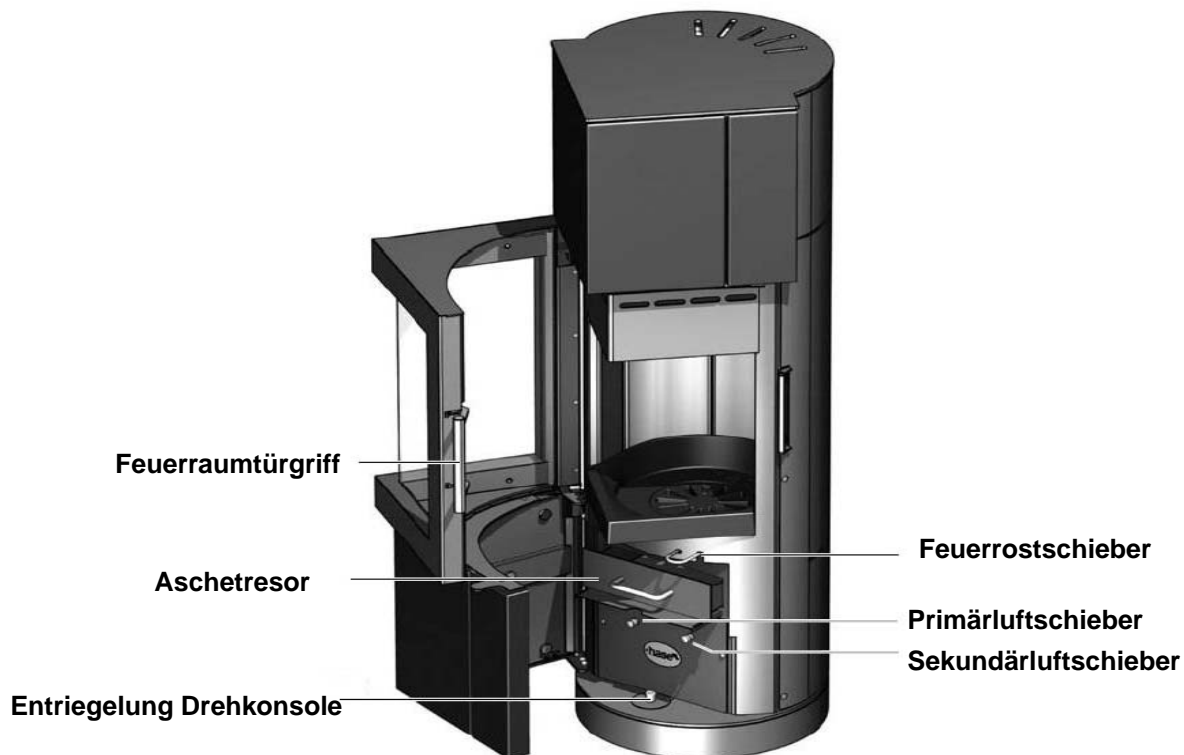


Abbildung 4.4 Kaminofen 1 vom Typ Lagos des Herstellers Hase (2012)

Als notwendiger Förderdruck wird vom Hersteller 12 Pa angegeben. Dieser Unterdruck wurde unmittelbar am Abgasstutzen des Kaminofens gemessen und bei den Abbrandversuchen eingestellt. Der Unterdruck veränderte sich nur leicht während eines Abbrandverlaufs.

Tabelle 4.4 Angaben zum Kaminofen 1 vom Typ Lagos des Herstellers Hase (2012)

<b>Hersteller</b>	Hase	
<b>Modell</b>	Lagos	
<b>Nennwärmeleistung</b>	5 kW	
<b>Feuerungsprinzip</b>	Durchbrand	
<b>Brennstoffe</b>	Scheitholz, Braunkohlebriketts	
<b>Beschickung</b>	manuell	
<b>Luftzufuhr</b>	Naturzug	
<b>Luftmengenregelung</b>	Primärluft:	manuell (Handschieber)
	Sekundärluft:	manuell (Handschieber)
<b>Brennstoff Holz</b>	<b>Prüfergebnis</b>	<b>Grenzwerte der 1.BImSchV (Stufe 2) (2010)</b>
CO-Gehalt in [mg/m <sup>3</sup> ]	1.217	1.250
Staubgehalt in [mg/m <sup>3</sup> ]	<10	40

## Kaminofen 2

Als Vertreter des installierten Bestandes wurde ein Kaminofen des Herstellers Buderus vom Typ blueline 4W mit einer Nennwärmeleistung von 8 kW eingesetzt. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Zeitbrandofen mit selbstschließender Feuerraumtür und mit integriertem Warmwasser-Wärmeübertrager. Der Kaminofen (siehe Abbildung 4.5) wird manuell beschickt und ist über eine Rücklaufanhebung an ein Vor- und Rücklaufsystem mit Wasserkühlung angeschlossen. Der Kaminofen ist, mit geringen konstruktiven Änderungen gegenüber dem eingesetzten Modell, derzeit immer noch am Markt erhältlich, er wird mit und ohne integrierten Warmwasser-Wärmeübertrager angeboten.

Als notwendiger Förderdruck wird vom Hersteller 12 Pa angegeben. Dieser Unterdruck wurde unmittelbar am Abgasstutzen des Kaminofens gemessen und bei den Abbrandversuchen eingestellt. Der Unterdruck veränderte sich nur leicht während eines Abbrandverlaufs.

Zur Einstellung der Verbrennungsluftmenge besitzt das Gerät an der Vorderseite 2 Drehschieber für die Primär- und Sekundärluftmenge.

Kaminofen blueline 4W		
Nennwärmeleistung	kW	8
Mittlere wasserseitige Wärmeleistung	kW	5,6
Mittlerer Brennstoffdurchsatz	kg/h	2,31
Wirkungsgrad	%	88,9
Wasserinhalt	Liter	19,8
Maximaler Betriebsdruck	bar	3
Verbrennungsluftbedarf	m <sup>3</sup> /h	22,5



Abbildung 4.5 Kaminofen 2 vom Typ blueline 4W des Herstellers Buderus (2007)

### Betrieb der Kaminöfen

Als Brennstoff wurde lufttrockenes Buchenscheitholz verwendet. Mit diesem Brennstoff hatte sich gezeigt, dass bei beiden Kaminöfen die reproduzierbarsten Bedingungen dann erreicht wurden, wenn zwei Brennstoffstücke aufgegeben wurden. Deshalb wurden beide Öfen, trotz unterschiedlicher Nennwärmeleistung, in den meisten Fällen mit 2 Brennstoffstücken betrieben, Angaben zum Brennstoff siehe Tabelle 4.5. Bei allen Versuchen wurden die Holzstücke stets in gleicher Position auf die Grundglut im Ofen gelegt. Dabei wurden die Scheite parallel nebeneinander aufgelegt, mit zur Sichtscheibe des Ofens zeigender Schnittseite (siehe Ab-

bildung 4.6). Der Feuerraum der Öfen wurde zu Beginn eines jeden Messtages gereinigt und der Aschebehälter entleert.

**Tabelle 4.5**    **Angaben zum eingesetzten Buchenholz**

<b>Holzart</b>	Buche
<b>Wassergehalt</b>	12 Massen-%
<b>Menge</b>	1,3 - 1,5 kg
<b>Länge</b>	ca. 25 cm
<b>Anzahl</b>	2 Scheite
<b>Position im Ofen</b>	parallel nebeneinander / längs im Ofen



**Abbildung 4.6**    **Holzaufgabe im Kaminofen 1**

Die Verbrennungsbedingungen (gute bzw. schlechte Verbrennung) wurde bei den Öfen mittels den jeweils vorhandenen zwei Luftschiebern zur Regulierung von Primär- und Sekundärluft eingestellt. Durch das Einstellen von guten und schlechten Verbrennungsbedingungen sollte eine möglichst große Bandbreite an Partikeleigenschaften und Zusammensetzungen erreicht werden.

An jedem Versuchstag wurde mit feinem Holz zuerst eine Grundglut erzeugt, auf die dann die erste Holzcharge aufgelegt wurde. Alle weiteren Holzaufgaben erfolgten dann auf die Grundglut des vorangegangenen Abbrandes. In Tabelle 4.6 sind beispielhaft die Einstellungen der Luftschieber beim Kaminofen 2 für einen Versuchstag mit guter Verbrennung dargestellt. Damit ein gutes Durchzünden beim Erzeugen einer Grundglut eintritt und der Ofen zügig Betriebstemperatur erreicht, wurden beide Schieber beim Anheizen und der ersten Brennstoffaufgabe auf Position 3 (ganz offen) gestellt. Ab dem zweiten Abbrand eines jeden Versuchstages wurden die Primärluft und Sekundärluft auf die jeweiligen Positionen gestellt, die für gute bzw. schlechte Verbrennung ausgewählt wurden. Der Rost war bei allen Abbränden ganz geöffnet. Beim Kaminofen 1 wurde analog verfahren. Während des Versuches wurden keine Veränderungen an den Luftschiebern getätigt.



Die Brennstoffauflage erfolgte immer bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt im Rohgas im Bereich von 3,5 bis 5 Vol%, um ein rasches Zünden der Scheite zu gewährleisten.

**Tabelle 4.6** Einstellung der Luftschieber beim Kaminofen 2 für Messungen bei guter Verbrennung

Holzaufgabe für	Primärluft	Sekundärluft	Rost
Grundglut	3	3	offen
1. Abbrand	3	3	offen
2. Abbrand	2	3	offen
...	...	...	...
5. Abbrand	2	3	offen

In Abbildung 4.7 sind für den Kaminofen 2 beispielhafte Abbrandverläufe dargestellt, die bei Einstellungen für eine gute bzw. schlechte Verbrennung gemessen wurden. Bei der Lufteinstellung für eine gute Verbrennung ergibt sich nach der Holzaufgabe ein steiler Anstieg der CO-Konzentration (und der nicht dargestellten VOC-Konzentration), die CO<sub>2</sub>-Konzentration, als Maß für den Brennstoffumsatz, nimmt ebenfalls schnell zu. Im Bereich des CO<sub>2</sub>-Maximums sinkt die CO-Konzentration deutlich ab und erreicht nach etwa einem Drittel der Abbrandzeit ihr Minimum. Gegen Abbrandende und immer stärker dominierendem Holzkohleabbrand steigt die CO-Konzentration wieder an.

Bei der Lufteinstellung für schlechte Verbrennung liegen bei hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ausgeprägte Luftmangelsituationen vor, so dass nach dem Anbrandvorgang die CO-Konzentration nicht sinkt sondern weiter ansteigt. Das CO-Minimum wird hier erst im letzten Drittel des Abbrandes erreicht und liegt höher als bei guter Verbrennung.

Da trotz einer standardisierten Vorgehensweise beim Betrieb der Öfen mehr oder weniger große Schwankungen der CO-, VOC- und Staubkonzentrationen bei den verschiedenen Abbränden bei gleicher Verbrennungslufteinstellung für gute bzw. schlechte Verbrennung auftraten, sind die Übergänge zwischen den beiden Zuständen z.T. nicht scharf getrennt sondern fließend.

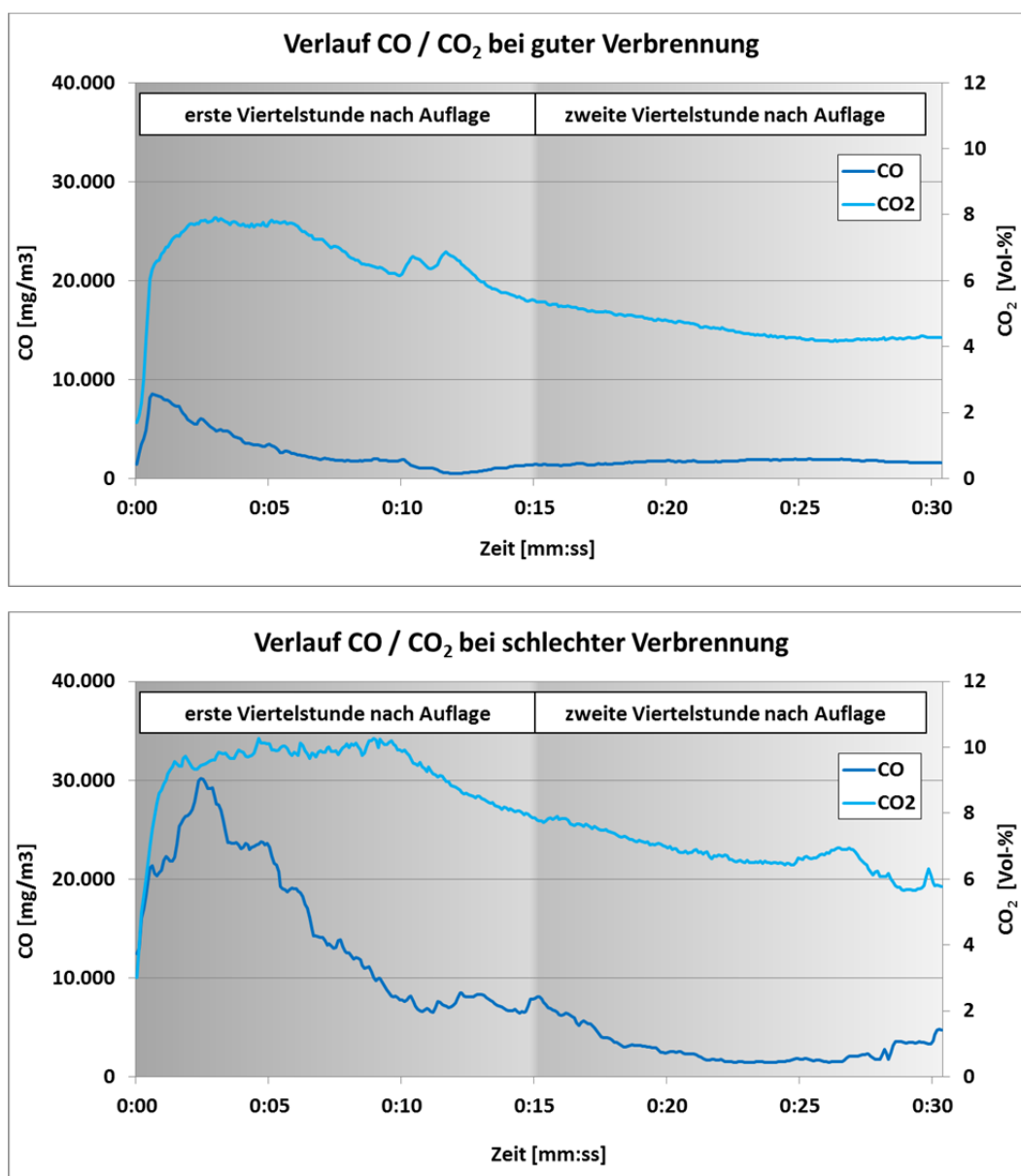


Abbildung 4.7 Beispielhafte Verläufe der CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen bei guter Verbrennung (oben) und bei schlechter Verbrennung (unten) beim Kaminofen 2

#### 4.4 Staubabscheider

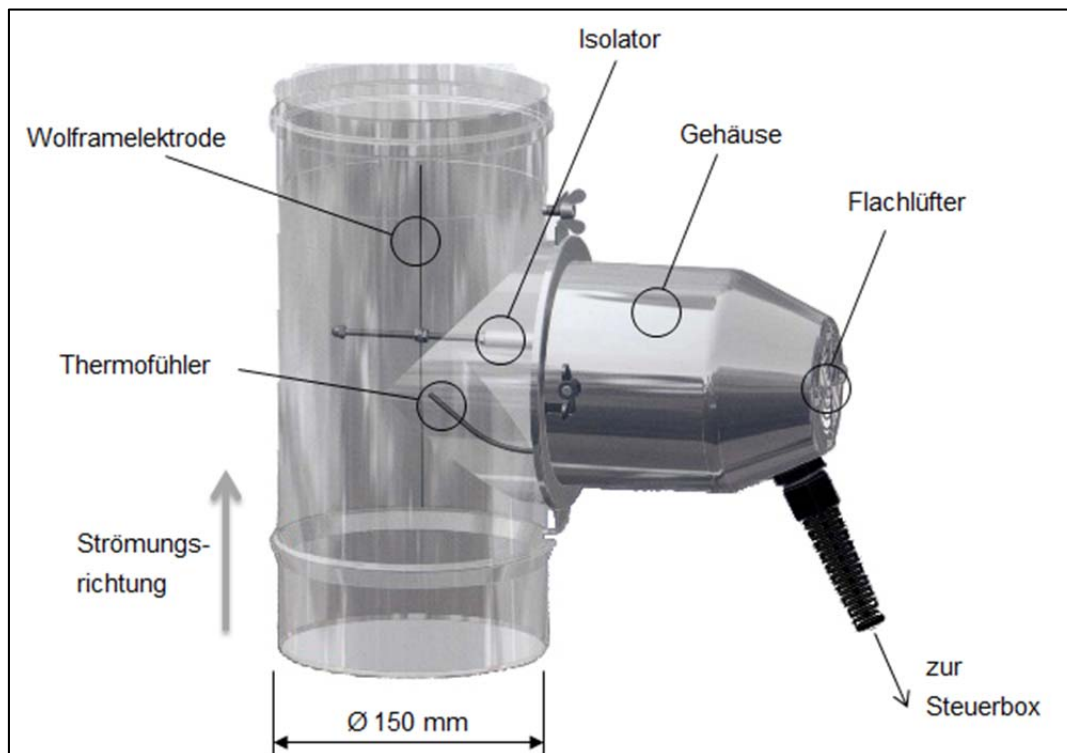
Für die Untersuchungen wurden zwei Staubabscheider in der Bauform Elektrofilter ausgewählt, die sich sowohl bezüglich des Einbauortes (Verbindungsstück zwischen Feuerstätte und Schornstein bzw. unmittelbar nach Feuerstätte), der Staubabscheideflächen (Verbindungsstück und Schornstein bzw. im Abscheider intergriert) als auch der Staubentnahme (durch Fachpersonal durch das Kehren von Verbindungsstück und Schornstein bzw. automatische Förderung in Sammelbehälter) unterscheiden.

Staubabscheider, die auf der Schornsteinmündung oder in unmittelbarer Nähe der Schornsteinmündung installiert werden, sollten nicht Gegenstand der Untersuchungen sein, da diese bisher auch nicht in der Norm DIN SPEC 33999 (2014) geregelt werden.

## Elektrofilter A

Als Vertreter für Elektrofilter die in das Verbindungsstück zwischen Feuerstätte und Schornstein bzw. im unteren Bereich eines Schornstein installiert werden können, wurde der elektrostatische Staubabscheider vom Typ Zumikron der Firma Kutzner + Weber GmbH in der Ausführung Kompakt eingesetzt.

Dieser besteht aus einer Steuerbox und dem Abscheidergehäuse, welches die Isolatorhalterung für die ca. 25 cm lange sehr dünne Wolframelektrode und ein Spülgebläse enthält (siehe Abbildung 4.8). Dieses wurde mit einem mitgelieferten Adapterstück aus Edelstahl in das Abgasrohr mit dem Durchmesser 150 mm integriert (siehe Abbildung 9.2, Anhang). Der Abscheider kann zu Revisionszwecken aus dem Adapterstück entnommen und die Öffnung mit einem Blindeckel verschlossen werden.



**Abbildung 4.8** Aufbau des elektrostatische Staubabscheider vom Typ Zumikron der Firma Kutzner + Weber GmbH (nach Rüegg, 2015)

Wichtige Anforderungen an den Einbauort und einige Eigenschaften des Staubabscheiders sind in Tabelle 4.7 aufgelistet.

Der im Abscheider integrierte Thermofühler erfasst die Abgastemperatur und schaltet die Hochspannungsversorgung sowie den Flachlüfter ab 50 °C ein (alle vier grünen LEDs an der Steuerbox leuchten). Auf der Steuereinheit befinden sich zudem noch zwei rote LEDs, die Überstrom (verursacht z.B. durch Ablagerungen auf Isolator und Elektrode) oder Unterstrom (Elektrodenbruch / -verlust) anzeigen. Nach Auftreten derartiger Ereignisse versucht der Ab-

scheider durch Anpassen der Elektrodenspannung wieder den Normalbetriebszustand zu erreichen oder geht auf Dauerfehler, falls sich die Störung nicht beheben lässt.

**Tabelle 4.7 Anforderungen und Eigenschaften Partikelabscheider Zumikron [7]**

<b>Abscheidestrecke</b>	Mindestens 1,5 m der Abgasleitung nach dem Partikelabscheider müssen aus Metall sein
<b>Durchmesser des Abgasrohres</b>	150 mm bis 300 mm
<b>Spülluftversorgung</b>	5 m <sup>3</sup> /h
<b>Abgastemperaturen</b>	kleiner als 400° C (kurzfristig bis 500° C)
<b>Feuerungsleistung</b>	bis 40 kW
<b>Energieversorgung</b>	230 V / 50 Hz
<b>bauaufsichtliche Zulassung</b>	ja, Zulassungsnummer Z-7.4-3442

Der Isolator, innerhalb dessen die Hochspannung in das Rauchgasrohr zur Elektrode geleitet wird, wird während des Betriebs durch einen Flachlüfter mit Außenluft umspült. Dies soll den Isolator frei von Ablagerungen aus dem Abgas halten und seine Funktion sicherstellen. Allerdings ergibt sich dadurch auch eine Verdünnung und Abkühlung des Abgases.

### Elektrofilter B

Als Vertreter für Elektrofilter, die als eigenständige Bauteile direkt nach der Feuerstätte aufgebaut werden und die Staubabscheidung in einem definierten Bereich stattfindet sowie der Staubaustrag automatisch in einen Sammelbehälter erfolgt, wurde ein Prototyp des Instituts für Technische Chemie (ITC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eingesetzt (Bologa und Woletz, 2014). Die Einbausituation ist in Abbildung 9.3 im Anhang gezeigt. In diesem Elektrofilter wurde eine Sprühelektrode mit sternförmig angeordneten Spitzen eingebaut, siehe Abbildung 4.9.



**Abbildung 4.9 Prototyp des ITC am KIT (links, Bologa und Woletz, 2014) und Coronaentladung in einem rohrförmigen Reaktor (rechts, Paur et al., 2012)**

Der Niederschlag der geladenen Staubpartikel vollzieht sich in einer räumlich von der Ionisationsstufe getrennten Kammer. In dieser ist zur Abreinigung der Abscheiderfläche eine Bürste integriert, die in einem z.B. stündlichen Reinigungsintervall für ca. 1 Minute den abgetriebenen Staub in einen Sammelbehälter unterhalb der Kammer austrägt.

## Berechnung Abscheidegrad und Bezugsrechnung

Der Abscheidegrad der Elektrofilter wurde nach Formel 4.1 berechnet.

$$\varepsilon = 1 - \frac{C_{\text{Staub,Reingas}}}{C_{\text{Staub,Rohgas}}} \quad (\text{Formel 4.1})$$

mit:	$\varepsilon$	Abscheidegrad
	$C_{\text{Staub, Reingas}}$	Staubkonzentration im Reingas in mg/m <sup>3</sup>
	$C_{\text{Staub, Rohgas}}$	Staubkonzentration im Rohgas in mg/m <sup>3</sup> .

Die Staubkonzentrationen (und auch die gemessenen CO- und VOC-Konzentrationen) werden jeweils als Mittelwerte für die Dauer der Staubprobenahme angegeben und auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% nach den Formeln 4.2 bzw. 4.3 umgerechnet, um sie direkt vergleichen zu können.

$$C_{13 \text{ Vol\% O}_2} = \frac{21 - 13}{21 - O_2} \cdot C \quad (\text{Formel 4.2})$$

$$C_{13 \text{ Vol\% O}_2} = C_{O_2, \text{max}} \cdot \frac{21 - 13}{21 - CO_2} \cdot C \quad (\text{Formel 4.3})$$

mit:	$C_{13 \text{ Vol\% O}_2}$	berechnete Konzentration (Staub, CO, VOC) bezogen auf 13 Vol% O <sub>2</sub>
	$C$	im Abgas gemessene Konzentration (Staub, CO, VOC)
	$O_2$	im Abgas gemessene Sauerstoffkonzentration in Vol%
	$CO_2$	im Abgas gemessene Kohlenstoffdioxidkonzentration in Vol%
	$CO_{2, \text{max}}$	maximale CO <sub>2</sub> -Konzentration im trockenen Abgas bei stöchiometrischer Verbrennung (für Buchenholz: 20,6 Vol%).

Bei den jeweils zwei parallel gemessenen Staubkonzentrationen erfolgte die Bezugsrechnung anhand von Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vor und nach Elektrofilter. Zur Kontrolle erfolgte an der Messstelle 0 im Rohgas zusätzlich eine Berechnung mittels der dort gemessenen O<sub>2</sub>-Konzentration.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurden mit unterschiedlichen Messgeräten und Gasaufbereitungen (z.B. Pumpe, Messgaskühler) ermittelt. Die Messeinrichtungen wurden durch Vergleichsmessungen an einer Messstelle überprüft. Identische Messergebnisse über einen weiten Konzentrationsbereich wurden dadurch erreicht, dass Kalibrierwerte mit zwei CO<sub>2</sub>-Prüfgasen unterschiedlicher Konzentration bei der Auswertung berücksichtigt wurden.

## 5 Voruntersuchungen

Um ggf. vorliegende Einflüsse auf die Qualität und die Aussagefähigkeit der Staubmessungen zu untersuchen, wurden vor den eigentlichen Untersuchungen zur Bestimmung der Wirksamkeit der Elektrofilter verschiedene Voruntersuchungen durchgeführt.

### Dichtheit der Messstrecke

Die an den verschiedenen Messstellen gemessenen Staubkonzentrationen müssen, damit diese verglichen werden können, entweder auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt umgerechnet werden oder es darf keine Verdünnung des Abgases durch Umgebungsluft in der Messstrecke erfolgen. Um den Messaufwand zu begrenzen, wurde die Messstrecke ab dem Staubabscheider (d.h. Messstelle 1) bis zu Messstelle 4 gasdicht ausgeführt.

Die Dichtigkeit der Messstrecke wurde anhand eines Abbrandversuchs mit Braunkohlenbriketts überprüft. Braunkohlenbriketts wurden verwendet, da sich hiermit beim Charabbrand über längere Zeit konstantere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ergeben. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurden an der Messstelle 0 (Referenzmessstelle) und zeitgleich jeweils an einer der Messstellen 1 bis 4 ermittelt. Dabei zeigte sich, dass die Unterschiede in den gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gering sind, siehe Tabelle 5.1.

Dieser Abbrandversuch wurde am Kaminofen 1 und dem mit einem Blindeckel verschlossenen Adapterstück des Elektrofilters A durchgeführt. Hierbei wurden immer zeitgleich an der Messstelle 0 (Referenz) und einer der anderen Messstellen 1 bis 4 die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen. Da alle Differenzen für die Messstellen 1 bis 4 zur Referenz an der Messstelle 0 in etwa gleich groß sind ist davon auszugehen, dass eine geringe Undichtigkeit im Bereich des Adapterstückes bzw. am Blindeckel vorlag. Die Messstrecke von der Messstelle 1 bis 4 kann als gasdicht angesehen werden.

**Tabelle 5.1 Dichtigkeitsüberprüfung der Messstrecke anhand eines Abbrandversuchs mit Braunkohlenbriketts**

CO <sub>2</sub> in Vol%	Messstelle 0 (Referenz)	Messstelle n	Differenz zu Messstelle 0
Messstelle 1	1,62	1,46	0,16
Messstelle 2	1,55	1,39	0,16
Messstelle 3	1,43	1,27	0,19
Messstelle 4	1,28	1,16	0,12

Somit ist eine Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration an der Messstelle 2 ausreichend, um als Bezugswert für alle Messstellen hinter dem Abscheider zu dienen.

## Homogenität der Konzentrationsverteilung

Die Entnahme der Teilvolumenströme zur Messung der Gas- und Staubkonzentrationen sollte punktförmig aus dem Rohrquerschnitt (Durchmesser 150 mm) an der Messstelle erfolgen, bevorzugt in der Rohrmitte. Deshalb wurde geprüft, ob eine weitgehend homogene Konzentrationsverteilung im Rohrquerschnitt vorliegt. Eine ungleiche Konzentrationsverteilung könnte sich vor allem beim Einsatz des Elektrofilters A ergeben, da hier über eine seitliche Öffnung kalte Spülluft in das heiße Abgas eingeblasen wird.

Um die Homogenität der Konzentrationsverteilung im Abgasrohrquerschnitt an den Messstellen 1 und 2 zu überprüfen, wurde ein Abbrandversuch mit Braunkohlebriketts am Kaminofen 1 durchgeführt und zeitgleich die CO<sub>2</sub>-Konzentration an der Messstelle 0 (Referenz) und abwechselnd an den beiden anderen genannten Messstellen gemessen. Hierbei wurde das Probengas mit einer Gasentnahmesonde an verschiedenen Positionen im Rohrquerschnitt (siehe Abbildung 5.1) entnommen. Das Spülgebläse des Elektrofilters A war in Betrieb. Bei den Messungen wurden die jeweiligen Positionen im Rohrquerschnitt nacheinander mehrfach in unterschiedlicher Reihenfolge abgefahren. Die parallele CO<sub>2</sub>-Messung an Messstelle 0 im Rohrzentrum diente als Vergleich und zur Erkennung etwaiger CO<sub>2</sub>-Schwankungen aus der Feuerung. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

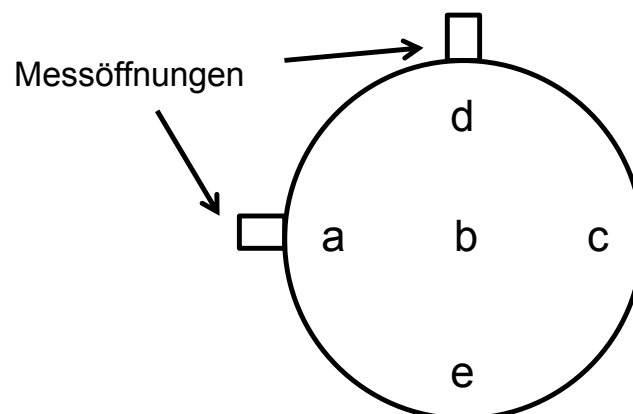


Abbildung 5.1 Messpositionen im Abgasrohr zur Untersuchung des Konzentrationsprofils

Tabelle 5.2 Messwerte der Untersuchung des Konzentrationsprofils an den Messstellen 1 und 2 und der Referenzmessstelle 0 (hier: Position b in der Rohrmitte)

CO <sub>2</sub> in Vol%		Messstelle 1	Referenz (Messstelle 0)	Messstelle 2	Referenz (Messstelle 0)
Querschnitt horizontal	a	1,80	2,61	1,66	2,44
	b	1,81	2,61	1,62	2,37
	c	1,80	2,59	1,58	2,32
Querschnitt vertikal	d	1,70	2,27	1,52	2,05
	b	1,65	2,26	1,42	1,92
	e	1,55	2,15	1,31	1,80

Die Abweichungen der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, welche nicht auf Schwankungen in der Ausgangskonzentration aus der Feuerung zurückzuführen sind, zwischen den Messpositionen im Rohrquerschnitt bei den Messstellen 1 und 2 sind gering und liegen im Bereich von 0,1 Vol%. Somit wird davon ausgegangen, dass die Gas- und Staubkonzentrationen im Rohrquerschnitt an den Messstellen 1 bis 5 mit einer ausreichend guten Homogenität vorliegen, so dass eine punktförmige Entnahme der Abgasproben in der Rohrmitte ausreichend ist.

### **Staubkonzentration und Abgastemperatur**

Die im Abgas von kleinen chargenweise betriebenen Feuerstätten (wie z.B. Kaminöfen) gemessenen Partikelkonzentrationen hängen auch von der Abgastemperatur und der Abgasverdünnung ab. Bei geringeren Temperaturen und stark verdünntem Abgas können sich organische Verbindungen an vorhandene Partikel anlagern bzw. kondensieren, so dass sich die Staubkonzentration in Abhängigkeit von der Verbrennungsqualität merklich erhöhen kann. Im kalten und stark verdünnten Abgas, z.B. im Temperaturbereich von ca. 35 - 50 °C, können, im Vergleich zum heißen unverdünnten Abgas (Temperaturbereich > 250 °C), die Partikelkonzentrationen ungefähr um den Faktor 2 höher liegen (z.B. Struschka et al. (2003) sowie Schön und Hartmann (2014)).

Andererseits können sich Partikel durch z.B. Thermophoreseeffekte an der im Verhältnis zum Abgas kühleren Wand der Abgasrohre anlagern, wodurch sich die Partikelkonzentration im Abgas reduzieren würde.

Anhand von Abbrandversuchen mit dem Kaminofen 1 in Kombination mit dem Elektrofilter A wurde nun der Einfluss der Temperaturabnahme im Abgas in der Messtrecke auf die Partikelkonzentration untersucht. Um die Temperaturabnahme zu verstärken und ggf. damit auch den Einfluss zu erhöhen, war das Spülgebläse des Elektrofilters A in Betrieb (die Hochspannungsversorgung war ausgeschaltet).

Während den Abbrandversuchen wurden an den Messstellen 0 (Rohgas) und 4 (Reingas) parallele Staubmessungen über je 30 Minuten durchgeführt. Erfasst wurden die Anbrand- und die Hauptverbrennungsphase des Chargenabbrandes. Die Messwerte der durchgeführten Versuchsreihen sind in Tabelle 5.3 enthalten.

Bei den Versuchen ergab sich bei 3 Messreihen eine geringe Konzentrationszunahme des Staubes von der Messstelle 0 (Rohgas) zur Messstelle 4 (Reingas) bei abgeschalteter Hochspannungsversorgung des Elektrofilters, aber mit eingeschalteter Spülluft. Bei dem Abbrandversuch mit der höchsten Konzentration an VOC ergab sich auch der größte Unterschied in der Staubkonzentration. Allerdings liegen, bis auf die Messreihe 3, die Unterschiede in den gemessenen Staubkonzentrationen an der Messstelle 0 und 4 im Bereich der Messunsicherheit des Staubmessverfahrens, dies gilt auch für die mittlere Differenz über alle Messreihen.

Somit ist unter den vorliegenden Bedingungen (Kaminofen 1 und Elektrofilter A) davon auszugehen, dass eine messbare Beeinflussung der Staubkonzentration im Verlauf der Messtrecke durch die Spülluft des Elektrofilters A i.d.R. nicht gegeben ist.



Die Ergebnisse dieser Messreihen stehen somit auch nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen in Tabelle 4.3, die ohne Spülluft ermittelt wurden.

**Tabelle 5.3 Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 bei zeitgleicher Probenahme über 30 Minuten sowie Holzaufgabemengen, Unterdrücke im Abgasrohr, Gaskonzentrationen und Gastemperaturen**

Messstelle:	0	4	Differenz in %	mittlere Differenz in %
Messreihe	Staub * [mg/m <sup>3</sup> ]			
1	84	86	3	2
3	112	121	8	
4	65	66	2	
5	117	113	- 4	

Messstelle:		0 - Rohgas					4
Messreihe	Holzaufgabe [kg]	Unterdruck [Pa]	Temperatur [°C]	O <sub>2</sub> [Vol%]	CO * [mg/m <sup>3</sup> ]	VOC * [mgC/m <sup>3</sup> ]	Temperatur [°C]
1	1,58	12,2	325	11,9	1.020	45	81
3	1,52	12,0	333	11,3	2.461	205	79
4	1,55	11,9	323	11,8	1.513	72	78
5	1,51	12,1	335	11,0	1.255	114	81

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

### 6 Versuchsergebnisse der Gerätekombinationen

Wesentliches Ziel dieses Projektes ist es, einheitliche und reproduzierbare Methoden (Prüfbedingungen) zur Überprüfung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubabscheidern für chargenweise beschickte Einzelraumfeuerstätten zu erarbeiten. Anhand der Kombination der beiden Kaminöfen 1 und 2 sowie der beiden Elektrofilter A und B sollte untersucht werden, inwieweit sich die Messdauer (15 oder 30 Minuten), der Startzeitpunkt der Messung (sofort nach Brennstoffaufgabe oder später) und die Verbrennungsbedingungen (gute und schlechte Verbrennung) auf den Abscheidegrad des Elektrofilters und dessen Aussagefähigkeit auswirkt.

Im Folgenden werden zuerst die Kombination von Kaminöfen 1 und Kaminöfen 2 mit dem Elektrofilter A und dann die Kombination von Kaminöfen 1 und Kaminöfen 2 mit dem Elektrofilter B beschrieben.

#### 6.1 Kombination Kaminöfen 1 mit Elektrofilter A

Bei den Gerätekombinationen Kaminöfen 1 mit Elektrofilter A wurden die Staubkonzentrationen jeweils zeitgleich an den Messstellen 0 (Rohgas) und 4 (Reingas) gemessen. Die Messstelle 4 wurde beim Elektrofilter A durch separate Abbrandversuche bestimmt, Position 4 befand sich in einem Abstand von ca. 390 cm hinter dem Abscheider, und war die vorletzte Messstelle im Abgasstrang des Versuchsaufbaus (siehe Abbildung 4.1).

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse der Abbrandversuche zur Festlegung der Messstelle im Reingas von Elektrofilter A aufgeführt. Bei den Versuchen 1 bis 3 erfolgten jeweils zeitgleiche 30 minütige Staubprobenahmen an den Messstelle 0, 2 und 4. Bei den Versuchen 5 bis 7 erfolgte jeweils zeitgleich eine 15 Minuten Staubprobenahme an den Messstelle 4 und 5.

Beim Vergleich der Staubkonzentrationen an den Messstelle 0 und 2 fällt auf, dass diese nach dem Elektrofilter z.T. zunehmen, hingegen im Vergleich zur Messstelle 4 erwartungsgemäß immer abnehmen. Ursache für die Zunahme der Staubkonzentration an Messstelle 2 nach dem Filter im Reingas sind massive Staubablagerungen an der Düse der Entnahmesonde für die Staubmessung. Diese Ablagerungen müssen sich während der Staubprobenahme z.T. gelöst haben und damit auf das Staubfilter gelangt sein, siehe Abbildung 6.1. Die Messstelle 2 ist somit für eine Staubprobenahme zur Bestimmung der Abscheideleistung des Elektrofilters nicht geeignet.

Ein Vergleich der in anderen Abbrandversuchen ebenfalls zeitgleich ermittelten Staubkonzentrationen an den Messstellen 4 und 5 zeigt, dass hier nur geringe Unterschiede vorliegen und im Mittel der 3 Versuche keine Abweichung mehr gegeben ist. Somit wurde die Messstelle 4, im Vergleich zur Messstelle 0, als geeignet zur Ermittlung der Abscheideleistung dieses Elektrofilters festgelegt.

**Tabelle 6.1** Staubkonzentrationen an den Messstellen 0, 2, 4 bzw. 4 und 5 sowie Holzaufgabemengen, Unterdrücke im Abgasrohr, Gaskonzentrationen und Gastemperaturen (Messreihen 1-3: 30 Minuten Probenahmedauer / Messreihen 5-7: 15 Minuten Probenahme)

Messstelle:	0	2	4	Messstelle:	4	5
Versuch	Staub * [mg/m <sup>3</sup> ]			Messreihe	Staub * [mg/m <sup>3</sup> ]	
1	102	120	78	5	65	71
2	101	92	54	6	68	64
3	128	134	96	7	73	71

Messstelle:		0 - Rohgas					4
Versuch	Holzaufgabe [kg]	Unterdruck [Pa]	Temperatur [°C]	O <sub>2</sub> [Vol%]	CO * [mg/m <sup>3</sup> ]	VOC * [mgC/m <sup>3</sup> ]	Temperatur [°C]
1	1,56	12,8	340	10,8	4.616	287	82
2	1,57	12,6	341	10,8	3.018	159	77
3	1,59	13,1	350	11,2	2.489	111	85
5	1,37	13,4	321	15,1	2.891	-	87
6	1,47	13,5	326	14,7	2.560	-	90
7	1,43	13,4	319	14,7	850	-	87

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>



**Abbildung 6.1** Staubablagerungen an der Düse der Entnahmesonde für die Staubmessung an Messstelle 2 (links) und zugehöriger Staubfilter mit Staubagglomeraten

Der Elektrofilter war bei allen nachfolgend beschriebenen Messungen ordnungsgemäß eingebaut und im Normalbetrieb, etwaige Abweichungen werden aufgeführt. Bei jedem Versuch wurde die Staubprobenahme nahezu gleichzeitig gestartet (Versatz < 5 sec), wobei die Messung im Reingas stets zuerst gestartet wurde.

Die ersten Untersuchungsreihen hatten noch zum Ziel, ein geeignetes Messintervall festzulegen, weshalb hier auch 15-minütige Messungen durchgeführt wurden. Das mit der Kombination Kaminofen 1 und Elektrofilter A durchgeführte Versuchsprogramm ist in Tabelle 6.2 aufgelistet.

**Tabelle 6.2** Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 1 und Elektrofilter A

Verbrennungsqualität	Messdauer	Start der Messung	Primärluft	Sekundärluft	Versuchsanzahl
Gute Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	2	3	9
Schlechte Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	2	1	6
Gute Verbrennung	15 min	30 sec nach Auflage	2	3	4
Schlechte Verbrennung	15 min	30 sec nach Auflage	3	1	4
Gute Verbrennung	15 min	15 min nach Auflage	2	3	6
Schlechte Verbrennung	15 min	15 min nach Auflage	3	1	4

Eine Unterscheidung der Verbrennungsqualität in gute und schlechte Verbrennung wurde anhand der auf 13 Vol% O<sub>2</sub> bezogenen CO-Konzentrationen getroffen. Diese korreliert nicht immer in erwarteter Weise mit der Staubkonzentration im Rohgas. Ab einer CO-Konzentration von ca. 2.500 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) wurde die Verbrennungsqualität als „schlecht“ eingestuft.

Bei einer Messdauer von 30 Minuten wurde sowohl die komplette Anbrandphase als auch ein Großteil der Hauptverbrennungsphase mit der Staubprobenahme erfasst. Die Charakterisierung dieser Messreihen erfolgt im Folgenden mit der Bezeichnung „Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung“. Bei einer Messdauer von 15 Minuten wurde die komplette Anbrandphase und ein Teil der Hauptverbrennungsphase beprobt. Die Charakterisierung dieser Messreihen erfolgt im Folgenden mit der Bezeichnung „Verbrennungsphase: Anbrand + Beginn Hauptverbrennung“.

Wurde die Staubprobenahme erst 15 Minuten nach der Brennstoffaufgabe gestartet, wird mit den Messungen nur die Hauptverbrennungsphase erfasst. Diese Messreihen sind als „Verbrennungsphase: Hauptverbrennung“ bezeichnet.

### Messreihen mit 30 minütiger Staubprobenahmen

Bei diesen Messreihen wurden sowohl Versuche mit guter als auch mit schlechter Verbrennung durchgeführt. Hierbei wurde die Abscheideleistung des Elektrofilters nahezu über den gesamten Abbrand untersucht. Wesentliche Betriebsparameter sowie die gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen dieser beiden Versuchsreihen sind in Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 aufgeführt. Die Staubkonzentrationen im Rohgas (Messstelle 0) und im Reingas (Messstelle 4) sowie die berechneten Abscheidegrade sind in Abbildung 6.2 aufgetragen.

**Tabelle 6.3 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,56	11,2	295	12,0	2.050	64	67
2	1,44	11,9	301	13,5	1.658	112	75
3	1,44	12,5	327	12,4	1.243	112	80
4	1,52	12,5	327	12,1	1.544	68	79
5	1,52	12,8	338	11,8	1.992	84	82
6	1,52	12,3	305	12,4	1.228	49	79
7	1,48	12,4	322	12,0	1.510	103	80
8	1,47	12,2	315	11,7	1.525	81	82
9	1,48	11,9	301	12,6	1.088	48	79
<b>Mittelwert</b>				<b>12,3</b>	<b>1.537</b>	<b>80</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>0,5</b>	<b>330</b>	<b>25</b>	

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	75	47	38
2	73	43	41
3	97	84	14
4	95	78	18
5	79	58	27
6	65	50	24
7	99	87	13
8	95	74	22
9	80	55	32
<b>Mittelwert</b>	<b>84</b>	<b>64</b>	<b>25</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>10</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Die durchschnittlichen Abscheidegrade bei den 30 minütigen Staubprobenahmen lagen bei guter Verbrennung bei rund 25 % und bei schlechter Verbrennung bei rund 31 %. Auffällig ist bei diesen Versuchen allerdings, dass die mittlere Staubkonzentration im Rohgas bei den anhand der CO-Konzentration als schlechte Verbrennung charakterisierten Versuchen sogar leicht niedriger lag, als bei Versuchen mit schlechter Verbrennung.

**Tabelle 6.4 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

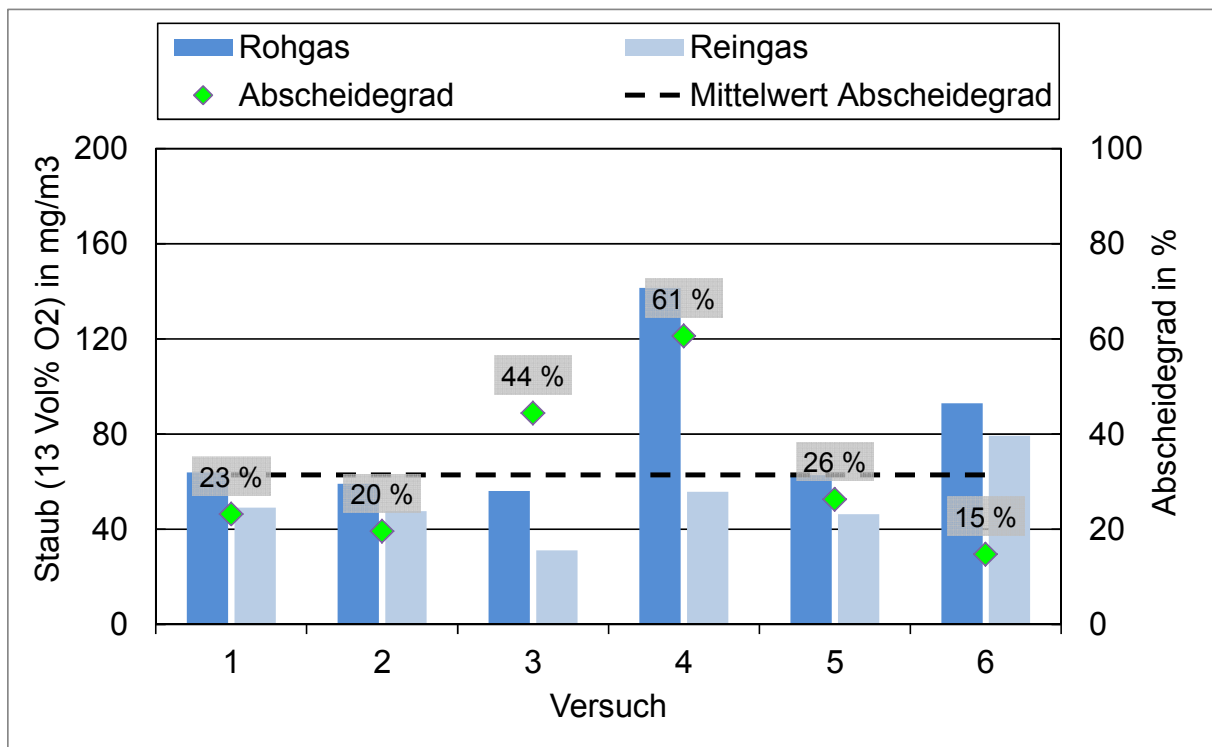
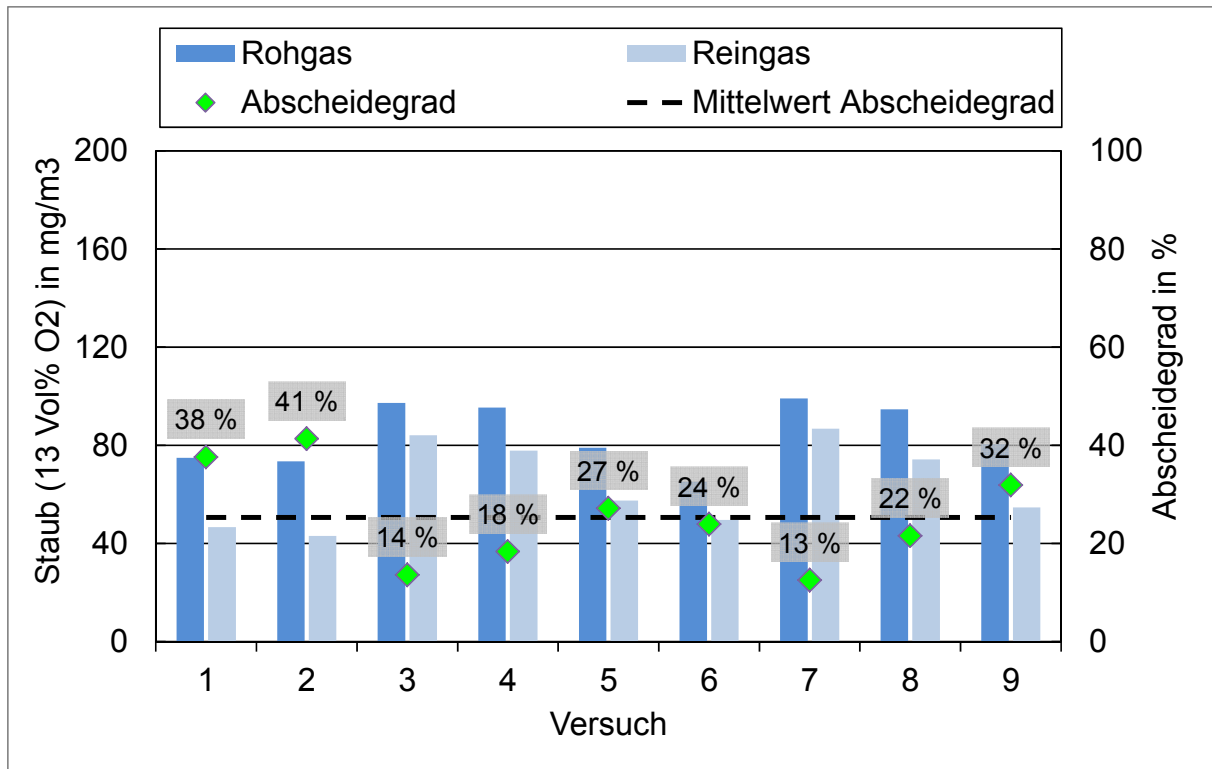
Kaminofen 1 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,44	11,4	286	14,0	2.571	239	73
2	1,40	10,5	233	6,0	5.082	260	60
3	1,29	9,9	205	10,9	3.319	225	52
4	1,43	10,0	236	7,5	3.513	356	54
5	1,55	10,3	250	6,5	4.905	348	58
6	1,50	10,5	241	9,1	3.241	285	98
<b>Mittelwert</b>				<b>9,0</b>	<b>3.772</b>	<b>286</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>3,0</b>	<b>1.000</b>	<b>55</b>	

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)		4 (Reingas)
Versuch	Staub *		Abscheidegrad
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	64	49	23
2	59	48	20
3	56	31	44
4	142	56	61
5	63	46	26
6	93	79	15
<b>Mittelwert</b>	<b>79</b>	<b>52</b>	<b>31</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>33</b>	<b>16</b>	<b>18</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Die Ursache ist hier z.T. in der unumgänglichen Bezugsrechnung auf 13 Vol% O<sub>2</sub> zu sehen, da bei schlechter Verbrennung die mittleren O<sub>2</sub>-Konzentrationen im Messintervall doch meist deutlich abnahmen, was sich bei der Berechnung der bezogenen Staubkonzentrationen auswirkte. So lagen die nicht bezogenen Staubkonzentrationen bei den Messreihen mit guter Verbrennung bei rund 94 mg/m<sup>3</sup> und bei den Abbränden mit schlechter Verbrennung bei rund 122 mg/m<sup>3</sup>.

In der Tendenz ist der Abscheidegrad von der Rohgaskonzentration abhängig, mit höheren Eingangskonzentrationen nimmt der Abscheidegrad ab (siehe Abbildung 6.2). Insgesamt liegen bei Verbrennungsbedingungen die Abscheidegrade in einem ähnlichen Bereich von 25 bzw. 31 % bei vergleichsweise hoher Standardabweichung (10 bzw. 18 %).



**Abbildung 6.2** Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung)

## Messreihen mit 15 minütiger Staubprobenahmen

Auch bei diesen Messreihen wurden sowohl Versuche mit guter als auch schlechter Verbrennung durchgeführt. Zusätzlich wurde noch der Startzeitpunkt der Staubprobenahme variiert, entweder unmittelbar nach der Brennstoffaufgabe (nach 30 sec) oder erst in der Hauptverbrennungsphase (nach 15 min). Hierbei wurde die Abscheideleistung des Elektrofilters entweder über die Anbrennphase und den Beginn der Hauptverbrennungsphase oder nur für die Hauptverbrennungsphase ermittelt.

Wesentliche Betriebsparameter sowie die gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen der beiden Versuchsreihen mit Messbeginn unmittelbar nach der Brennstoffaufgabe sind in Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 aufgeführt. Die Staubkonzentrationen im Rohgas (Messstelle 0) und im Reingas (Messstelle 4) sowie die berechneten Abscheidegrade sind in Abbildung 6.3 gezeigt.

**Tabelle 6.5 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung)**

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Beginn Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,54	12,5	329	11,3	557	20	81
2	1,40	12,7	345	9,2	2.781	282	84
3	1,56	12,7	354	8,7	2.101	145	84
4	1,52	12,8	347	9,1	1.793	97	84
Mittelwert				9,6	1.808	136	
Standardabweichung				1,2	930	110	

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Beginn Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	80	65	19
2	132	111	16
3	152	132	13
4	130	109	17
Mittelwert	124	104	16
Standardabweichung	31	28	3

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>



Da bei diesen Versuchen die Anbrandphase einen größeren Anteil an der Probenahmedauer hat, sind die Konzentrationen an CO, VOC und Staub im Rohgas höher als bei der 30-minütigen Probenahme. Der mittlere Abscheidegrad liegt dagegen etwas niedriger als bei der 30-Minutenmessung, bei auffällig geringer Standardabweichung.

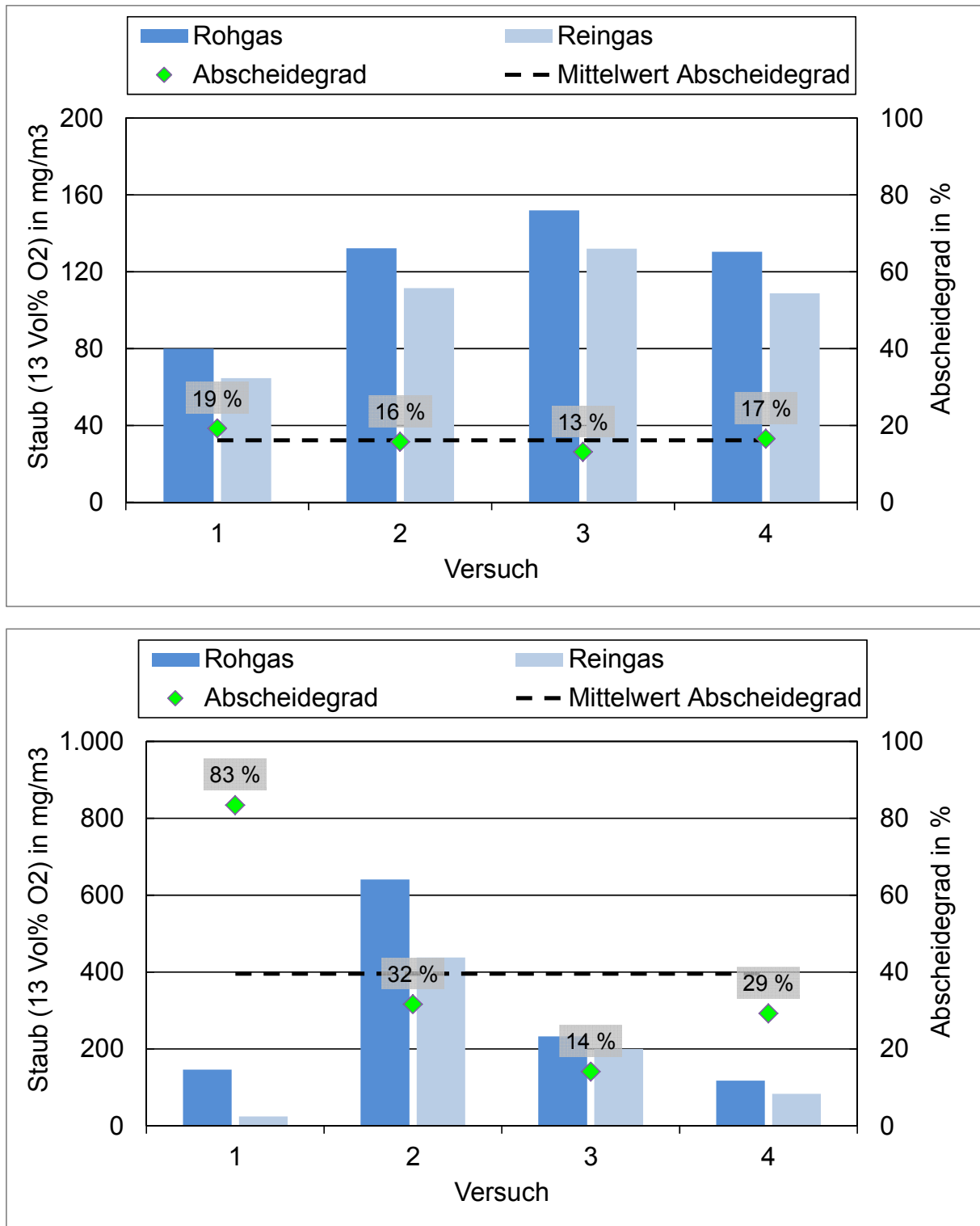
**Tabelle 6.6 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung)**

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Beginn Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,47	12,2	261	7,6	6.341	465	64
2	1,48	11,2	244	9,1	34.744	5.363	66
3	1,40	11,8	281	6,0	14.316	1.251	68
4	1,46	11,7	283	6,7	15.008	1.671	66
Mittelwert				7,4	17.602	2.188	
Standardabweichung				1,3	12.085	2.175	

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Beginn Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	147	24	83
2	641	438	32
3	233	200	14
4	118	84	29
Mittelwert	285	186	40
Standardabweichung	242	183	30

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Bei den Versuchen mit schlechter Verbrennung traten, auch aufgrund des höheren Anteils der Anbrandphase, aber vor allem durch die geänderte Einstellung der Primärluft, wesentlich höhere CO, VOC und Staubkonzentrationen im Rohgas auf. Hierdurch ergaben sich deutlich abgegrenzte Verbrennungsqualitäten. Der mittlere Abscheidegrad lag in diesen Messreihen mit 40 % etwas höher als in den anderen, bisher vorgestellten Versuchsreihen, allerdings nahm auch die Standardabweichung nochmals deutlich auf 30 % zu.



**Abbildung 6.3** Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung)

Wesentliche Betriebsparameter sowie die gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen der beiden Versuchsreihen mit Messbeginn in der Hauptverbrennungsphase (15 min nach der Brennstoffaufgabe) sind in Tabelle 6.7 und Tabelle 6.8 aufgeführt. Die Staubkonzentrationen

im Rohgas (Messstelle 0) und im Reingas (Messstelle 4) sowie die berechneten Abscheidegrade sind in Abbildung 6.4 gezeigt.

**Tabelle 6.7 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / gute Verbrennung / Hauptverbrennung)**

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,05	11,0	257	15,7	1.937	81	65
2	1,49	12,7	271	10,8	1.219	58	57
3	1,51	13,3	266	11,3	1.692	59	60
4	1,40	12,5	280	12,4	862	36	79
5	1,46	12,1	319	12,8	1.168	59	76
6	1,42	11,9	317	12,7	348	17	73
Mittelwert				12,6	1.204	52	
Standardabweichung				1,7	570	22	

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	81	31	62
2	38	24	37
3	124	95	24
4	66	32	52
5	63	50	21
6	36	20	46
Mittelwert	68	42	40
Standardabweichung	32	28	16

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Der durchschnittlichen Abscheidegrade bei den 15 minütigen Staubprobenahmen in der Hauptverbrennungsphase lagen bei guter Verbrennung bei rund 40 % und bei schlechter Verbrennung sogar bei rund 50 %. Die, jeweils relativ zum mittleren Abscheidegrad bezogenen Standardabweichungen, sind hierbei vergleichsweise niedrig.

In der Tendenz zeigt sich bei den Versuchen, dass vor allem die Anbrandphase, in der meist die höchsten Partikelkonzentrationen und auch die höchsten Partikelanzahlkonzentrationen auftreten, eine Abnahme des Abscheidegrades und eine höher Standardabweichung verursachen.

**Tabelle 6.8 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / schlechte Verbrennung / Hauptverbrennung)**

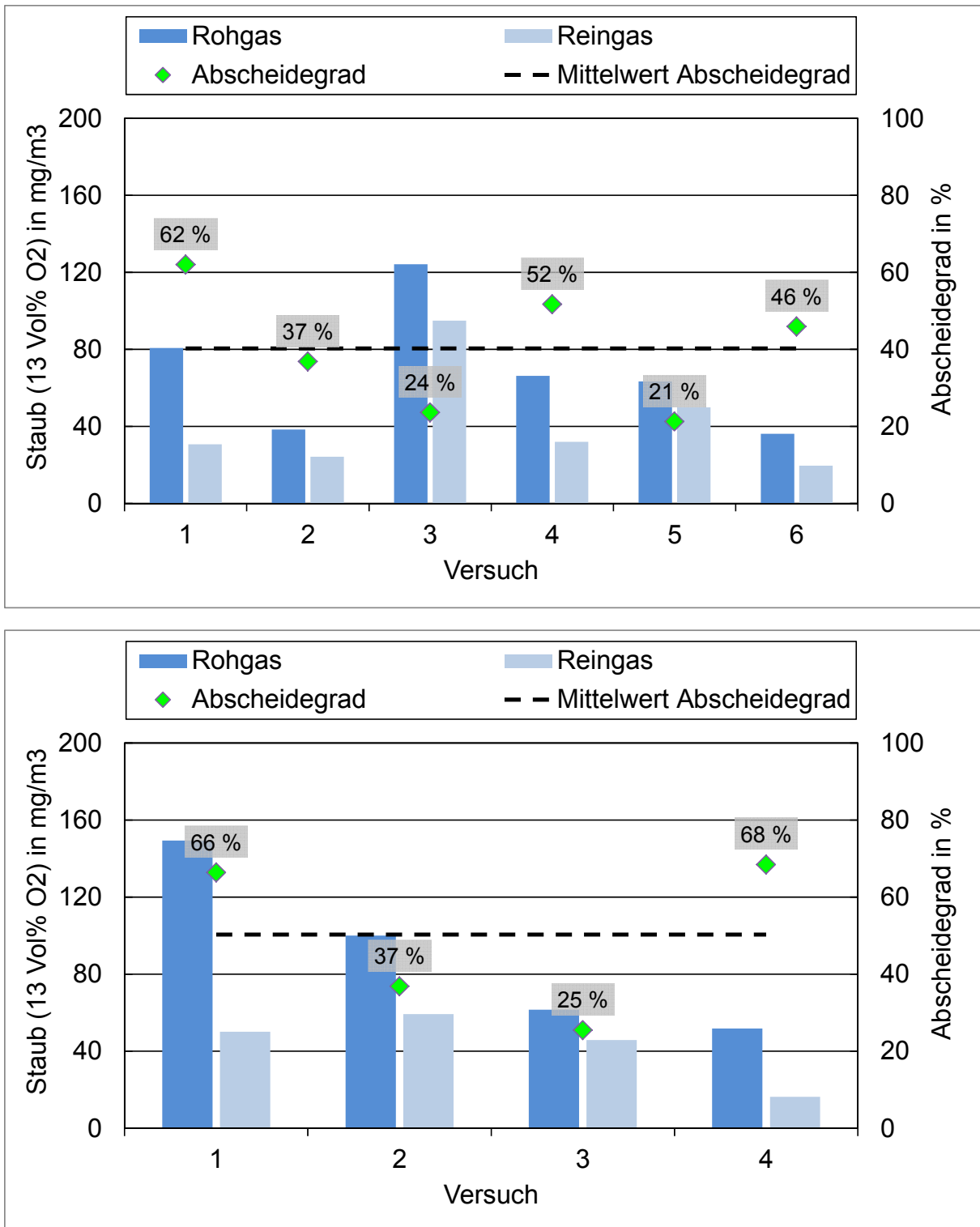
Kaminofen 1 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,40	9,5	152	12,6	3.227	500	45
2	1,45	11,8	308	14,0	2.517	108	75
3	1,39	13,4	272	10,3	3.088	137	63
4	1,45	13,4	270	10,6	2.275	101	62
<b>Mittelwert</b>				<b>11,9</b>	<b>2.777</b>	<b>212</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>1,7</b>	<b>454</b>	<b>193</b>	

Kaminofen 1 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 15 min / Verbrennungsphase: Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	149	50	66
2	100	59	41
3	62	46	25
4	52	16	68
<b>Mittelwert</b>	<b>91</b>	<b>43</b>	<b>50</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>44</b>	<b>19</b>	<b>21</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Da sich die Anbrandphase als kritisch für die hier betrachteten Elektrofilter zeigt, sollte in einem Prüfverfahren zur Ermittlung des Abscheidegrades die Verbrennungsphase auf jeden Fall mit betrachtet werden, auch wenn dadurch die Abbrandversuche etwas weniger reproduzierbar werden. Auch wird es unter Einbeziehung der Anbrandphase schwieriger, im Vorfeld die Verbrennungsqualität fest zu legen. Zündet der Brennstoff schlecht, kann ein als eigentlich bezüglich der Lufteinstellungen vorgesehener Abbrand mit guter Verbrennung in die Kategorie für schlechte Verbrennung fallen.

Dies stellt für ein Prüfverfahren allerdings kein großes Problem dar, die Abbrandergebnisse lassen sich im Nachhinein noch der richtigen Verbrennungsgüte zuordnen. Eine grobe Einschätzung ist bereits während des Abbrandes möglich, so dass ggf. zusätzliche Abbrandversuche während der Prüfung durchgeführt werden können, um jeweils eine verlangte Mindestanzahl von Abbränden je Verbrennungsqualität zu erhalten.



**Abbildung 6.4** Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter A / Probenahme 15 Minuten / Hauptverbrennung)

## 6.2 Kombination Kaminofen 2 mit Elektrofilter A

Bei der Gerätekombination Kaminofen 2 mit Elektrofilter A wurden die Staubkonzentrationen ebenfalls jeweils zeitgleich an den Messstellen 0 (Rohgas) und 4 (Reingas) gemessen.

Die Ergebnisse der ersten untersuchten Kombination Kaminofen 1 und Elektrofilter A zeigen, dass die Anbrandphase bei der Elektrofilterprüfung mit erfasst werden sollte. Außerdem traten bei einer Messdauer von 15 Minuten, vor allem bei schlechten Verbrennungsbedingungen, größere Standardabweichungen bei den Konzentrationsmessungen und beim berechneten Abscheidegrad auf, da es bei der kurzen Messzeit und dem damit verbundenen höheren Anteil der Anbrandphase schwieriger wird, definierte Verbrennungsbedingungen einzuhalten. Große Standardabweichungen beim Abscheidegrad erschweren eine zuverlässige Bewertung des Elektrofilters.

Deshalb wurden alle weiteren Messungen mit einer Probenahmedauer von 30 Minuten durchgeführt. Die mit der Kombination Kaminofen 2 und Elektrofilter A durchgeführten Versuche sind in Tabelle 6.9 aufgelistet. Die Messungen für die beiden Verbrennungsqualitäten wurden jeweils in 2 Messkampagnen durchgeführt, wobei jeweils nach der ersten Messkampagne eine Anpassung der Verbrennungsluft erfolgte.

Eine Unterscheidung der Verbrennungsqualität in gute und schlechte Verbrennung wurde auch hier anhand der auf 13 Vol% O<sub>2</sub> bezogenen CO-Konzentrationen getroffen. Diese korreliert nicht immer in erwarteter Weise mit der Staubkonzentration im Rohgas. Ab einer CO-Konzentration von ca. 2.000 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) wurde die Verbrennungsqualität als „schlecht“ eingestuft.

**Tabelle 6.9**      **Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 2 und Elektrofilter A**

Verbrennungsqualität	Messdauer	Start der Messung	Primärluft	Sekundärluft	Versuchszahl
gute Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	2 bzw. 1	3	7
schlechte Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	3 bzw. 2,5	2 bzw. 1	9

Wesentliche Betriebsparameter sowie die gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen dieser Versuchsreihen sind in Tabelle 6.10 (Versuche 1 bis 3: erste Messkampagne / Versuche 5 bis 7: zweite Messkampagne) und Tabelle 6.11 (Versuche 1 bis 5: erste Messkampagne / Versuche 6 bis 9: zweite Messkampagne) aufgeführt. Die Staubkonzentrationen im Rohgas (Messstelle 0) und im Reingas (Messstelle 4) sowie die berechneten Abscheidegrade sind in Abbildung 6.5 aufgetragen.

Bei dieser Kaminofen-Elektrofilter-Kombination traten bei beiden Verbrennungsqualitäten sehr geringe oder auch negative Abscheidegrade auf, die wahrscheinlich durch einen Wiedereintrag von abgeschiedenem Staub in das Abgas hervorgerufen wurden. Hierdurch lagen die berechneten mittleren Abscheidegrade bei beiden Versuchsreihen vergleichsweise niedrig, bei großer Standardabweichung.

**Tabelle 6.10 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 2 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,50	-	189	14,2	1.582	-	98
2	1,50	9,2	175	13,9	1.403	-	89
3	1,56	9,8	162	13,8	1.595	-	80
5	1,37	13,0	215	13,3	1.747	140	102
6	1,38	11,8	165	13,6	791	63	83
7	1,34	11,7	172	12,8	1.313	57	87
8	1,41	11,7	180	12,0	1.339	66	90
7	1,39	8,9	177	12,5	1.076	203	79
<b>Mittelwert</b>				<b>13,3</b>	<b>1.356</b>	<b>106</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>0,8</b>	<b>308</b>	<b>64</b>	

Kaminofen 2 - Elektrofilter A / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	238	191	20
2	168	139	17
3	160	125	22
5	96	113	-18
6	71	53	25
7	78	56	28
8	83	80	3
7	125	90	28
<b>Mittelwert</b>	<b>127</b>	<b>106</b>	<b>16</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>58</b>	<b>46</b>	<b>16</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Im Kaminofen 2 liegen andere Verbrennungsbedingungen vor, wie im moderneren Kaminofen 1. Dies zeigt sich vor allem an den VOC- und Staub-Konzentrationen (Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung), die im Rohgas (Messstelle 0) beim Kaminofen 2 bei beiden untersuchten Verbrennungsqualitäten höher sind als beim Kaminofen 1. Aufgrund des wasserführenden Wärmetauschers im Kaminofen 2 liegen die Abgastemperaturen an der Messstelle 0 deutlich niedriger als beim Kaminofen 1.

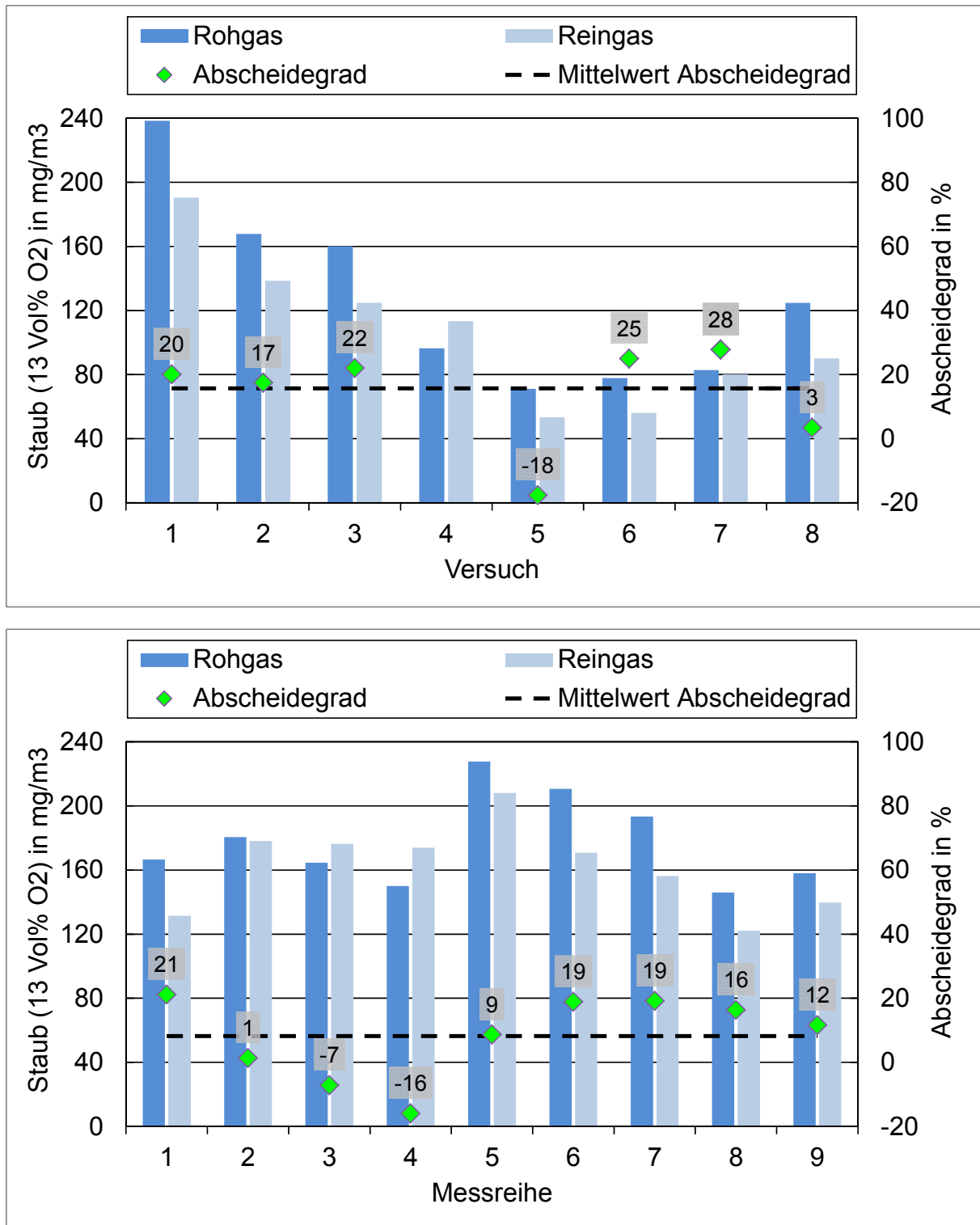
**Tabelle 6.11 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 2 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,40	9,9	156	14,9	3.140	-	81
2	1,54	10,4	211	12,2	3.346	404	84
3	1,23	10,2	197	13,3	2.843	320	83
4	1,36	10,0	198	12,6	2.514	277	81
5	1,35	10,6	200	12,5	4.366	594	87
6	1,36	8,9	181	12,8	2.806	512	78
7	1,41	8,8	177	11,8	3.475	572	77
8	1,42	9,0	185	10,8	2.409	448	79
9	1,41	8,5	185	10,4	8.234	1.059	79
<b>Mittelwert</b>				<b>12,4</b>	<b>3.681</b>	<b>523</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>1,3</b>	<b>1.806</b>	<b>244</b>	

Kaminofen 2 - Elektrofilter A / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	167	131	21
2	181	178	1
3	165	176	-7
4	150	174	-16
5	228	208	9
6	211	171	19
7	193	156	19
8	146	122	16
9	158	140	12
<b>Mittelwert</b>	<b>178</b>	<b>162</b>	<b>8</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>28</b>	<b>27</b>	<b>13</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>





**Abbildung 6.5** Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 2 und Elektrofilter A / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung)

Im Folgenden werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Gerätekombination Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter A verglichen und kurz diskutiert.

### 6.3 Vergleich Kombination Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter A

Die Mittelwerte und mittlere Standardabweichungen der gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen für die Versuchsreihen mit den Gerätekombinationen Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter A sind in Tabelle 6.12 aufgelistet.

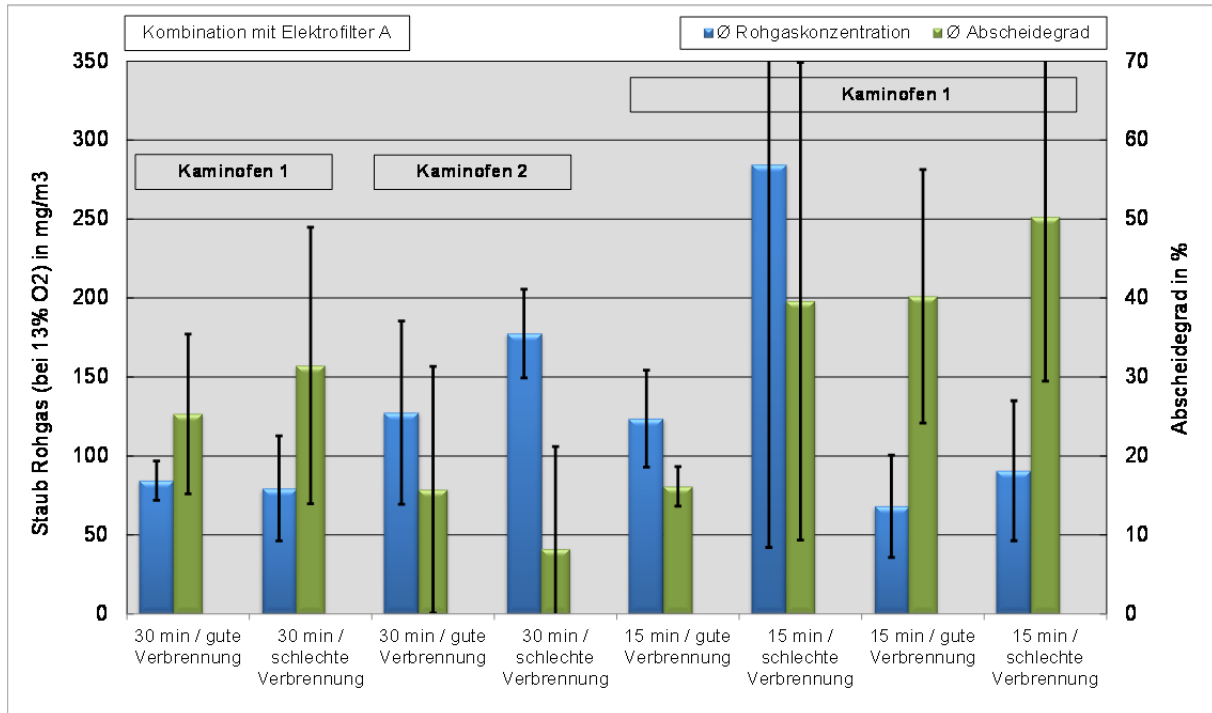
**Tabelle 6.12 Mittelwerte und mittlere Standardabweichungen der Gas- und Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 bzw. 4 für die Kombinationen Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter A**

Messstelle:		0 (Rohgas)			0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad [%]
Verbrennungsqualität		O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Staub *		
		[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	
<b>Kaminofen 1 - Elektrofilter A / Probenahmedauer 30 min / Anbrand + Hauptverbrennung</b>							
gut	Mittelwert	12,3	1.537	80	84	64	25
	Standardabweichung	0,5	330	25	12	17	10
schlecht	Mittelwert	9,0	3.772	286	79	52	31
	Standardabweichung	3,0	1.000	55	33	16	18
<b>Kaminofen 2 - Elektrofilter A / Probenahmedauer 30 min / Anbrand + Hauptverbrennung</b>							
gut	Mittelwert	13,3	1.356	106	127	106	16
	Standardabweichung	0,8	308	64	58	46	16
schlecht	Mittelwert	12,4	3.681	523	178	162	8
	Standardabweichung	1,3	1.806	244	28	27	13
<b>Kaminofen 1 - Elektrofilter A / Probenahmedauer 15 min / Anbrand + Beginn Hauptverbrennung</b>							
gut	Mittelwert	9,6	1.808	136	124	104	16
	Standardabweichung	1,2	930	110	31	28	3
schlecht	Mittelwert	7,4	17.602	2.188	285	186	40
	Standardabweichung	1,3	12.085	2.175	242	183	30
<b>Kaminofen 1 - Elektrofilter A / Probenahmedauer 15 min / Hauptverbrennung</b>							
gut	Mittelwert	12,6	1.204	52	68	42	40
	Standardabweichung	1,7	570	22	32	28	16
schlecht	Mittelwert	11,9	2.777	212	91	43	50
	Standardabweichung	1,7	454	193	44	19	21

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Der Abscheidegrad des Elektrofilters A ist sowohl von der Verbrennungsqualität (und damit der Staubkonzentration im Rohgas und den Staubeigenschaften) als auch von der eingesetzten Feuerstätte abhängig. Beim Kaminofen 1 nimmt der Abscheidegrad, unabhängig von der Probenahmedauer bzw. der Verbrennungsphase die beprobt wird, zu, wenn sich die Verbrennungsqualität verschlechtert. Beim Kaminofen 2 ist dies nicht so, hier nimmt bei schlechterer Verbrennungsqualität der Abscheidegrad ab. Insgesamt ist der mittlere Abscheidegrad beim Kaminofen 2 bei beiden untersuchten Verbrennungsqualitäten geringer als beim Einsatz des Elektrofilters A beim Kaminofen 1.

Beim Kaminofen 2 nimmt die relative Standardabweichung, bezogen auf den jeweiligen Mittelwert der Standardabweichung für die Versuchsreihe, deutlich zu. In Abbildung 6.6 sind die Staubkonzentrationen im Rohgas, die berechneten Abscheidegrade sowie die Mittelwerte der Standardabweichungen für die Kombinationen von Kaminofen 1 und 2 jeweils mit Elektrofilter A dargestellt.



**Abbildung 6.6 Mittelwerte der Staubkonzentrationen im Rohgas, der Abscheidegrade sowie der Standardabweichungen für die Kombination Kaminofen 1 und 2 mit jeweils Elektrofilter A**

Wird nur die Hauptverbrennungsphase des Chargenabbrandes erfasst, ergeben sich die höchsten Abscheidegrade mit nahezu identischen relativen Standardabweichungen.

Ein ähnliches Betriebsverhalten zeigte der Elektrofilter Zumikron in Kombination mit einem Kaminofen des Herstellers Wodtke vom Typ Moon bei den Untersuchungen von Kiener et al. (2010). Auch bei diesen Prüfstandsmessungen ergaben sich große Schwankungen des Abscheidegrades, negative Abscheidegrade und insgesamt ein vergleichsweise geringer mittlerer Abscheidegrad (siehe Abbildung 6.7).

Die Prüfung von Elektrofiltern sollte, ausgehend von diesen Untersuchungsergebnissen, an zumindest zwei unterschiedlichen Kaminöfen, was die Qualität der Verbrennung betrifft, durchgeführt werden. Hierbei sollte ein Kaminofen eingesetzt werden, bei dem auch bei schlechter Verbrennungsqualität noch vergleichsweise niedrige VOC-Konzentrationen im Abgas auftreten und ein Gerät mit höheren VOC-Konzentrationen. Hierdurch wird die Bandbreite möglicher Partikeleigenschaften am weitest gehenden abgedeckt.

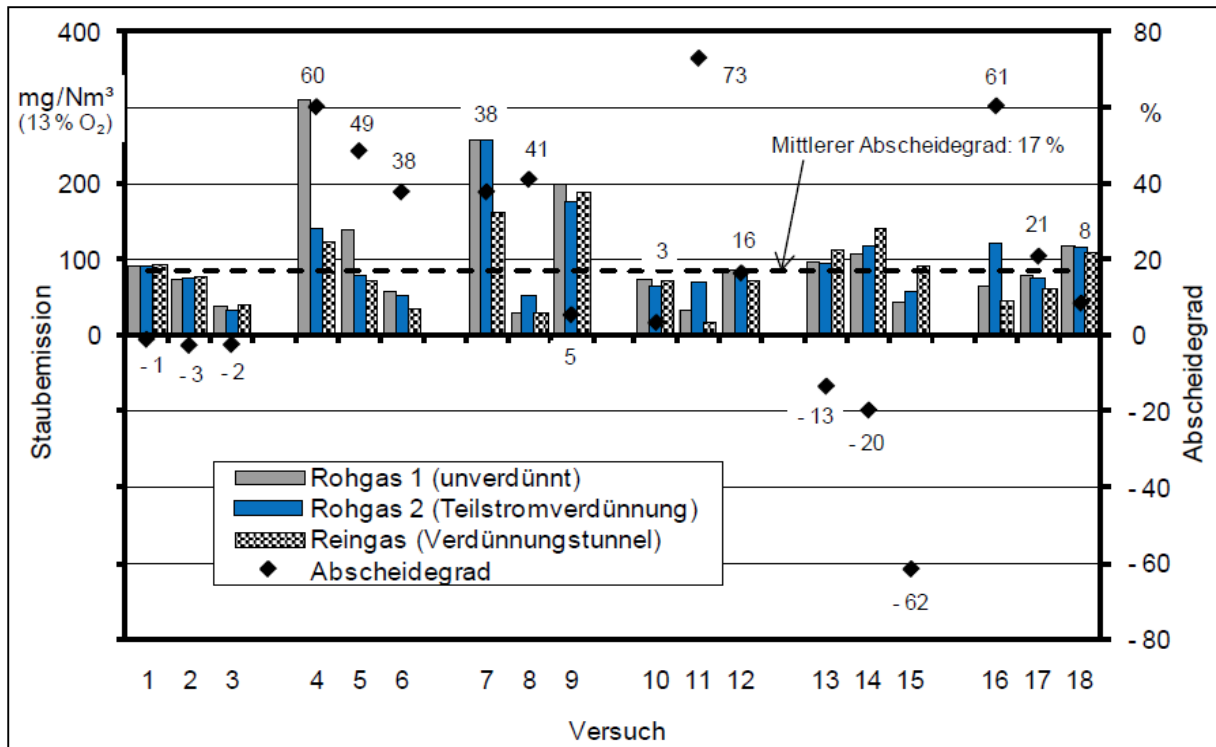


Abbildung 6.7 Untersuchungsergebnisse von Kiener et al. (2010) mit Elektrofilter Zumikron in Kombination mit Kaminofen Moon des Herstellers Wodtke

Größere Schwankungen der Gas- und Staubkonzentrationen im Rohgas der Kaminöfen, auch bei konstant gehaltenen Randbedingungen und einer standardisierten Vorgehensweise, können nicht verhindert werden. Die Höhe der Schwankung hängt von der gewünschten Verbrennungsqualität und der Probenahmedauer ab. Je schlechter die Verbrennungsqualität und je kürzer die Probenahmedauer umso ist i.a. die Schwankungsbreite. Diese hängt auch vom grundsätzlichen Betriebsverhalten des eingesetzten Kaminofens und damit von dessen technischer Ausführung ab.

#### 6.4 Kombination Kaminofen 1 mit Elektrofilter B

Bei der Gerätekombination Kaminofen 1 mit Elektrofilter B wurden die Staubkonzentrationen ebenfalls jeweils zeitgleich an den Messstellen 0 (Rohgas) und 4 (Reingas) gemessen und es wurden nur Messungen mit einer Probenahmedauer von 30 Minuten durchgeführt, siehe Tabelle 6.13.

Eine Unterscheidung der Verbrennungsqualität in gute und schlechte Verbrennung erfolgte anhand der auf 13 Vol% O<sub>2</sub> bezogenen CO-Konzentrationen. Diese korreliert nicht immer in erwarteter Weise mit der Staubkonzentration im Rohgas. Ab einer CO-Konzentration von ca. 2.500 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) wurde die Verbrennungsqualität als „schlecht“ eingestuft.

**Tabelle 6.13** Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 1 und Elektrofilter B

Verbrennungsqualität	Messdauer	Start der Messung	Primärluft	Sekundärluft	Versuchszahl
gute Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	1 bzw. 2	3	13
schlechte Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	2	1	4

Wesentliche Betriebsparameter sowie die gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen dieser Versuchsreihen sind in Tabelle 6.14 und Tabelle 6.15 aufgeführt. Die Staubkonzentrationen im Rohgas (Messstelle 0) und im Reingas (Messstelle 4) sowie die berechneten Abscheidegrade sind in Abbildung 6.8 aufgetragen.

Bei dieser Kaminofen-Elektrofilter-Kombination traten bei beiden Verbrennungsqualitäten vergleichsweise hohe und stabile Abscheidegrade auf. Einen Einfluss der automatischen Abreinigung auf die Staubkonzentrationen im Reingas konnte nicht beobachtet werden.

Der Abscheidegrad hängt von der Staubkonzentration im Rohgas ab. Sinkt die Staubkonzentration im Rohgas, so nimmt der Abscheidegrad zu.

Der Elektrofilter B verursacht einen Druckverlust von nur wenigen Pa. Dies wurde bei den Untersuchungen durch einen etwas höheren angelegten Unterdruck weitgehend kompensiert. Allerdings dämpft der Elektrofilter auch den Verlauf des Unterdrucks am Ausgang der Feuerstätte während des Chargenabbrandes, weshalb ein höherer Unterdruck bei Beginn des Abbrandes eingestellt werden musste. Hierdurch war es schwieriger, schlechte Verbrennungsbedingungen zu erreichen, weshalb hier die Versuchszahl geringer ist.

Die auf 13 Vol% bezogenen CO-Konzentrationen unterscheiden sich bei den einzelnen Messreihen beim Kaminofen 1 in Kombination mit dem Elektrofilter B deutlich (Mittelwert schlechte Verbrennung im Verhältnis zu guter Verbrennung: ca. Faktor 4,4). Dies trifft allerdings für die Staubkonzentrationen im Rohgas nicht im selben Maße zu. Hier unterscheiden sich die bezogenen Konzentrationen kaum, die nicht bezogenen Staubkonzentrationen im Rohgas liegen bei der guten Verbrennung im Mittel für die 13 durchgeführten Versuche bei  $93 \text{ mg/m}^3$  und bei schlechter Verbrennung im Mittel für die 4 Versuche bei  $117 \text{ mg/m}^3$ . Da bei schlechter Verbrennung der Luftüberschuss abnimmt, ergeben sich im Mittel bei den auf 13 Vol%  $\text{O}_2$  bezogenen Staubkonzentrationen nahezu keine Unterschiede mehr für die beiden eingestellten Verbrennungsqualitäten.

In Abhängigkeit von der Qualität der Einzelfeuerstätte kann es somit u.U. schwierig und zeitaufwändig werden, definiert schlechtere Verbrennungszustände einzustellen. Auch ist die Beurteilung der Verbrennungsqualität anhand der CO-Konzentration nur möglich, wenn zuvor der Zusammenhang zwischen der CO- und der Staubkonzentration bei bestimmten Randbedingungen ermittelt wurde.

**Tabelle 6.14 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 1 - Elektrofilter B / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,50	12,7	275	10,5	756	80	143
2	1,44	12,0	263	11,6	1.484	393	132
3	1,59	12,2	276	10,8	483	76	138
4	1,69	12,4	266	12,3	1.044	196	130
5	1,72	13,0	286	9,3	644	138	140
6	1,32	13,2	214	10,7	1.587	100	107
7	1,43	12,5	287	10,5	959	79	146
8	1,41	12,8	281	10,7	1.520	307	140
9	1,37	11,8	285	9,9	1.648	124	143
10	1,37	12,4	263	12,2	1.586	116	141
11	1,31	12,3	264	11,9	823	51	140
12	1,48	13,6	230	9,6	2.051	208	121
13	1,44	12,8	245	9,0	895	96	118
<b>Mittelwert</b>				<b>10,7</b>	<b>1.191</b>	<b>151</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>1,1</b>	<b>478</b>	<b>101</b>	

Kaminofen 1 - Elektrofilter B / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	62	24	62
2	102	47	54
3	34	15	57
4	45	19	57
5	50	27	46
6	49	16	68
7	94	55	41
8	108	58	47
9	143	89	38
10	98	54	45
11	68	35	48
12	44	13	71
13	33	12	63
<b>Mittelwert</b>	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>54</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>34</b>	<b>23</b>	<b>10</b>

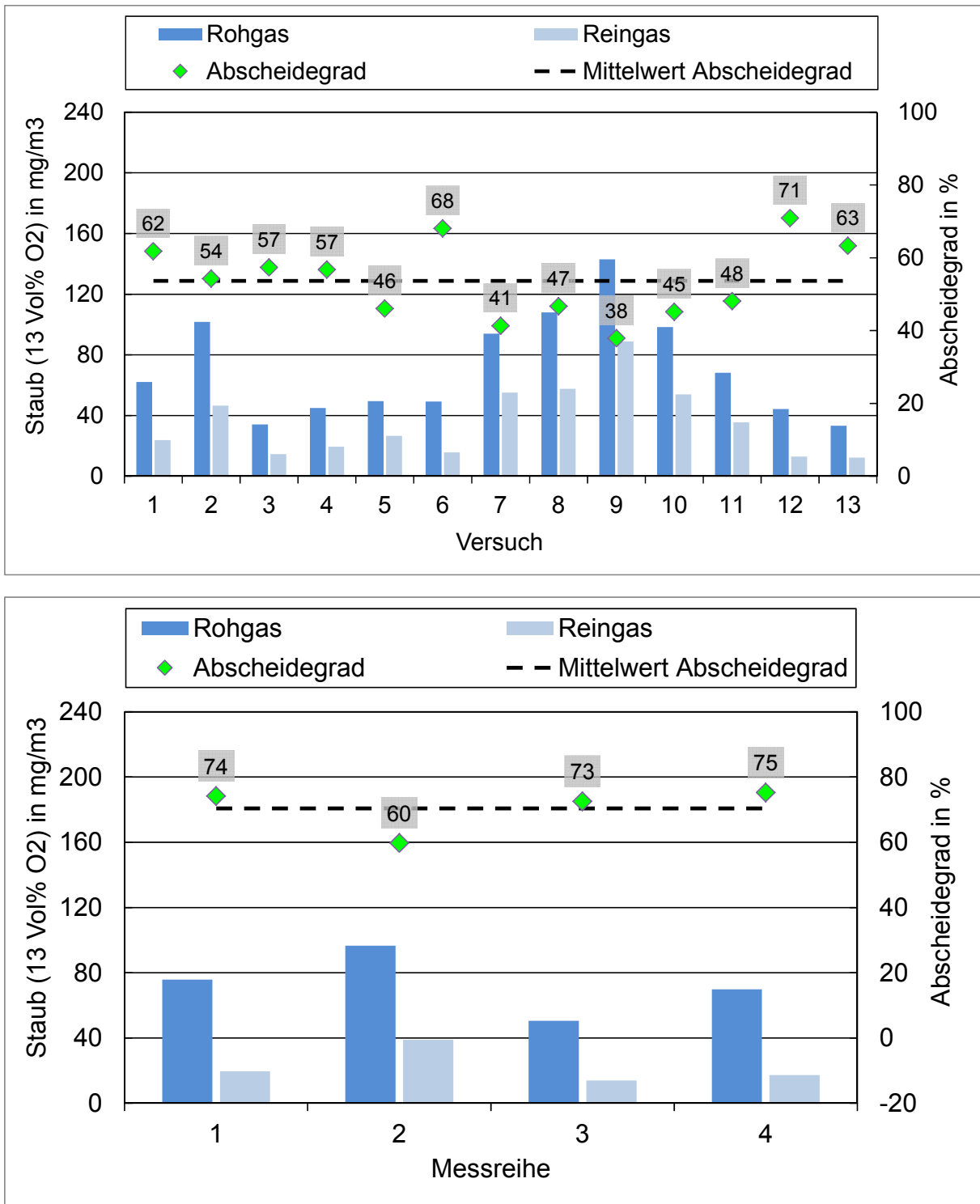
\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

**Tabelle 6.15 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 1 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 1 - Elektrofilter B / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,39	12,7	175	12,5	5.134	670	88
2	1,49	12,4	257	6,6	7.707	588	134
3	1,55	11,5	226	7,8	2.930	127	110
4	1,40	11,2	262	7,8	5.188	394	122
<b>Mittelwert</b>				<b>8,7</b>	<b>5.240</b>	<b>445</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>2,6</b>	<b>1.952</b>	<b>242</b>	

Kaminofen 1 - Elektrofilter B / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	76	20	74
2	97	39	60
3	51	14	73
4	70	17	75
<b>Mittelwert</b>	<b>73</b>	<b>22</b>	<b>70</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>7</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>



**Abbildung 6.8** Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 1 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung)



## 6.5 Kombination Kaminofen 2 mit Elektrofilter B

Bei der Gerätekombination Kaminofen 2 mit Elektrofilter B wurden die Staubkonzentrationen zeitgleich an den Messstellen 0 (Rohgas) und 4 (Reingas) mit einer Probenahmedauer von 30 Minuten durchgeführt, das Versuchsprogramm ist in Tabelle 6.16 aufgelistet.

**Tabelle 6.16 Versuchsprogramm mit Kombination Kaminofen 2 und Elektrofilter B**

Verbrennungsqualität	Messdauer	Start der Messung	Primärluft	Sekundärluft	Versuchsanzahl
gute Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	0 bzw. 1	3	14
schlechte Verbrennung	30 min	30 sec nach Auflage	3	1 bzw. 0	12

Eine Unterscheidung der Verbrennungsqualität in gute und schlechte Verbrennung wurde auch hier anhand der auf 13 Vol% O<sub>2</sub> bezogenen CO-Konzentrationen getroffen. Diese korreliert nicht immer in erwarteter Weise mit der Staubkonzentration im Rohgas. Ab einer CO-Konzentration von ca. 2.000 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) wurde die Verbrennungsqualität als „schlecht“ eingestuft.

Wesentliche Betriebsparameter sowie die gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen dieser Versuchsreihen sind in Tabelle 6.17, Tabelle 6.14 und Tabelle 6.18 aufgeführt. Die Staubkonzentrationen im Rohgas (Messstelle 0) und im Reingas (Messstelle 4) sowie die berechneten Abscheidegrade sind in Abbildung 6.9 aufgetragen.

Auch mit dem Kaminofen 2 in Kombination mit dem Elektrofilter B werden ähnlich hohe Abscheidegrade bei guter und schlechter Verbrennung erreicht wie mit dem Kaminofen 1. Auch sind die Standardabweichungen der Abscheidegrade vergleichbar niedrig.

Beim Kaminofen 2 ist der Unterschied in den bezogenen mittleren Staubkonzentrationen zwischen guter und schlechter Verbrennung etwas höher, allerdings geringer als beim Kaminofen 2 in Kombination mit dem Elektrofilter A. Aufgrund des höheren Druckverlustes vom Elektrofilter B und der Glättung des Unterdruckverlaufs während des Chargenabbrandes hat sich das Emissionsverhalten des Kaminofens verändert, so dass trotz höherer CO- und VOC-Konzentrationen bei schlechten Verbrennungsbedingungen die Staubkonzentrationen etwas abnahmen.

**Tabelle 6.17 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / gute Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 2 - Elektrofilter B / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,36	10,8	202	11,5	724	74	76
2	1,44	10,2	197	12,1	976	108	69
3	1,38	10,2	200	11,6	631	59	77
4	1,44	13,4	193	10,0	2.004	227	84
5	1,39	11,4	179	9,1	734	82	97
6	1,40	11,1	205	11,6	848	65	109
7	1,37	11,2	203	11,3	1.299	101	115
8	1,45	10,8	201	11,5	261	27	114
9	1,36	11,2	204	11,4	1.781	142	120
10	0,91	12,5	213	13,8	1.070	65	121
11	1,11	11,0	178	15,6	1.493	95	104
12	0,90	10,7	187	14,5	967	79	106
13	0,89	9,7	183	14,8	1.860	147	102
14	0,84	9,7	174	15,3	1.548	170	101
<b>Mittelwert</b>				<b>12,4</b>	<b>1.157</b>	<b>103</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>2,0</b>	<b>519</b>	<b>53</b>	

Kaminofen 2 - Elektrofilter B / gute Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	136	67	51
2	147	61	59
3	141	69	51
4	150	67	55
5	95	43	55
6	131	68	48
7	133	76	43
8	136	58	58
9	129	84	35
10	96	48	50
11	44	16	63
12	39	15	63
13	48	17	64
14	45	18	61
<b>Mittelwert</b>	<b>105</b>	<b>50</b>	<b>54</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>43</b>	<b>24</b>	<b>8</b>

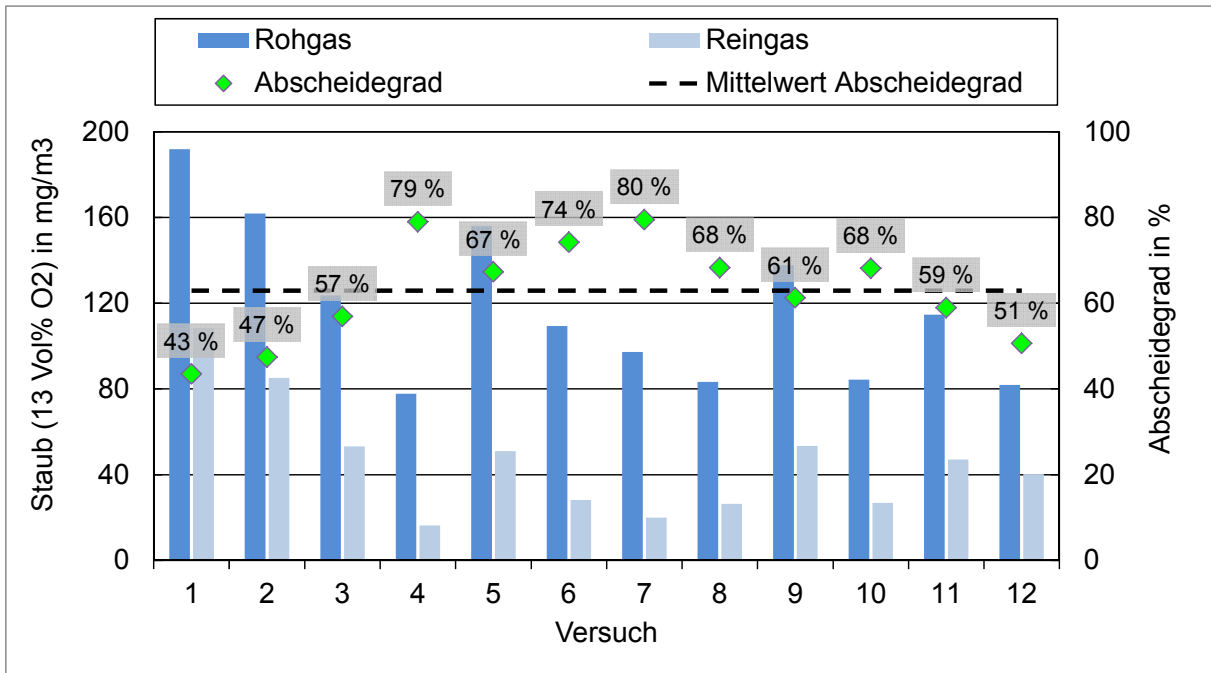
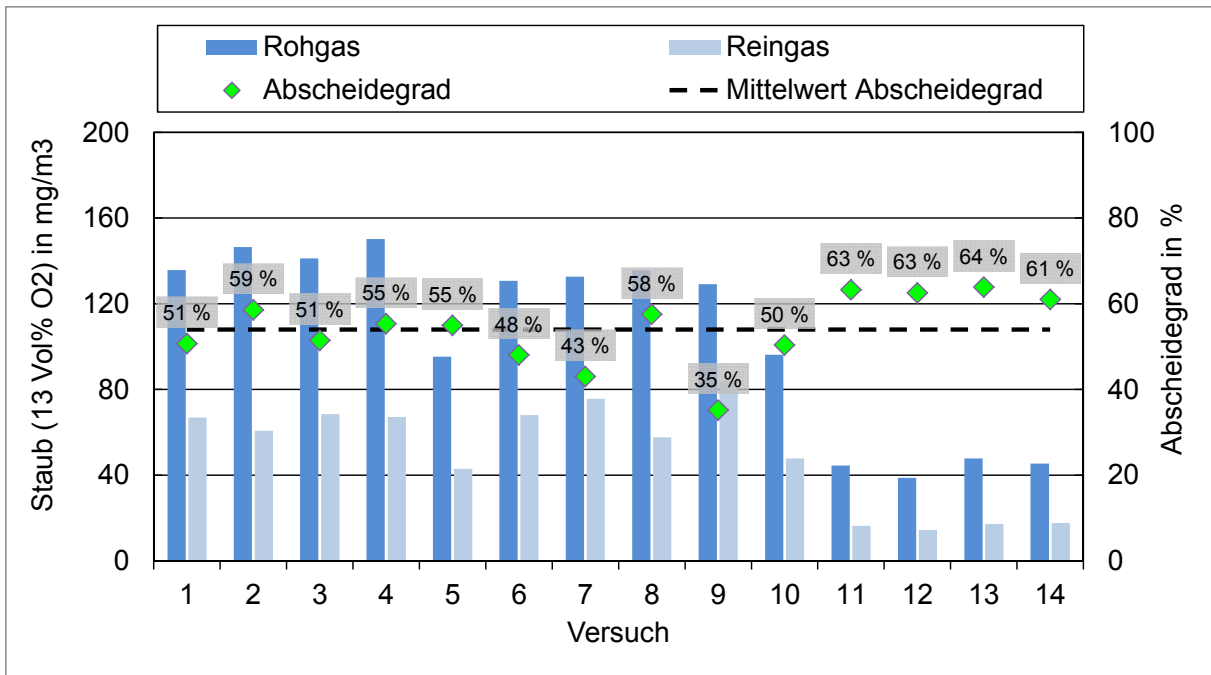
\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

**Tabelle 6.18 Betriebsparameter und Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 und 4 (Kaminofen 2 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / schlechte Verbrennung / Anbrand + Hauptverbrennung)**

Kaminofen 2 - Elektrofilter B / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung							
Messstelle:		0 (Rohgas)					4 (Reingas)
Versuch	Holzaufgabe	Unterdruck	Temperatur	O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Temperatur
	[kg]	[Pa]	[°C]	[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1	1,38	10,2	203	10,8	2.475	315	75
2	1,22	10,3	198	11,7	2.723	296	75
3	1,47	13,7	170	8,7	7.532	630	60
4	1,45	11,0	140	8,2	10.741	905	56
5	1,50	9,7	154	9,5	12.784	1.373	52
6	1,57	9,3	176	8,1	6.759	702	56
7	1,43	12,6	143	8,7	12.415	1.138	85
8	1,38	12,1	163	10,2	2.887	242	90
9	1,47	10,8	172	10,2	6.471	664	90
10	1,38	11,7	157	9,4	7.332	769	84
11	1,49	11,2	201	11,6	3.692	358	113
12	0,88	12,2	164	16,3	2.846	545	95
<b>Mittelwert</b>				<b>10,3</b>	<b>6.555</b>	<b>661</b>	
<b>Standardabweichung</b>				<b>2,3</b>	<b>3.802</b>	<b>349</b>	

Kaminofen 2 - Elektrofilter B / schlechte Verbrennung / Probenahmedauer 30 min / Verbrennungsphase: Anbrand + Hauptverbrennung			
Messstelle:	0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Versuch	Staub *		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	192	108	43
2	162	85	47
3	124	53	57
4	78	16	79
5	156	51	67
6	109	28	74
7	97	20	80
8	83	26	68
9	138	53	61
10	84	27	68
11	115	47	59
12	82	40	51
<b>Mittelwert</b>	<b>118</b>	<b>46</b>	<b>63</b>
<b>Standardabweichung</b>	<b>37</b>	<b>27</b>	<b>12</b>

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>



**Abbildung 6.9** Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas, berechnete Abscheidegrade sowie Mittelwert der Abscheidegrade bei guter Verbrennung (oben) und schlechter Verbrennung (unten) (Kaminofen 2 und Elektrofilter B / Probenahme 30 Minuten / Anbrand + Hauptverbrennung)

## 6.6 Vergleich Kombination Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter B

Die Mittelwerte und mittlere Standardabweichungen der gemessenen Staub- und Gaskonzentrationen für die Versuchsreihen mit den Gerätekombinationen Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter B sind in Tabelle 6.19 aufgelistet.

**Tabelle 6.19 Mittelwerte und mittlere Standardabweichungen der Gas- und Staubkonzentrationen an den Messstellen 0 bzw. 4 für die Kombinationen Kaminofen 1 und 2 mit Elektrofilter B**

Messstelle:		0 (Rohgas)			0 (Rohgas)	4 (Reingas)	Abscheidegrad
Verbrennungsqualität		O <sub>2</sub>	CO *	VOC *	Staub *		
		[Vol%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mgC/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
<b>Kaminofen 1 - Elektrofilter B / Probenahmedauer 30 min / Anbrand + Hauptverbrennung</b>							
gut	Mittelwert	10,7	1.191	151	72	36	54
	Standardabweichung	1,1	478	101	34	23	10
schlecht	Mittelwert	8,7	5.240	445	73	22	70
	Standardabweichung	2,6	1.952	242	19	11	7
<b>Kaminofen 2 - Elektrofilter B / Probenahmedauer 30 min / Anbrand + Hauptverbrennung</b>							
gut	Mittelwert	12,4	1.157	103	105	50	54
	Standardabweichung	2,0	519	53	43	24	8
schlecht	Mittelwert	10,3	6.555	661	118	46	63
	Standardabweichung	2,3	3.802	349	37	27	12

\* bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>

Der Abscheidegrad des Elektrofilters B ist vergleichsweise wenig von der Verbrennungsqualität (und damit der Staubkonzentration im Rohgas und den Staubeigenschaften) und von der eingesetzten Feuerstätte abhängig. Sowohl beim Kaminofen 1 als auch 2 nimmt der mittlere Abscheidegrad zu, wenn sich die Verbrennungsqualität verschlechtert. Insgesamt ist der mittlere Abscheidegrad beim Kaminofen 1 bei der schlechten Verbrennungsqualität etwas höher als beim Einsatz des Elektrofilters B am Kaminofen 2.

Beim Kaminofen 2 nimmt die relative Standardabweichung des Abscheidegrades, bezogen auf den jeweiligen Mittelwert der Standardabweichung für die Versuchsreihe, bei guten Verbrennungsbedingungen ab und bei schlechten Verbrennungsbedingungen zu. Allerdings sind hier die Unterschiede zwischen den beiden Kaminöfen deutlich geringer als beim Elektrofilter A.

In Abbildung 6.10 sind die Staubkonzentrationen im Rohgas, die berechneten Abscheidegrade sowie die Mittelwerte der Standardabweichungen für die Kombinationen von Kaminofen 1 und 2 jeweils mit Elektrofilter B dargestellt.

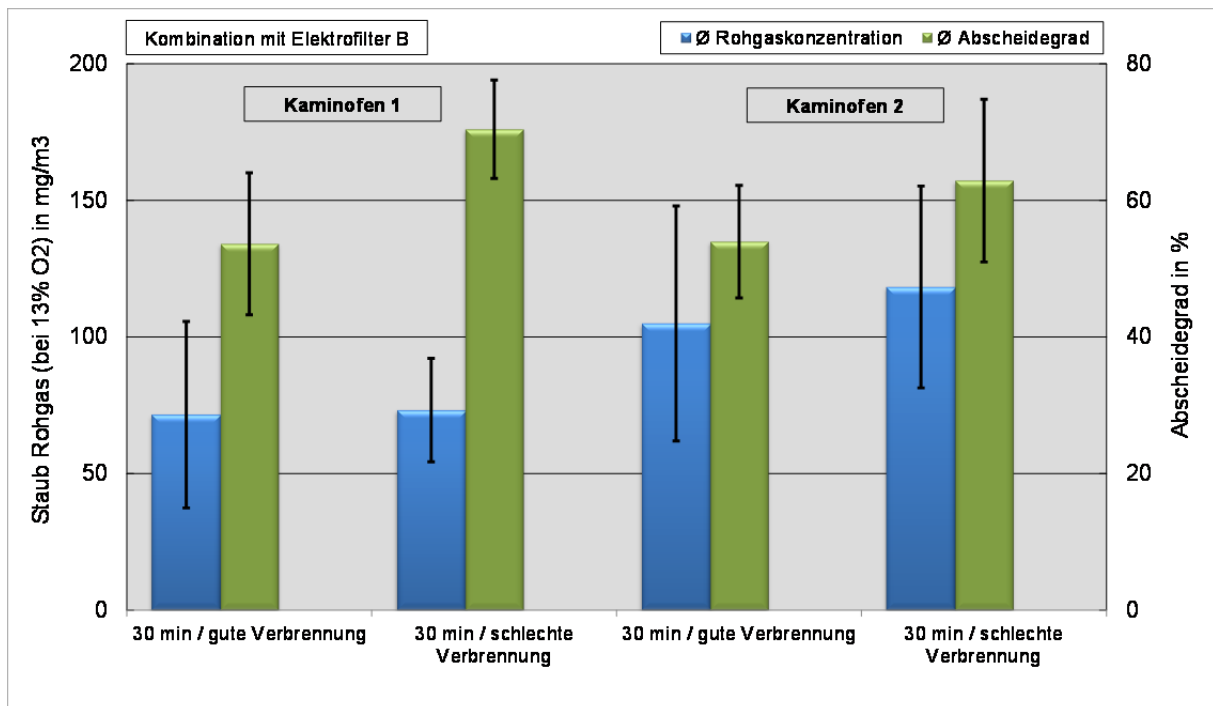


Abbildung 6.10 Mittelwerte der Staubkonzentrationen im Rohgas, der Abscheidegrade sowie der Standardabweichungen für die Kombination Kaminofen 1 und 2 mit jeweils Elektrofilter B

## 7 Schlussfolgerungen

Als Endergebnis der durchgeführten Untersuchungen steht ein angepasstes Prüfverfahren für Staubabscheider in Kombination mit Einzelraumfeuerstätten zur Verfügung, welches in der Norm DIN SPEC 33999 (Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, Dezember 2014) beschrieben wird. Wesentliche Erkenntnisse aus den Untersuchungen wurden bei der Ausarbeitung dieser Norm für den Bereich „Prüfung von Abscheidern für handbeschickte Feuerungen ohne Gebläse“ berücksichtigt. Dies betrifft u.a. die Anforderungen an den Aufbau des Prüfstandes und der eingesetzten Messtechnik, die Ausführung der Messstrecken für die Staubprobenahmen und die Festlegung der Prüfbedingungen bei den Abbrandversuchen. Außerdem erfolgten anhand der Erfahrungen aus diesem Projekt die Festlegungen zum Betrieb der Feuerstätten, die Durchführung der Staubmessungen, die Auswertung und die Bewertung der Messungen.

Als Probenahmedauer wurde in der Norm 15 Minuten festgelegt, dies hat Vorteile bei der Durchführung der Prüfung, da bei Heizgeräten mit einer Abbranddauer von ca. 45 Minuten es aufgrund der zeitlichen Abläufe problematisch werden kann, bei einer 30 minütigen Staubprobenahme unmittelbar nach Abbrandende eine erneute Messung zu starten. Der Ausbau der Staubmeseinrichtungen, die Entnahme der belegten Filter und die Spülung der Entnahmesonde zur Erfassung von Staubablagerungen von dem Staubfilter und die Vorbereitung einer neuen Staubmessung dauern u.U. länger als die verbleibenden 15 Minuten des Chargenabbrandes. Durch die kürzere Probenahmedauer ist allerdings mit stärkeren Schwankungen der Gas- und Staubkonzentrationen aus den Einzelfeuerstätten zwischen den einzelnen Versuchen zu rechnen.

Die größte Unsicherheit bei der Bewertung der Abscheidegrade für die nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen ergibt sich bei einer großen Streuung der Ergebnisse, wie dies z.B. beim untersuchten Elektrofilter A der Fall war. In der Norm wurde zur Begrenzung des Prüfaufwandes festgelegt, dass je Abgaszustand, d.h. je Verbrennungsqualität, 5 Staubmessungen zur Bestimmung des Abscheidegrades durchzuführen sind. Hierdurch können sich hohe Standardabweichungen für den berechneten Abscheidegrad ergeben (z.B. Werte im Bereich des Elektrofilters A). Eine Anforderung an eine einzuhaltende Standardabweichung, und damit an eine Begrenzung der Unsicherheit der Abscheidegradbestimmung, hätte in diesen Fällen eine wesentliche Erhöhung des Prüfaufwandes zur Folge.

Um die Aussagekraft der Prüfergebnisse zu erhöhen und um Staubminderungseinrichtungen mit stabilen Abscheidegraden nicht zu benachteiligen, wurde in der Norm die Ermittlung eines signifikanten Abscheidegrades eingeführt, indem die erweiterte Ergebnisunsicherheit (d.h. bei 5 Messwerten zum Abscheidegrad ungefähr die 2,7 fache Standardabweichung) berücksichtigt wird.

Inwieweit die neue Norm DIN SPEC 33999 zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen sich in der Prüfpraxis bewährt, sollte durch z.B. anhand von modellhaften Prüfungen von Staubminderungseinrichtungen bewertet werden.

### 8 Quellenverzeichnis

1. BImSchV: *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)* vom 26. Januar 2010. BGBl I, S. 38., 2010.
- Axarlis, Alexander Georgios: *Untersuchungen zur isokinetischen Probenahme bei Staubmessungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe*. Diplomarbeit Nr. 3007 am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011.
- Buderus: *Bedienungs- und Montageanleitung Kaminofen blueLine 4 W*. BBT Thermotechnik GmbH. Buderus Deutschland. Wetzlar, 2007.
- Böttner, Carl-Uwe: *Über den Einfluss der elektrostatischen Feldkraft auf turbulente Zweiphasenströmungen*. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002.
- Bologa, Andrei; Woletz, Klaus: *Bedienungsanleitung für die Prototypfilter*. Institut für Technische Chemie (ITC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, 1.3.2014.
- DIBt: Deutsches Institut für Bautechnik, Vorläufiges Prüfprogramm für Staubabscheider für Feuerungsanlagen. Entwurf November 2011, Referat III 5, Berlin. Zulassungen national für Staubabscheider / Filter, Auflistung unter <https://www.dibt.de/de/Geschaeftsfelder/GF-Zulassungen.html>, Stand 18.3.2015.
- DIBt: Deutsches Institut für Bautechnik, Referat III 5, Berlin. Zulassungen national für Staubabscheider / Filter, Auflistung unter <https://www.dibt.de/de/Geschaeftsfelder/GF-Zulassungen.html>, Stand 18.3.2015.
- Hase: *Bedienungsanleitung Lagos*. Hase Kaminofenbau GmbH, Trier, 2012.
- Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans: *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Technik und Verfahren*: Springer Verlag, Heidelberg, 2009.
- Kiener, Susanne; Turowski, Peter; Hartmann, Hans; Schmoeckel, Gerhard: *Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel*. Berichte aus dem TFZ 23, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, September 2010.
- Lauber, Adrian; Nussbaumer, Thomas: *Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern*. Tagungsband 11. Holzenergiesymposium, ETH-Zürich, 17. September 2010.
- Nussbaumer, Thomas: *Feinstaub aus Holzfeuerungen*. HK-Gebäudetechnik. Wärmetechnik Energie. Nr. 11, S. 29-35. 2010.
- Oser, Michael; Nussbaumer, Thomas; Müller, Peter; Mohr, Martin; Figi, Renato: *Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen*. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Verenum, Zürich, 2003.
- Paur, Hanns-Rudolf; Bologa, Andrei; Mais, Gerhard; Rheinheimer, Hans-Peter; Woletz, Klaus: *Emissionsminderung mit dem Carola-Abscheider bei Kleinf Feuerungsanlagen*. Konferenzband Energetische Biomassenutzung - Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft, 5. - 6. November 2012, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 9, DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, 2013.
- Rüegg, Peter: *Einbau des Partikelabscheiders Zumik@on*. [www.ruegg-ecotec.ch](http://www.ruegg-ecotec.ch) (Stand 26.3.2015), Rüegg Ecotec AG, CH-Wila. 2015



- Schön, Claudia; Hartmann, Hans: *Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen*. Berichte aus dem TFZ 36, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, Juli 2014.
- Struschka, Michael; Schäfer, Christian, Thienel, Michael: Durchführung einer modellhaften Eignungsprüfung eines Staubmessverfahrens für die Überwachung der neuen Staubgrenzwerte der 1. BImSchV für Kleinfeuerungsanlagen. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen UFOPLAN 3710 42 201. Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Stuttgart und TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München, Februar 2012.
- Struschka, M., Straub, D., Pfeiffer, F., Baumbach, G., Poppitz, W., Bobeth, A.: Zusammenhang zwischen Partikelemission und Abgaszustand bei chargenweise beschickten Feuerungsanlagen. Immissionsschutz, Heft 1, 2003, S. 4-12.
- Turowski, Peter: *Überblick zu aktuellen Entwicklungen bei sekundären Staubabscheidern*. Vortrag beim Arbeitskreis Holzfeuerung. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, 25. Mai 2011.
- VDI-Richtlinie 2066, Blatt 1: *Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen, gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung*. Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- VDI-Richtlinie 3678 Blatt 1: *Elektrofilter, Prozessgas- und Abgasreinigung*, Beuth Verlag, Berlin, September 2011.
- VDI-Richtlinie 4206, Blatt 2: *Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen. Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen*. Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- Wieser, Ueli; Gaegauf, Christian; Macquat, Yves: Partikelemissionen aus Holzfeuerungen. Ökozentrum Langenbruck, CH-Langenbruck, Juli 2001.

9 Anhang

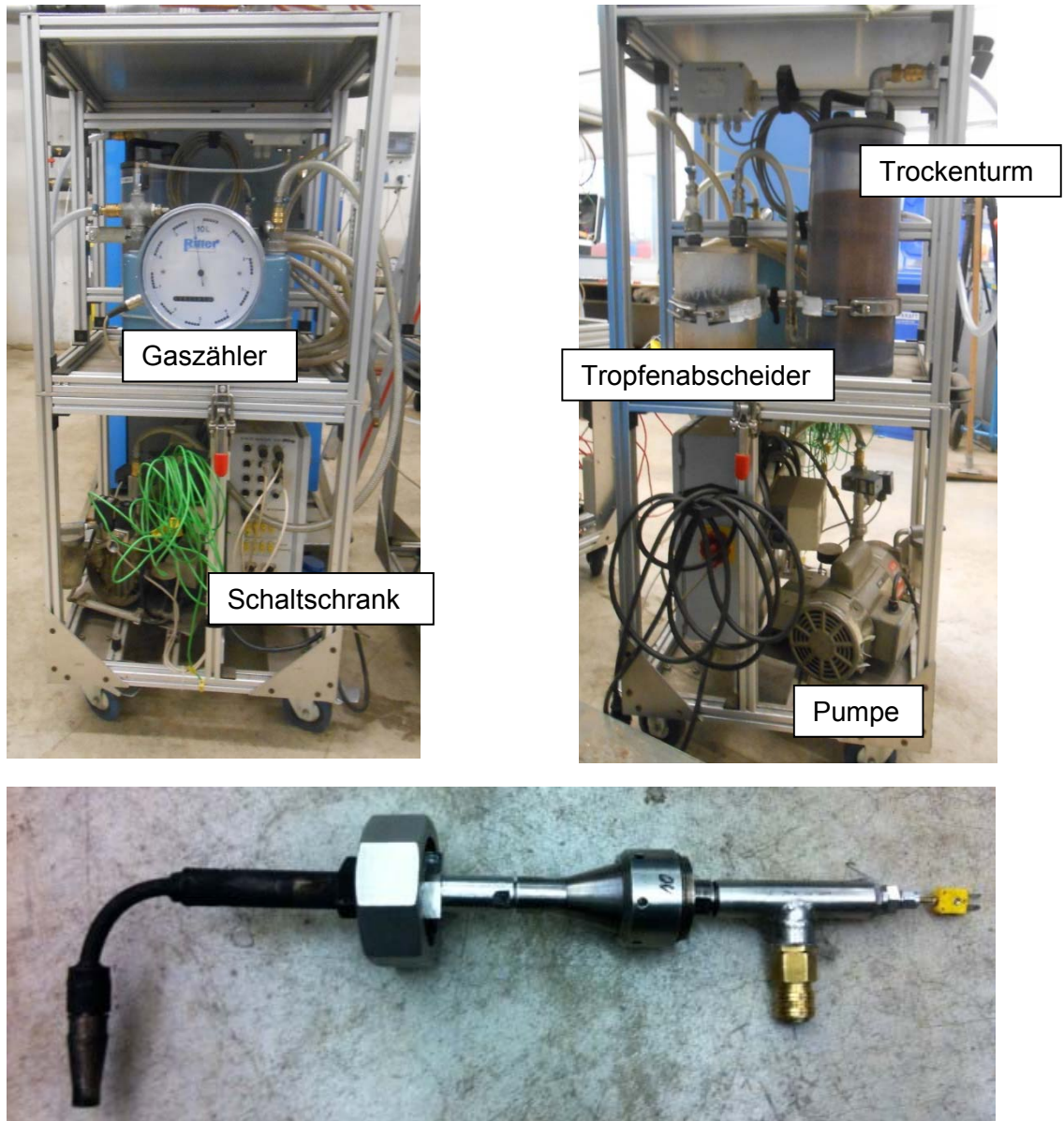


Abbildung 9.1 Fotos eines Staubaufbaus (oben) und einer Sonde zur Staubprobenahme für die gravimetrische Staubbestimmung nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [2006]



Abbildung 9.2 Einbausituation Abscheider Zumikron der Firma Kutzner + Weber GmbH





**Abbildung 9.3** Einbausituation Prototyp des Instituts für Technische Chemie (ITC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Die Autoren danken dem Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie, für die Leihgabe der Pilotanlage. Insbesondere Herrn Klaus Woletz für die Einweisung und seine tatkräftige Unterstützung bei der Inbetriebnahme des Abscheiders.