

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Durchführung von Feldmessungen an Biomassekesseln zur Bewertung der Grenzwertüberwachung nach 1. BImSchV

Zuwendungsempfänger:

**Universität Stuttgart - Fakultät 4 Energie-, Verfahrens- und Biotechnik -
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)**

Förderkennzeichen:

14NR327 bzw. 22032714

Laufzeit:

01.09.2015 bis 31.07.2016

Monat der Erstellung:

Dezember 2016

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens ¹

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart - Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)	Förderkennzeichen: 14NR327 bzw. 22032714
Thema: Durchführung von Feldmessungen an Biomassekesseln zur Bewertung der Grenzwertüberwachung nach 1. BImSchV	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 31.07.2016	

Projektbeschreibung:

Die Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) aus dem Jahr 2010 beinhaltet eine stufenweise Verschärfung der Grenzwerte für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und eine Ausweitung der Messpflichten. Außerdem wurde die Regelung aufgenommen, dass die Messunsicherheit nicht zu Lasten des Anlagenbetreibers gehen darf. Für die Überwachung der verschärften Staubgrenzwerte mussten neue Messgeräte entwickelt werden. Zur Verfahrensvereinfachung wurde festgelegt, dass unabhängig vom eingesetzten eignungsgeprüften und bekanntgegebenen Messgerät eine konstante erweiterte Messunsicherheit in Abhängigkeit der Messkomponente verwendet werden soll.

Ziel des Projektes ist zu klären, ob die vorgeschlagene pauschale erweiterte Messunsicherheit bei den Überwachungsmessungen durch die Schornsteinfeger auch die Verhältnisse in der Praxis angemessen wiedergibt und inwieweit eine Kurzzeitmessung das Emissionsverhalten der Feuerungen repräsentativ widerspiegelt. Hierbei ist vor allem zu untersuchen, wie der Wartungszustand der Feuerungsanlage, schwankende Brennstoffqualitäten und veränderte Randbedingungen bei den Messungen die Messergebnisse beeinflussen.

Um diese Fragen zu klären soll ein Prüfstands- und Feldmessprogramm durchgeführt werden, in dem Staub-, CO- und O₂-Konzentrationen mit Referenzmessverfahren und parallel mit beiden eignungsgeprüften Staubbmessgeräten Feinstaubmessgerät FSM von MRU GmbH sowie SM 500 von Wöhler Technik GmbH an Pelletkesseln, Hackschnitzelkesseln und einem Stückholzkessel untersucht werden. Im Feldmessprogramm sind über einen Zeitraum von 4 Wochen verteilt mehrere Messungen je Feuerungsanlage sowie Vergleichsmessungen mit Schornsteinfegern und deren Messgeräten durchzuführen.

¹ Für die Projektbeschreibung und die Projektergebnisse jeweils maximal 2.000 Zeichen. Das Berichtsblatt ist bei Verbundvorhaben für jedes Teilvorhaben separat zu erstellen.

Projektergebnisse:

Die Prüfstandsuntersuchungen ergaben für die erweiterten Messunsicherheiten aller Messkomponenten nahezu identische Ergebnisse im Vergleich zu den Eignungsbekanntgaben der beiden Schornsteinfegermessgeräte, dies gilt auch bei den Feldmessungen für die Ermittlung der O₂-Konzentration.

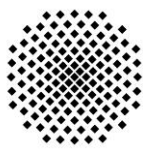
Bei den Staubkonzentrationen konnte, aufgrund der Bandbreite der Feldmessergebnisse, die Einhaltung der Anforderungen an die erweiterte Messunsicherheit nur teilweise überprüft und bestätigt werden. Einige Messbedingungen führten zu höheren und z.T. auch systematischen Abweichungen zwischen Referenzmessverfahren und Schornsteinfegermessgeräten, z.B. bei Messungen nach Elektrofilter oder bei stark teerhaltigen Abgasen.

Die CO-Messungen zeigen die höchsten Abweichungen zum Referenzmessgerät, so dass die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit im überprüften Fall von beiden Messgeräten nicht eingehalten wird. Abweichungen zwischen Referenzmessgerät und Schornsteinfegermessgeräten traten vor allem bei stark schwankenden und sehr hohen CO-Konzentrationen auf.

Die Ergebnisse der Feldmessungen zeigen, dass die vorgeschlagenen pauschalen erweiterten Messunsicherheiten bei den Überwachungsmessungen die Verhältnisse in der Praxis angemessen wiedergeben.

Das Emissionsverhalten der installierten Feuerungsanlagen unterlag einer gewissen Schwankungsbreite, die z.T. auch zu Grenzwertüberschreitungen führte. Ursachen waren die verfeuerte Brennstoffqualität, die aktuelle Kesselleistung und das Start- und Regelverhalten. Die empfohlene Durchführung der Überwachungsmessungen ist praxisnah und gut umsetzbar, Schwankungen im Emissionsverhalten der Anlagen können letztlich bei den Überwachungsmessungen nicht verhindert werden. Damit muss mit einer gewissen Zufälligkeit im Ergebnis der Überwachungsmessung gerechnet werden.

Bei den mit den Schornsteinfegern durchgeführten Messungen wurde ein unterschiedlicher Umsetzungsgrad der Vorgaben zur Anwendung der erweiterten Messunsicherheit ersichtlich.



Universität Stuttgart

**Abteilung
Reinhaltung der Luft**

Durchführung von Feldmessungen an Biomassekesseln zur Bewertung der Grenzwertüberwachung nach 1. BImSchV



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

**Durchführung von Feldmessungen an Biomassekesseln zur Bewertung der
Grenzwertüberwachung nach 1. BImSchV**

Dr.-Ing. Michael Struschka
M.Sc. Elena Schweizer
M.Sc. Winfried Juschka

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
Tel.: +49 711 685 6 8275
ifk@ifk.uni-stuttgart.de
<http://www.ifk.uni-stuttgart.de>

Dezember 2016

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Ausgangslage und Projektziele	2
3	Messverfahren und Messgeräte.....	6
3.1	Standardreferenzmessverfahren	6
3.2	Schornsteinfegermessgeräte.....	9
4	Labor- und Prüfstandsmessungen.....	14
4.1	Labormessungen	14
4.2	Prüfstandsmessungen.....	17
4.3	Ergebnisse der Prüfstandsmessungen	20
4.3.1	Bewertung des Standardreferenzmessverfahrens für Staub	20
4.3.2	Staub-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten	22
4.3.3	O ₂ -Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten	23
4.3.4	CO-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten	25
5	Feldmessungen.....	28
5.1	Feuerungsanlagen im Feldmessprogramm	28
5.1.1	Anlage 1 - Hackschnitzelkessel.....	28
5.1.2	Anlage 2 - Pelletkessel 1	31
5.1.3	Anlage 3 - Pelletkessel 2	33
5.1.4	Anlage 4 - Stückholzkessel	37
5.1.5	Messprogramm und Vorgehensweise	39
5.2	Ergebnisse der Feldmessungen.....	42
5.2.1	Staub-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten	43
5.2.2	O ₂ -Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten	47
5.2.3	CO-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten	49
5.2.4	Vergleichsmessungen an Anlage 1 - Hackschnitzelkessel	52
5.2.5	Vergleichsmessungen an Anlage 2 - Pelletkessel 1	59
5.2.6	Vergleichsmessungen an Anlage 3 - Pelletkessel 2	66
5.2.7	Vergleichsmessungen an Anlage 4 - Stückholzkessel	71
5.3	Messungen der Schornsteinfeger.....	77
6	Zusammenfassung	92
7	Quellenverzeichnis	95
8	Anhang.....	97

1 Einleitung

Die Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) aus dem Jahr 2010 beinhaltet eine stufenweise Verschärfung der Grenzwerte für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Neben schärferen Grenzwerten für gasförmige Schadstoffe und Staub werden in der novellierten Verordnung auch die Pflichten zur wiederkehrenden Überwachung von Feuerungsanlagen ausgeweitet. Die 2. Stufe der 1. BImSchV trat, mit Ausnahme für Scheitholzkessel, am 1.1.2015 in Kraft. Für die Überwachung der verschärften Staubgrenzwerte mussten neue Messverfahren entwickelt werden. Für deren Einsatz zur Grenzwertüberwachung sind eine bestandene Eignungsprüfung und eine Bekanntgabe durch die zuständigen Behörden notwendig.

In der novellierten Fassung der 1. BImSchV wurde außerdem die Regelung aufgenommen, dass die Messunsicherheit nicht zu Lasten des Anlagenbetreibers gehen darf. Zur Verfahrensvereinfachung wurde hierbei festgelegt, dass unabhängig vom jeweils vor Ort eingesetzten eignungsgeprüften Messgerät eine konstante erweiterte Messunsicherheit in Abhängigkeit der Messkomponente verwendet werden soll.

Ziel des Projektes ist zu klären, ob die vorgeschlagene pauschale erweiterte Messunsicherheit bei den Überwachungsmessungen durch die Schornsteinfeger auch die Verhältnisse in der Praxis angemessen wiedergibt und inwieweit eine Kurzzeitmessung das Emissionsverhalten der Feuerungen repräsentativ widerspiegelt. Hierbei ist vor allem zu untersuchen, wie der Wartungszustand der Feuerungsanlage, schwankende Brennstoffqualitäten und veränderte Randbedingungen bei den Messungen (z.B. unterschiedliche Kesseltemperatur bzw. Wartezeit nach Kesselstart bis zum Messbeginn) die Messergebnisse beeinflussen. Um diese Fragen zu klären ist folgendes Feldmessprogramm vorgesehen: Bestimmung der Staub- und CO-Konzentrationen mit Referenzmessverfahren und parallel mit einer Auswahl von eignungsgeprüften Staubmessgeräten an zwei Pelletkesseln, einem Hackschnitzelkessel und einem Stückholzkessel. Die Auswahl der Feuerungsanlagen im Feldmessprogramm und die Kontaktvermittlung zu den Betreibern erfolgten mit tatkräftiger Unterstützung des Landesinnungsverbandes des Schornsteinfegerhandwerks Baden-Württemberg.

Hierbei sollen über einen Zeitraum von 4 Wochen verteilt mehrere Messungen je Feuerungsanlage entsprechend der vorliegenden VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 durchgeführt werden. Bei den jeweiligen Messungen sollen Brennstoffproben entnommen und der aktuelle Wartungszustand der Anlage bewertet werden. Außerdem soll jeweils einmal für jede Anlage eine Überwachungsmessung durch den zuständigen Schornsteinfeger mit dessen Messgerät durchgeführt werden.

Abgerundet werden soll das Messprogramm durch Prüfstandsmessungen an zwei Feuerungsanlagen, so dass eine unter Prüfstandsbedingungen ermittelte Datenbasis zur Bewertung und Charakterisierung der Messbedingungen bei den Feldmessungen für die eingesetzten Staubmessgeräte zur Verfügung steht.

Das Projekt soll durch die beiden Messgerätehersteller MRU GmbH in Neckarsulm-Obereisesheim (Hersteller des Feinstaub-Messgerätes FSM) und Wöhler Technik GmbH (bis 30.6.2016: Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH) in Bad Wünnenberg (Hersteller des Staubmessgerätes SM 500) unterstützt werden.

2 Ausgangslage und Projektziele

Die aktuelle 1. BImSchV (2010) beinhaltet eine stufenweise Verschärfung der Grenzwerte für gasförmige CO und Staub (siehe Tabelle 2.1) und eine Ausweitung zur wiederkehrenden Überwachung von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Mit Ausnahme für Scheitholzkesseln trat die 2. Stufe der 1. BImSchV am 1.1.2015 in Kraft. Da das bisher von den Schornsteinfegern meist eingesetzte Staubbessverfahren nicht in der Lage ist, Grenzwerte unter ca. 60 mg/m³ (bezogen auf 13 Vol.-% O₂) zuverlässig zu überwachen, mussten neue Messverfahren entwickelt werden. Für den Einsatz der neuen Messgeräte zur Grenzwertüberwachung sind bestandene Eignungsprüfungen nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) für die Staubbessung und nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) für gasförmige Emissionen sowie eine Bekanntgabe durch die zuständigen Behörden notwendig.

Tabelle 2.1 Staub- und CO-Grenzwerte der 1. BImSchV für Feuerungsanlagen mit festen Brennstoffen in Abhängigkeit vom Jahr der Errichtung, des Brennstoffs und der Nennleistung (1. BImSchV, 2010)

	Brennstoff nach § 3 Absatz 1	Nennwärme- leistung (Kilowatt)	Staub (g/m ³)	CO (g/m ³)
Stufe 1: Anlagen, die ab dem 22. März 2010 errichtet werden	Nummer 1 bis 3a	≥ 4 ≤ 500	0,09	1,0
		> 500	0,09	0,5
	Nummer 4 bis 5	≥ 4 ≤ 500	0,10	1,0
		> 500	0,10	0,5
	Nummer 5a	≥ 4 ≤ 500	0,06	0,8
		> 500	0,06	0,5
	Nummer 6 bis 7	≥ 30 ≤ 100	0,10	0,8
		> 100 ≤ 500	0,10	0,5
		> 500	0,10	0,3
	Nummer 8 und 13	≥ 4 < 100	0,10	1,0
Stufe 2: Anlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden	Nummer 1 bis 5a	≥ 4	0,02	0,4
	Nummer 6 bis 7	≥ 30 ≤ 500	0,02	0,4
		> 500	0,02	0,3
	Nummer 8 und 13	≥ 4 < 100	0,02	0,4

Hinweis zu Stufe 2, Brennstoff Nummer 4: Grenzwerte der Stufe 2 gelten für Feuerungsanlagen, in denen ausschließlich Scheitholz eingesetzt wird, erst nach dem 31. Dezember 2016

Die Brennstoffnummern 1 bis 3a nach § 3 Absatz 1 der 1. BImSchV (2010) beinhalten Stein- und Braunkohlen, Brenntorf und Grill-Holzkohle. Die Brennstoffnummern 4 bis 5a nennen naturbelassenes stückiges und naturbelassenes nicht stückiges Holz sowie Presslinge aus naturbelassenem Holz. Die Nummern 6 und 7 regeln den Einsatz von gestrichenem, lackiertem oder beschichteten Holz sowie von Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz in gewerblichen Holzfeuerungen. Die Brennstoffnummern 8 und 13 beinhalten Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe sowie sonstige nachwachsende Rohstoffe.

In die novellierte 1. BImSchV (2010) wurde erstmals die Regelung aufgenommen, dass die Messunsicherheit nicht zu Lasten des Anlagenbetreibers gehen darf. Deshalb wird bei den Prüfstandsmessungen für die Eignungsprüfung neuer Messgeräte die Messunsicherheit aufwendig ermittelt und die erweiterte Messunsicherheit berechnet. Die Angabe der erweiterten Messunsicherheit ist auch Bestandteil der Bekanntgabe.

Derzeit sind 5 Staubbmessgeräte bekanntgegeben und können somit für die Überwachungsmessungen eingesetzt werden, siehe Tabelle 2.2. Aufgelistet ist jeweils die aktuellste Bekanntgabe, nicht mit aufgeführt sind die Bekanntgaben der - bis auf eine Ausnahme - vom selben Hersteller angebotenen O₂- und CO-Gasmessgeräte, die in Kombination mit dem Staubbmessgerät zur Grenzwertüberwachung eingesetzt werden können.

Tabelle 2.2 Liste der bekanntgegebenen Staubbmessgeräte (Bundesanzeiger, 2016)

Ausgabe Bundesanzeiger	Hersteller	Typ	Messbereich Staub	erweiterte Messunsicherheit	
				Grenzwert in g/m ³ *	%
BAnz AT 26.08.2015 B5	MRU	Feinstaub- messsystem FSM **	0 - 300 mg/m ³	0,02	39
				0,06	14
				0,09	27
				0,10	25
				0,15	27
BAnz AT 26.08.2015 B5	Testo	testo 380 **	0 - 300 mg/m ³	0,02	24
				0,06	35
				0,09	22
				0,10	16
				0,15	25
BAnz AT 26.08.2015 B5	Wöhler	SM 500 **	0 - 300 mg/m ³	0,02	32
				0,06	34
				0,09	33
				0,10	30
				0,15	25
BAnz AT 14.03.2016 B8	Afriso	STM 225 **	0,01 - 0,30 g/m ³	0,02	35
				0,06	39
				0,09	35
				0,10	32
				0,15	33
BAnz AT 14.03.2016 B8	Vereta	Feinstaub- messkoffer	0,01 - 0,30 g/m ³	0,02	40
				0,06	40
				0,09	39
				0,10	39
				0,15	29

* bei 13 Vol% O₂

** Kombinationsmessgerät zur Überwachung der Staub- und CO-Grenzwerte

Die in den Eignungsprüfungen unter Prüfstandsbedingungen ermittelten erweiterten Messunsicherheiten der verschiedenen Messgeräte unterscheiden sich z.T. deutlich, sind meist vom Grenzwert abhängig und decken insgesamt einen weiten Bereich von 14 bis 40 % ab und erfüllen die Anforderungen der aktuellen VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015).

Bis auf das Messgerät des Herstellers MRU können alle neuen Staubbmessgeräte die Staubkonzentration kontinuierlich messen und anzeigen, wodurch auch Informationen über den

Verlauf der Staubkonzentration während der Messung vorliegen. Beim Staubmessgerät des Herstellers MRU wird der Staub in einer Filterhülse gesammelt, diese wird vor und nach der Messung konditioniert und gewogen, die Massendifferenz ergibt dann in Verbindung mit dem abgesaugten Probengasvolumen die Staubkonzentration. Dieses Messgerät und das Staubmessgerät der Firma Wöhler sind direkte gravimetrische Verfahren, bei den Messgeräten der Hersteller Vereta und Afriso werden optische Verfahren eingesetzt, d.h. die Staubkonzentration wird nicht direkt ermittelt. Ein weiteres indirekt messendes Verfahren wurde von der Firma Testo umgesetzt. Hierbei wird die Schwingungsänderung eines Sensors als Maß für die Staubkonzentration herangezogen.

Die Durchführung der Emissionsmessungen vor Ort durch die Schornsteinfeger wird in einer separaten VDI-Richtlinie beschrieben. Diese VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) legt die Anforderungen an die erstmaligen und wiederkehrenden Prüfungen und Messungen von Emissionen und Abgasparametern an Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe gemäß der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV, 2010) oder der Kehr- und Überprüfungsordnung (KÜO) fest. Die VDI-Richtlinie beschreibt zudem detailliert die Durchführung der Messungen, die Auswertung und Bewertung der Messergebnisse mit den einzelnen Berechnungsschritten. Hierdurch soll eine einheitliche Qualität bei der Bestimmung von Emissionen aus diesen Feuerungsanlagen sichergestellt werden. Des Weiteren wird beschrieben, wie die Zulässigkeit der eingesetzten Brennstoffe und der ordnungsgemäße Zustand der Feuerungsanlage zu prüfen und zu bewerten sind. Diese Richtlinie stellt eine entscheidende Grundlage zur Qualitätssicherung bei den Überwachungsmessungen dar.

Zur Verfahrensvereinfachung wurde in der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) festgelegt, dass unabhängig vom jeweils vor Ort eingesetzten eignungsgeprüften Messgerät eine konstante erweiterbare Messunsicherheit für die Staub- und CO-Messung berücksichtigt wird. Bei der Staubmessung werden als erweiterbare Messunsicherheit 40 % vom gemessenen Staubwert und bei der CO-Messungen werden 20 % vom gemessenen CO-Wert berücksichtigt.

Unklar ist hier u.a., ob die unter Prüfstandsbedingungen ermittelte erweiterte Messunsicherheit auf die Messbedingungen vor Ort übertragen werden kann. Im Rahmen des Projektes soll deshalb geklärt werden, ob die vorgeschlagene pauschale erweiterte Messunsicherheit bei den Überwachungsmessungen durch die Schornsteinfeger auch die Verhältnisse in der Praxis angemessen wiedergibt.

Das Emissionsverhalten der hier betrachteten Feuerungsanlagen (Pellet-, Hackschnitzel- und Stückholzkessel) hängt u.a. vom eingesetzten Brennstoff (aktuelle Brennstoffqualität), der Einstellung der Feuerungsanlage (z.B. Primär- und Sekundärluftmengen, maximale Feuerungswärmeleistung), dem Wartungszustand (gut gewartete Anlagen, mittelmäßig gewartete Anlagen: z.B. schlecht gereinigter Wärmetauscher, schlecht gewartete Anlagen: z.B. mit defekten Bauteilen oder zugesetzten Luftzuführungen) und den Randbedingungen bei den Messungen (z.B. aktuelle Kesselleistung, thermischer Zustand des Kessels) ab (z.B. Schön und Hartmann (2014), Struschka et al. (2004, 2005 und 2010)).

Auch bei konstanter Brennstoffqualität und unveränderter Anlageneinstellung sowie gutem Wartungszustand ergibt sich eine gewisse Schwankungsbreite der Emissionen, die u.a. von der aktuellen Kesselleistung, der Betriebszeit des Kessels seit dem letzten Startvorgang und dem thermischen Zustand des Kessels bzw. einzelner Kesselbereiche in denen Entgasungs- oder Verbrennungsreaktionen stattfinden, abhängen (z.B. Struschka et al. (2004 und 2010)).

Die Verwendung von ungeeignetem Brennstoff, falscher Anlageneinstellung oder defekte Anlagen bzw. ein schlechter Wartungszustand der Feuerungen (z.B. fehlende Türdichtungen, defekte bzw. zugesetzte Roste) können zu einer hohen Grenzwertüberschreitung führen. Allerdings sollten derartige Mängel, zumindest die offensichtlich erkennbaren, bereits bei der Vorbereitung der Überwachungsmessungen erkannt werden. Dies sieht zumindest die Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) vor. Ob und in welchem Umfang diese Mängel sicher erkannt werden, soll auch in diesem Projekt mit bewertet werden.

Einflüsse die nicht so offensichtlich sind (z.B. zulässiger Brennstoff, aber Schwankungen in der Qualität, Einstellung einer zu hohen Feuerungswärmeleistung, mittlerer Verschmutzungsgrad der Feuerungsanlage, zu kurze Betriebszeit der Anlage nach dem Kesselstart bzw. vor dem Messbeginn) werden bei der Vorbereitung der Überwachungsmessung ggf. nicht erkannt bzw. es könnte deren Einfluss auf das Messergebnis unterschätzt werden.

Im Rahmen des Vorhabens sollen deshalb diese Einflussfaktoren genauer untersucht und die Parameter identifiziert werden, die einen größeren Einfluss auf das Ergebnis der Überwachungsmessungen haben. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollen Empfehlungen für die praktische Durchführung der Überwachungsmessungen abgeleitet werden, damit diese ebenfalls in die VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 aufgenommen werden können.

Zu Klärung der messtechnischen und betriebstechnischen Fragen werden sowohl Prüfstandsmessungen an zwei Feuerungsanlagen (einem Hackgut- bzw. Pelletkessel) und einem Stückholzkessel sowie Feldmessungen an zwei Pelletkesseln, einem Hackschnitzelkessel mit Elektrofilter und einem Stückholzkessel durchgeführt. Bei den Feldmessungen werden über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen verteilt mehrere Staubmessungen je Feuerungsanlage entsprechend der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) durchgeführt. Bei den jeweiligen Messungen werden Brennstoffproben entnommen und der aktuelle Wartungszustand der Anlage bewertet. Parallel zu den Messungen des IFK wird jeweils einmal für jede Anlage eine Überwachungsmessung durch den zuständigen Schornsteinfeger mit dessen Messgerät durchgeführt.

Bei den Prüfstands- und Feldmessungen werden Staub- und Gaskonzentrationen (CO und O₂) mit Referenz-Messverfahren und parallel mit einer Auswahl von zwei eignungsgeprüften Staubmessgeräten bestimmt. Bei den Prüfstandsmessungen werden Doppelbestimmungen mit dem Staub-Referenzmessverfahren nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) durchgeführt.

Das Projekt wird durch zwei Messgerätehersteller unterstützt, die sowohl Messgeräte zur Verfügung stellen und eine Anwenderschulung durchführen, als auch ihre Erfahrungen bei der Durchführung der Messungen einbringen. Von der Firma MRU GmbH in Neckarsulm-Obereisesheim wird das Feinstaub-Messgerätes FSM (Wägung des in einer Filterhülse gesammelten Staubes mit einer Trocknungs- und Wägeeinheit) und von der Firma Wöhler Technik GmbH in Bad Wünnenberg das Staubmessgerätes SM 500 (direkt anzeigendes Messverfahren mit Präzisionswiegemodul) für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Bei beiden Messgeräten erfolgt die Staubmessung direkt gravimetrisch.

3 Messverfahren und Messgeräte

3.1 Standardreferenzmessverfahren

Messung staubförmiger Emissionen

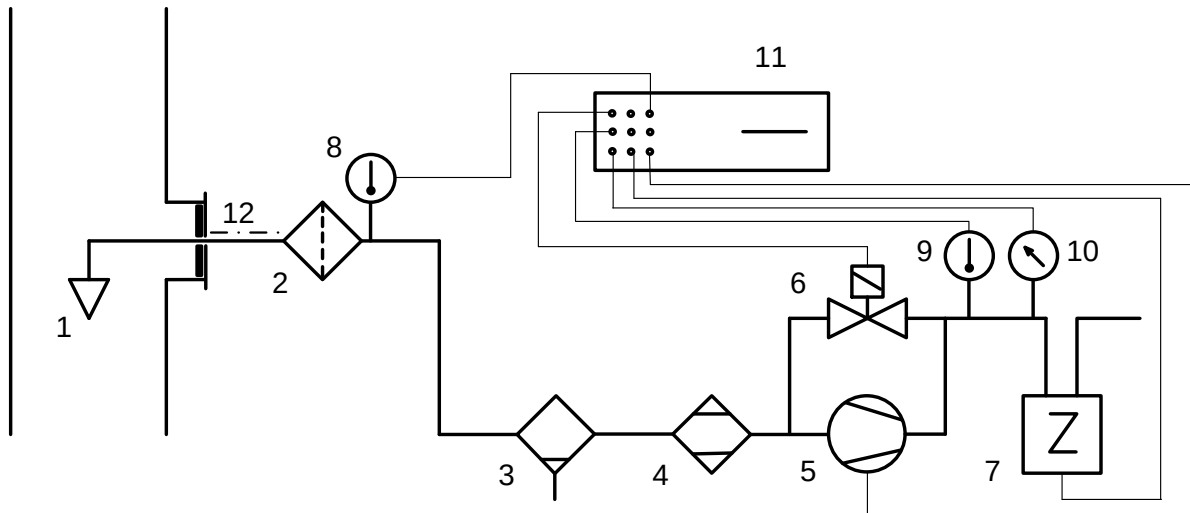
Das Standardreferenzmessverfahren für Staubkonzentrationen basiert auf der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006), welche die gravimetrische Bestimmung des Staubgehaltes in strömenden Gasen beschreibt. Hierbei wird ein Teilstrom dem Abgas entnommen und über einen Planfilter geleitet, der in ein Filterkopfggerät eingesetzt ist. Die Ablagerungen in der Entnahmesonde vor dem Filter werden durch Spülen gelöst und in Spülgläschen aufgefangen. Die Spülflüssigkeit wird verdampft. Aus der Massendifferenz der Planfilter und der Spülgläschen vor und nach der Probenahme und dem abgesaugten Volumen wird die Staubkonzentration im Abgas bestimmt.

Aufgrund der relativ geringen Durchmesser der Abgasrohre wurden bei den Messungen keine Netzmessungen durchgeführt und das Filterkopfggerät wurde stets außerhalb des Abgasrohres eingesetzt und auf eine definierte Temperatur elektrisch beheizt.

Für die Untersuchungen standen zwei weitgehend identische Messaufbauten für die Staubprobenahme zur Verfügung, deren Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit bereits ausführlich untersucht wurden (z.B. Schäfer, 2016). Die schematische Darstellung eines Messaufbaus zeigt die Abbildung 3.1. Ein Teilvolumenstrom des Abgases wird isokinetisch im Kernstrom mit der Entnahmesonde (1) abgesaugt. Der enthaltene Staub wird auf dem Planfilter (2) im Filterkopfggerät abgeschieden. Die externe Heizvorrichtung (12) sorgt dafür, dass die Filtrationstemperatur, die mit einem Temperaturfühler (8) gemessen wird, nicht unter einen bestimmten Wert fällt. Anschließend gelangt der Teilvolumenstrom in einen Tropfenabscheider (3), wo kondensierte Feuchtigkeit in Form von Tröpfchen abgeschieden wird. Für die Trocknung des Teilvolumenstroms ist der anschließende mit Silicagel gefüllte Trockenturm (4) vorgesehen. Der Verdichter (5) fördert dann das trockene und abgekühlte Probengas zum Gaszähler (7), wo das Volumen, die Temperatur (9) und der Druck (10) am Eintritt zum Gaszähler gemessen werden. Der Bypass an der Pumpe ist zur Regelung des Volumenstroms vorgesehen. Für kleine Volumenströme wird das Magnetventil (6) geöffnet und ein großer Teil des Volumenstroms wird im Kreis gefördert. Für große Volumenströme wird das Magnetventil geschlossen und der ganze Fördervolumenstrom gelangt zum Gaszähler. Die Regelung des Messaufbaus und die Erfassung der Mess- und Regelwerte erfolgt über ein Programm, das auf dem Programmiersystem LabVIEW des Herstellers National Instruments beruht.

Zur Überprüfung des Messaufbaus auf Leckagen wird vor jeder Messreihe eine Dichtheitsprüfung anhand eines festgelegten Kriteriums durchgeführt. Vor der Messung wird das Filterkopfggerät ausreichend aufgeheizt, um eine Kondensation von Wasserdampfes in der Entnahmesonde und auf dem Filter zu verhindern. Nach der Probenahme wird die Sonde aus dem Abgaskanal entnommen, der Filterhalter mit dem belegten Planfilter ausgebaut und alle Bauteile vor dem Planfilter gespült.

Das Standardreferenzmessverfahren nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) muss für die Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten in einigen Punkten an die Richtlinie VDI 4206 Blatt 2 (2015) angepasst werden, siehe hierzu Tabelle 3.1.



- | | | | |
|---|---------------------------|----|-------------------------|
| 1 | Entnahmesonde | 7 | Gaszähler |
| 2 | Planfilter | 8 | Temperaturfühler |
| 3 | Tropfenabscheider | 9 | Temperaturfühler |
| 4 | Trockenturm mit Silicagel | 10 | Absolutdruckmessdose |
| 5 | Verdichter | 11 | Messwerterfassung |
| 6 | Magnetventil | 12 | externe Heizvorrichtung |

Abbildung 3.1 Schematische Darstellung eines Messaufbaus zur Staub-Probenahme nach dem Standardreferenzmessverfahren

Tabelle 3.1 Staubmessungen im Geltungsbereich der 1. BlmschV (2010) nach VDI-Richtlinien 4206 Blatt 2 (2015) im Vergleich zur VDI 2066 Blatt 1 (2006)

Unterschiede bei	VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) (Standardreferenzmessverfahren)	VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) (für Messungen nach 1. BlmSchV)
Probenahmedauer	30 min	15 min *
Vorbehandlung Filter	1 h bei 180 °C	1 h bei 110 °C ± 5 K
Vorbehandlung Spügläschen	1 h bei 180 °C	1 h bei 110 °C ± 5 K
Filtrationstemperatur	Rauchgastemperatur oder 160 °C	70 °C ± 5 K
Nachbehandlung Filter	1 h bei 160 °C	1 h bei 110 °C ± 5 K
Nachbehandlung Spügläschen	1 h bei 160 °C	1 h bei 110 °C ± 5 K
Spülvorgang	nach jeder Messreihe	nach jeder Messung
Spülflüssigkeit	destilliertes Wasser, Aceton	destilliertes Wasser sowie Lösung aus je 50 % Isopropanol und Aceton

* für Messungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe, ausgenommen Einzelraumfeuerungsanlagen

Für eine repräsentative Staubmessung ist eine homogene Staubverteilung im Messquerschnitt erforderlich. Die VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) stellt Anforderungen an die Messstrecke, bei deren Einhaltung davon ausgegangen werden kann, dass ein gleichmäßiges Staubprofil im Messquerschnitt erreicht wird. Diese sind u.a.: vertikaler Abgaskanal mit konstanter Form und konstantem Querschnitt und kein Überdruck in der Messstrecke. Außerdem sollte die Messstelle möglichst weit vor bzw. hinter Strömungshindernissen liegen, damit die Staubverteilung im Messquerschnitt nicht beeinflusst wird. Es wird davon ausgegan-

gen, dass dies ist im Allgemeinen gegeben ist, wenn eine Einlaufstrecke von fünf hydraulischen Durchmessern vor und eine Auslaufstrecke von zwei hydraulischen Durchmessern hinter der Messstelle eingehalten wird. Bei Nichteinhaltung könnten sich Strahlen unterschiedlicher Staubkonzentration im Abgas ausbilden. Allerdings kann bei kürzeren Ein- und Auslaufstrecken nicht automatisch von einer nicht repräsentativen Probenahme ausgegangen werden, da auch z.B. die Partikelgrößenverteilungen und die örtlichen Gegebenheiten bei dieser Bewertung mit berücksichtigt werden müssen.

Die Staubkonzentration im Abgas c_{Staub} wird im Grundsatz nach Gl. 3.1 bestimmt:

$$c_{Staub} = \frac{M_{Staub}}{V_{Messung}} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Dabei ist M_{Staub} die gesamte abgeschiedene Staubmasse und $V_{Messung}$ das abgesaugte Teilstromvolumen während der Messung.

Die abgeschiedene Staubmasse M_{Staub} ergibt sich nach Gl. 3.2 als Summe der Massendifferenzen zwischen dem Vor- und Rückwiegen des Planfilters ΔM_P und des Spügläschens ΔM_S :

$$M_{Staub} = \Delta M_P + \Delta M_S \quad \text{Gl. 3.2}$$

Das abgesaugte und mit einem Gaszähler erfasste Volumen $V_{Messung}$ wird auf den Normzustand (1.013 hPa und 273,15 K) nach folgender Formel umgerechnet:

$$V_{norm} = V_{Messung} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{T_{Messung}} \cdot \frac{p_{Messung}}{1013 \text{ hPa}} \quad \text{Gl. 3.3}$$

Es ist $T_{Messung}$ die über den gesamten Messzeitraum gemittelte Probenahmetemperatur am Gaszähler und $p_{Messung}$ der über den Messzeitraum gemittelte Absolutdruck am Gaszähler.

Die gemessene Staubkonzentration $E_{M,Staub}$ ist nach 1. BImSchV (2010) mit der gemessenen Sauerstoffkonzentration $O_{2,Messung}$ auf einen Bezugssauerstoffgehalt $O_{2,Bezug}$ von 13 Vol.-% umzurechnen ($E_{B,Staub}$ = Staub-Emission beim Bezugssauerstoffgehalt):

$$E_{B,Staub} = E_{M,Staub} \cdot \frac{(21 - O_{2,Bezug})}{(21 - O_{2,Messung})} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Zum übersichtlicheren Vergleich der Untersuchungsergebnisse werden die Staubkonzentrationen z.T. in mg/m³ angegeben, auch die Grenzwerte der 1. BImSchV, da mit den Feldmessungen primär nicht die Einhaltung der Grenzwerte sondern die Qualität und Aussagekraft der Überwachungsmessung mit den Schornsteinfegermessgeräten bewertet werden sollen.

Messung gasförmiger Emissionen

Für die Messung von Kohlenstoffmonoxid CO und Sauerstoff O₂ im Abgas werden die Gasanalysatoren CO-Analysator Binos® 2000 von Rosemount GmbH & Co (RAE) mit zwei Kanälen für hohe (Messbereich 0 - 3 Vol.-%) und niedrige (Messbereich 0 - 2.000 ppm) Konzentrationen sowie ein Sauerstoff-Analysator Oxynos® 100 von Fisher-Rosemount GmbH & CO. (RAE) mit einem Messbereich von 0 - 25 Vol.-% eingesetzt.

Vor dem Zuleiten der Abgasprobe in die Gasmessgeräte wird diese mehrfach gefiltert und durch Abkühlung auf ca. 2 °C entfeuchtet. Vor Messbeginn eines Versuchstages werden die Gasmessgeräte mit Null- und Prüfgasen kalibriert, Abweichungen von Sollwerten werden erfasst und bei der späteren Auswertung berücksichtigt. Das Prüfgas für den CO-Analysator weist eine CO-Konzentration von 802 ppm (niedriger Messbereich) und 0,701 Vol.-% (hoher Messbereich) auf. Für den O₂-Analysator wird ein Prüfgas mit einer O₂-Konzentration von 10 Vol.-% verwendet. Als Nullgas wurde reiner Stickstoff verwendet.

Die aufgezeichneten CO-Messwerte in ppm werden mit der Molmasse und dem molaren Volumen von Kohlenstoffmonoxid (Faktor 1,25) auf mg/m³ und ggf. analog Gl. 3.4. auf den Bezugssauerstoffgehalt umgerechnet. Die Angaben für CO und für die Grenzwerte der 1. BImSchV erfolgen entweder in mg/m³ oder in g/m³.

3.2 Schornsteinfegermessgeräte

Für die Vergleichsmessungen zwischen den Standardreferenzmessverfahren und den Schornsteinfegermessgeräten auf dem Prüfstand und an den installierten Anlagen wurden das Feinstaub-Messgerätes FSM der Firma MRU GmbH und das Staubbmessgerätes SM 500 der Firma Wöhler Technik GmbH jeweils zeitgleich eingesetzt.

Damit ein Schornsteinfegermessgerät zur Grenzwertüberwachung eingesetzt werden kann, muss eine Eignungsprüfung nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) und Blatt 2 (2015) erfolgreich absolviert werden und eine Bekanntgabe durch die zuständigen Behörden erfolgen. Blatt 1 der VDI-Richtlinie 4206 gilt für die Messung von gasförmigen Emissionen und Abgasparametern und Blatt 2 für partikelförmige Emissionen. Die Anforderungen bezüglich der zulässigen maximalen Messwertabweichungen und der erweiterten Messunsicherheit an die Messgeräte sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.2 Anforderung der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) und Blatt 2 (2015) an die Messgeräte bezüglich Messbereich und Genauigkeit

Messgröße	Messbereich	maximal zulässige Messwertabweichung	erweiterte Messunsicherheit
Staub	0,5 bis 2-faches des zu überwachenden Grenzwertes	- 10 mg/m³ für Referenzwerte unter 20 mg/m³ - 50 % des Referenzwerts für Referenzwerte zwischen 20 mg/m³ und 150 mg/m³ - 75 mg/m³ für Referenzwerte über 150 mg/m³	40 % des zu überwachenden Grenzwertes
Sauerstoff	0 Vol.-% bis 21 Vol.-%	± 0,3 Vol.-%	0,5 Vol.-%
Kohlenstoffmonoxid (niedrig)	0 ppm bis 200 ppm	± 10 ppm oder 10 % vom Messwert	20 % des zu überwachenden Grenzwertes
Kohlenstoffmonoxid (mittel)	0 ppm bis 2.000 ppm	± 20 ppm oder 5 % vom Messwert	20 % des zu überwachenden Grenzwertes
Kohlenstoffmonoxid (hoch)	0 ppm bis 20.000 ppm	± 100 ppm oder 10 % vom Messwert	20 % des zu überwachenden Grenzwertes

Feinstaub-Messgerätes FSM

Das Feinstaub-System FSM der Firma MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH erfasst die Staubkonzentration als Mittelwert der Probenahmezeit und umfasst insgesamt die drei Komponenten: kompaktes Staubsammelmodul (bestehend aus Staubsammelkoffer und beheizter Sonde für Staubsammelfilter) für die Probenahme, eine Präzisionswaage und ein Handgerät zur Erfassung der Messwerte und Steuerung der einzelnen Prozessschritte (SPECTRAplus), siehe Abbildung 3.2).

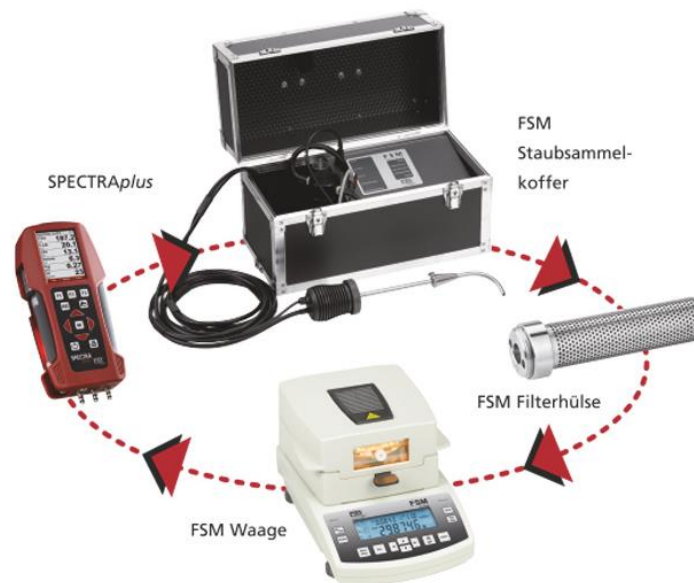


Abbildung 3.2 Komponenten des Feinstaub-Systems FSM der Firma MRU (MRU, 2015a)

Das System ist für feste Brennstoffe der Klassen 1 bis 8 nach § 3 der 1. BImSchV (2010) zugelassen (MRU, 2015a). Das sind vor allem Stein- und Braunkohlen, naturbelassenes oder beschichtetes und verarbeitetes Holz, Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe.

Die Vorgehensweise bei der Staubmessung mit diesem Messgerät erfolgt in drei Schritten (MRU, 2015b): Im ersten Schritt wird der Filterhalter mit einem Glasfaserfilter bestückt. Anschließend wird die Filterhülse auf die Präzisionswaage gelegt. Dort wird sie innerhalb von 10 Minuten erhitzt und gleichzeitig gewogen. Das Gewicht der unbeladenen Filterhülse wird an das Handgerät übertragen und hülsenspezifisch gespeichert. Die Filterhülse wird in einem speziellen Alu-Transportbehälter staubfrei bis zum Zeitpunkt der Probenahme aufbewahrt.

Vor der Probenahme wird das in Abbildung 3.3 dargestellte Handstück des Staubsammelmoduls (beheizte Sonde mit Staubsammelfilter) mit der eingesetzten Filterhülse auf Dichtheit geprüft und auf 70 °C aufgeheizt. Danach kann die 15-minütige-Messung gestartet werden. Das senkrecht zur Strömungsrichtung abgesaugte Abgas wird nach der Filterhülse abgekühlt, das Kondensat abgeschieden und der Volumenstrom gemessen. Ein Teil des Abgases wird anschließend durch elektrochemische Sensoren hinsichtlich O₂ und CO analysiert. Für die Erfassung der CO-Konzentration sind zwei Sensoren mit unterschiedlichen Messbereichen eingebaut, zwischen denen bei Überschreitung einer Schwelle automatisch umgeschaltet wird. Gesteuert wird die Probenahme durch das Handgerät. Dort können auch online die Ergebnisse der Sauerstoff- und Kohlenstoffmonoxidmessungen verfolgt werden.

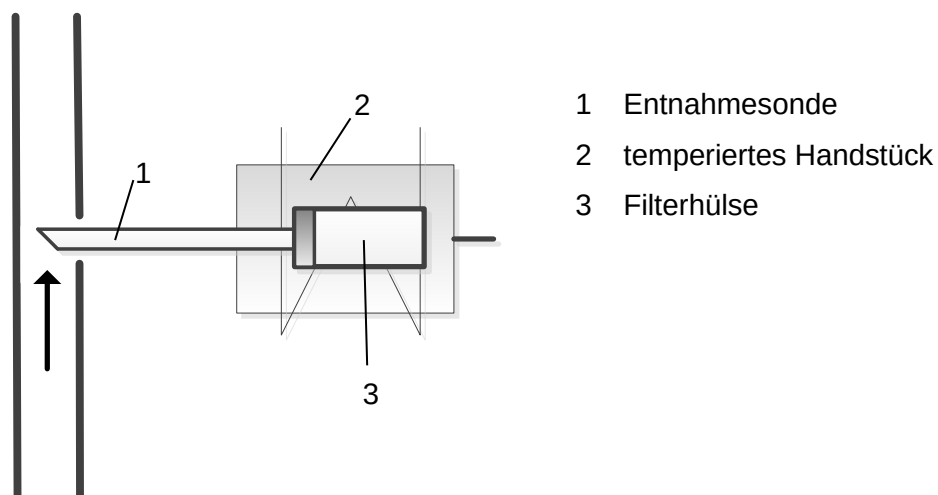


Abbildung 3.3 Prinzipskizze der beheizten Sonde für Staubsammelfilter des Feinstaub-Systems FSM der Firma MRU

Nach der Probenahme erfolgt im dritten Schritt die Rückwiegung der beladenen Filterhülse mit der Präzisionswaage. Aus der Massendifferenz zwischen der Vor- und Rückwiegung und dem abgesaugten Rauchgasvolumen im Normzustand wird die Staubkonzentration im Rauchgas automatisch berechnet.

Für Praxismessungen vorteilhaft ist der 4 m lange Schlauch vom Handstück bis zum kompakten Staubsammelmodul. Damit konnte bei den Feldmessungen jede Messstelle problemlos erreicht werden. Dagegen stellte sich die Feststofffiltereinheit für das Silikagel bei sehr feuchtem Abgas als zu klein heraus.

Die Angaben des Herstellers MRU zum Messbereich und der Genauigkeit der Staub- und Gasmessung sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst (MRU, 2015b).

Tabelle 3.3 Herstellerangaben zum Messbereich und der Genauigkeit der Staub- und Gasmessung für das Feinstaub-System FSM (MRU, 2015b)

Feinstaub-Systems FSM (MRU)	Messbereich	Genauigkeit
Staub	0 - 1.000 mg/Nm ³	13 - 43 % vom Messwert
Sauerstoff	0 - 21 Vol.-%	± 0,2 Vol.-% absolut
Kohlenstoffmonoxid (niedrig)	0 - 4.000 ppm, überlastbar bis 10.000 ppm	± 10 ppm oder 5 % vom Messwert bis 4.000 ppm oder 10 % vom Messwert bis 10.000 ppm
Kohlenstoffmonoxid (hoch)	0 - 4.000 ppm, überlastbar bis 20.000 ppm	± 100 ppm oder 5 % vom Messwert bis 4.000 ppm oder 10 % vom Messwert bis 20.000 ppm

Wöhler SM 500 Staubmessgerät

Das Schornsteinfegermessgerät Wöhler SM 500 der Firma Wöhler Technik GmbH (siehe Abbildung 3.4) ist für alle festen Brennstoffe zugelassen, Messungen können an allen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV durchgeführt werden.

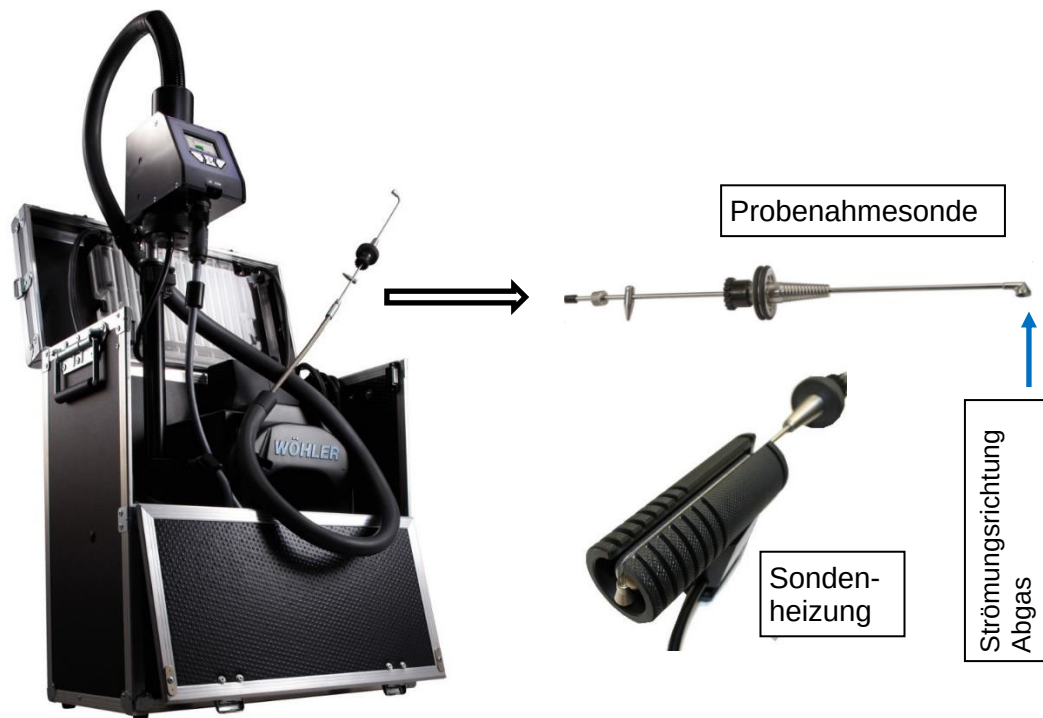


Abbildung 3.4 Wöhler SM 500 Staubmessgerät mit Sondenheizung (Wöhler, 2015)

Eine Messung, mit Ausnahme bei Einzelraumfeuerstätten, dauert 15 Minuten, während dessen die Staub-, O_2 - und CO -Konzentrationen vor Ort online auf einer Anzeige verfolgt werden können, entweder als Wert oder als Verlaufsdiagramm. Die ganze benötigte Ausrüstung für die Staubprobenahme ist kompakt in einem Koffer von 15 kg Gewicht untergebracht (Wöhler, 2015). In Abbildung 3.5 ist eine stark vereinfachte Prinzipskizze des Wöhler SM 500 dargestellt.

Ein Abgasteilstrom wird durch eine Sonde in der Abgas-Strömungsrichtung abgesaugt und zunächst durch einen beheizten Schlauch auf eine Filterpatrone geleitet. Der Staub wird dabei abgeschieden und das staubfreie Abgas gelangt in einen Kühler. Dort kühlt das Gas ab und die enthaltene Feuchtigkeit kondensiert aus. Anschließend wird der Volumenstrom des so getrockneten, abgekühlten und staubfreien Abgases gemessen, bevor es durch eine geregelte Pumpe nach außen geleitet wird. Ein Teilstrom des Probengases wird mittels elektrochemischer Sensoren hinsichtlich der O_2 - und CO -Konzentrationen analysiert (Wöhler, 2012).

Um eine Kondensation von Wasserdampf aus dem Probengas vor und auf dem Filter des Wöhler SM 500 zu vermeiden, wurde die Probenahmesonde bei den Messungen ausschließlich mit einer Sondenheizung betrieben.

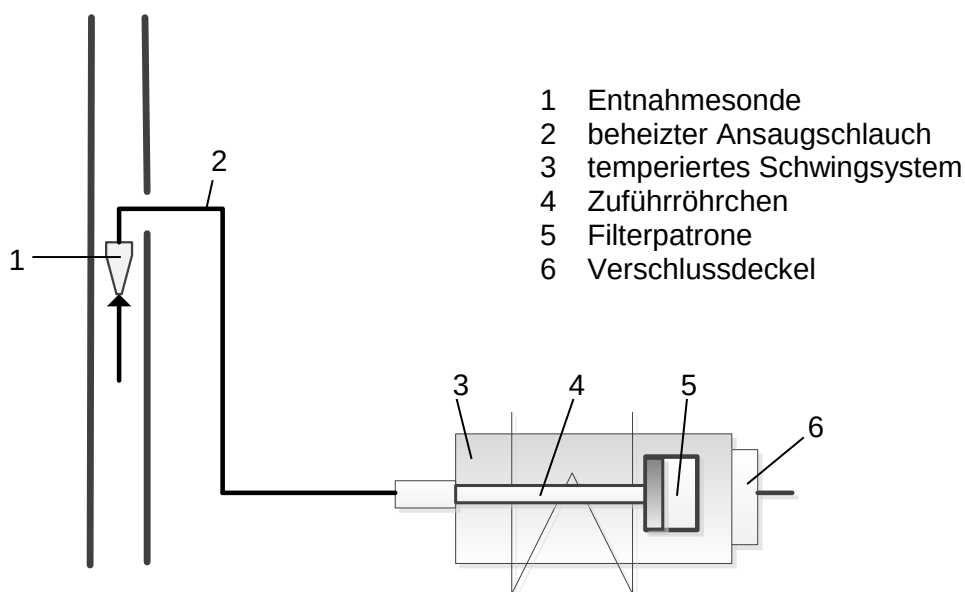


Abbildung 3.5 Prinzipskizze des Schornsteinfegermessgeräts SM 500 der Firma Wöhler (nach Ester et al., 2015)

Vor der Messung mit dem Wöhler SM 500 wird eine Filterpatrone ohne Vorbehandlung in das Wiegemodul eingesetzt. Auf die Vorbehandlung wird verzichtet, weil die Massenzunahme direkt während der Messung aus der Änderung der Schwingfrequenz der Filterpatrone bestimmt wird. Die Filterpatronen können je nach Beladung für eine erneute Messung verwendet werden, bis die Anzeige erscheint, dass die Kapazität der Filterpatrone erschöpft ist (Wöhler, 2012).

Nach dem Einschalten des Gerätes wird der abzusaugende Volumenstrom ausgewählt, da dieser von der einzuhaltenden Grenzwertstufe der 1. BImSchV abhängt. Für die erste Stufe wird ein Volumenstrom von 3 NI/min und für die zweite Stufe von 4,5 NI/min eingestellt. Vor jeder Messung muss eine Dichtheitsprüfung durchgeführt werden. Danach wird das Gerät aufgeheizt, um der Kondensation an der Filterpatrone vorzubeugen (Wöhler, 2012).

Die Angaben des Herstellers Wöhler zum Messbereich und der Genauigkeit der Staub- und Gasmessung werden in der Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Tabelle 3.4 Herstellerangaben zum Messbereich und der Genauigkeit der Staub- und Gasmessung für das Wöhler SM 500 Staubmessgerät (Wöhler, 2012)

Wöhler SM 500 Staubmessgerät	Messbereich	Genauigkeit
Staub	0 - 45 mg, entspricht 0 - 1.000 mg/Nm ³	besser $\pm 0,3$ mg Staubmasse
Sauerstoff	0 - 21 Vol.-%	$\pm 0,3$ Vol.-%
Kohlenstoffmonoxid	0 - 100.000 ppm	± 100 ppm bis 1.000 ppm sonst 10 % vom Messwert

4 Labor- und Prüfstandsmessungen

Neben den Vergleichsmessungen zwischen den Referenzmessverfahren und den Schornsteinfegermessgeräten an installierten Anlagen werden auch Prüfstandsmessungen an zwei Feuerungsanlagen durchgeführt. Somit steht auch eine unter Prüfstandsbedingungen ermittelte Datenbasis zur Bewertung und Charakterisierung der bei den Feldmessungen eingesetzten Staubmessgeräte zur Verfügung.

Darüber hinaus wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Messwerte der Schornsteinfegermessgeräte bei der Aufgabe von staubfreier Laborluft und von Prüfgasen zu ermitteln. Außerdem wurde die Streuung des Wiegeverfahrens vom Feinstaubmessgerät FSM untersucht. Zuerst werden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen und dann der Prüfstandsmessungen mit Feuerungsabgasen dargestellt.

4.1 Labormessungen

Nullpunktuntersuchung

Hier wurde untersucht, welche Messwerte die beiden Schornsteinfegermessgeräte bei der Aufgabe staubfreier Raumluft ausgeben. Es wurden jeweils drei Staubmessungen mit jedem Schornsteinfegermessgerät durchgeführt, in Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 4.1 Schornsteinfegermessgeräte - Geräteanzeige bei Aufgabe von staubfreier Raumluft

Messgeräteanzeige bei Aufgabe staubfreier Raumluft		1. Messung	2. Messung	3. Messung
SM 500	Filterbeladung [mg]	-0,2	-0,1	0,1
	Staubkonzentration [mg/m ³] *	-	-	-
FSM	Vorwiegen [g]	29,1439	29,5803	29,1438
	Rückwiegen [g]	29,1441	29,5802	29,1437
	Filterbeladung [mg]	0,2	-0,1	-0,1
	Staubkonzentration [mg/m ³]	< 5	< 5	< 5

* bezogen auf 13 Vol% O₂

„-“ keine Anzeige der Staubkonzentration

Das Schornsteinfegermessgerät Wöhler SM 500 zeigt nach den jeweiligen Versuchen eine sehr geringe Massendifferenz des Filters an, die im Bereich der Gerätedrift liegt. Es wird von der Software jedoch keine bezogene Staubkonzentration ausgegeben, da die Sauerstoffkonzentration der Raumluft über 20 Vol.-% beträgt. Ab diesem Wert werden von der Software keine Bezugsrechnungen mehr durchgeführt.

Das System zur Feinstaubmessung FSM zeigt ebenfalls eine geringe Massendifferenz zwischen dem Vor- und Rückwiegen der Filterhülsen. Sie beträgt zwischen 0,2 mg und -0,1 mg und liegt damit im Anzeigebereich des SM 500. Diese geringe Massendifferenz ergibt eine Staubkonzentrationen von < 5 mg/m³, welche auch bei diesem Messgerät generell nicht an-

gezeigt werden. Es erfolgt lediglich ein Hinweis, dass die Staubkonzentration unter diesem Wert liegt.

Streuung des Wiegeverfahrens vom FSM

Um die Streuung des Wiegeverfahrens und der verwendeten Waage vom Schornsteingermessgerät FSM abzuschätzen, wird wiederholt derselbe Filterkäfig mit unbeladenem Filter gewogen. Die Ergebnisse der einzelnen Wiegevorgänge sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

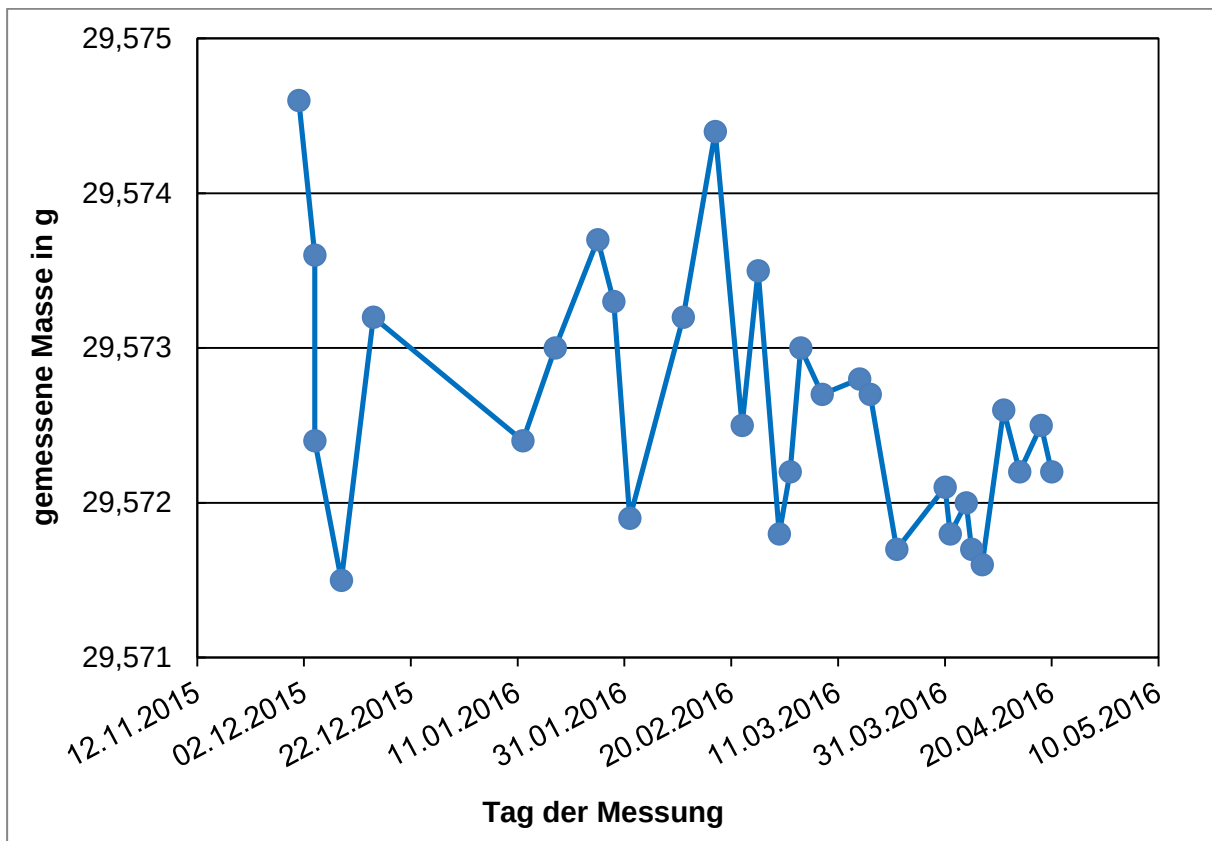


Abbildung 4.1 Verlauf der Masse eines Filterkäfigs mit unbeladener Filterhülse in Abhängigkeit des Wiegedatums (Anzeige Präzisionswaage des Feinstaubmessgeräts FSM)

Die wiederholten Wiegungen haben gezeigt, dass die Lagerung der Filterhülse das Ergebnis leicht beeinflusst. Nach den ersten drei Wiegungen, bei denen die Filterhülse auf 110 °C erwärmt wird, wurde der warme Filterkäfig mit der Filterhülse direkt in den mitgelieferten Aluminium-Transportbehälter gelegt und verschlossen. Der Alu-Transportbehälter ist relativ dicht, so dass kaum ein Luft- und damit auch Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung stattfindet. Der aus Glasfasern hergestellten Filterhülse wird bei jedem Wiegevorgang aufgrund des Trocknungsprozesses mehr Feuchte entzogen, sodass das Wiegeergebnis immer geringer als beim Mal davor ausfällt. Erst durch die Lagerung der Filterhülse im offenen Alu-Transportbehälter wird eine Stabilisierung der Messwerte erreicht. Insgesamt nimmt die Streuung der Messwerte zum Ende der Messreihe hin ab.

Das Wiegeverfahren wirkt sich somit auf die Präzision des Messverfahrens aus, da sich hierdurch eine Streuung der Messwerte (verursacht durch die Unsicherheiten der Waage und der schwankenden Restfeuchte des Filtermaterials) ergibt. In Tabelle 4.2 ist die berechnete Standardabweichung des Wiegeverfahrens angegeben.

Tabelle 4.2 Feinstaubmessgeräts FSM - Ergebnisse der Untersuchungen zur Streuung des Wiegeverfahrens

Anzahl der Messungen	30
Mittelwert Masse Filterkäfig + Filterhülse	29,5726 g
Maximalwert der Masse	29,5746 g
Minimalwert der Masse	29,5715 g
Differenz Minimal- / Maximalwert	3,1 mg
Standardabweichung	0,8 mg

Bei den insgesamt 30 Messungen ergab sich eine Standardabweichung des Messwertes für die Masse des Filterkäfigs und der Filterhülse von 0,8 mg, die Differenz zwischen dem Maximal- und Minimalwert für die 30 Messwerte beträgt 3,1 mg. Die Standardabweichung von 0,8 mg entspricht bei einem Volumenstrom von 13 l/min und einer Messdauer von 15 Minuten einer Messwertstreuung von 4,1 mg/m³.

Prüfgasuntersuchung

Um die Richtigkeit der CO- und O₂-Konzentrationsmessung der Schornsteinfegermessgeräte zu überprüfen, wurden Prüfgase mit bekannten CO- und O₂-Konzentrationen auf die Schornsteinfegermessgeräte aufgegeben.

Das Wöhler SM 500 wurde vor den Feldmessungen überprüft, hierbei wurde das Prüfgas direkt auf die Probenahmesonde des Gerätes (siehe Abbildung 3.4) drucklos aufgegeben.

Das Feinstaub-Messgerät FSM wurde im Anschluss an die Feldmessungen mit Prüfgas beaufschlagt. Das Prüfgas wurde hier direkt auf das Handgerät drucklos aufgegeben, da sich in diesem die Sensoren befinden. Zur Messung mit der hohen CO-Prüfgaskonzentration von 0,701 Vol.-% (7010 ppm) ist anzumerken, dass diese Konzentration mit dem CO-Sensor für die niedrigen Konzentrationen gemessen wurde, da der Sensor für die hohen Konzentrationen nach der Feldmesskampagne und während den Messungen mit den Schornsteinfegern ausgefallen ist. Tabelle 4.3 fasst die Ergebnisse der Prüfgasuntersuchungen zusammen.

Tabelle 4.3 Ergebnisse der Prüfgasuntersuchungen für CO und O₂ für die Schornsteinfegermessgeräte

Prüfgasuntersuchungen	CO-Konzentration in ppm			O ₂ -Konzentration in Vol.-%		
Sollwerte Prüfgase	100	790	7.010	0,0	6,0	10,0
Messwert SM 500 *	110	790	6.937	0,3	6,3	10,6
Messwert FSM **	103	808	6.690	0,0	6,0	10,3

* Prüfgasaufgabe vor den Feldmessungen ** Prüfgasaufgabe nach den Feldmessungen

Die Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) an die Schornsteinfegermessgeräte bezüglich der Messgenauigkeit der CO- und O₂-Messung sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Insgesamt liegen die Abweichungen der gemessenen Konzentrationen mit Prüfgasen, mit einer Ausnahme, innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie. Bei einer Prüfgaskonzentration von 10 Vol.-% O₂ wurde beim Wöhler SM 500 ein Messwert von 10,6 Vol.-% angezeigt. Dies ist 0,3 Vol.-% mehr als die maximal zulässige Messwertabweichung. Bei der Aufgabe von reinem Stickstoff zeigte das Gerät 0,3 Vol.-% O₂ an, mit Umgebungsluft lag der Messwert bei 21,0 Vol.-%.

4.2 Prüfstandsmessungen

Die Prüfstandsmessungen wurden an zwei Feuerungsanlagen durchgeführt, einer mechanisch beschickten modernen Hackgutheizung und einem älteren einfach aufgebauten Stückholzkessel. Beide Feuerungen wurden nacheinander auf demselben Prüfstand mit weitgehend identischer Messstrecke aufgebaut.

Messtrecken

Aufgrund unterschiedlicher Abmessungen der beiden Heizkessel musste jeweils das erste Rohrstück der Abgasstrecke angepasst werden. Beide Messstrecken (siehe Abbildung 4.2) sind vertikal aufgebaut, weisen einen Durchmesser von 150 mm auf und erfüllen die Vorgaben der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) hinsichtlich den Ein- und Auslaufstrecken.

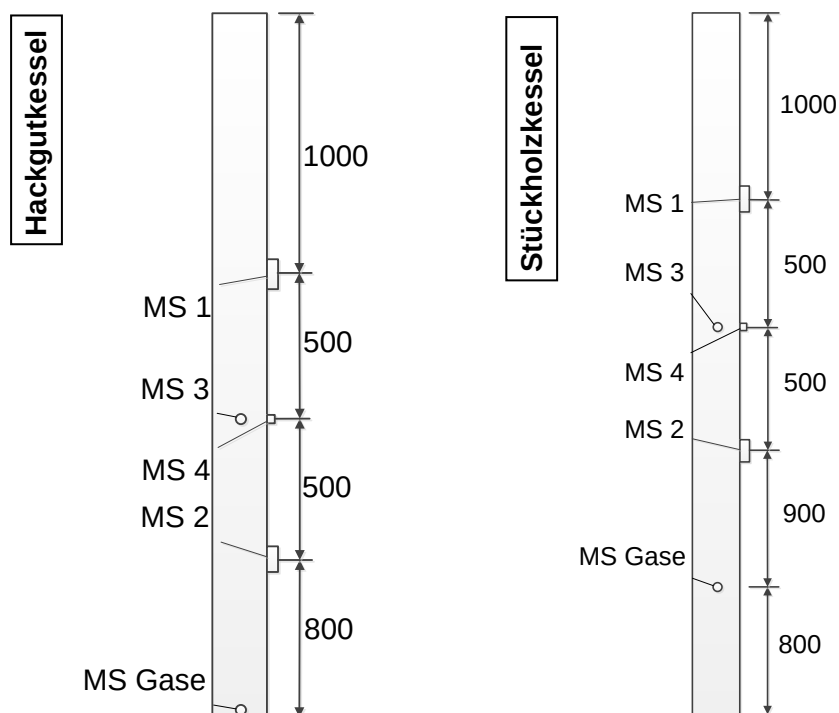


Abbildung 4.2 Schematische Darstellung der Messstrecken für die Prüfstandsmessungen (links für den Hackgutkessel und rechts für den Stückholzkessel) mit Messstellen MS für Gase und Staub (MS 1 bis MS 4). Längenangaben in mm

Die Einlaufstrecke beim Hackgutkessel bis zur ersten Messstelle MS 2 für Staub beträgt 800 mm. Das entspricht mehr als dem 5-fachen hydraulischen Durchmesser der Messstrecke. Die Messstelle MS 1 befindet sich einen Meter darüber. Beide Messstellen werden für das Standardreferenzmessverfahren für Staub verwendet. Die untersuchten Schornsteinfegermessgeräte werden an den Messstellen MS 3 und MS 4 in das Abgasrohr eingeführt. Die Auslaufstrecke beträgt 1 m.

Der Unterschied zur Messstrecke für den Stückholzkessel besteht in der längeren Einlaufstrecke von 1.700 mm bis zur Messstelle MS 2. Die Messstelle MS Gase für die Messung der O₂- und CO-Konzentrationen befindet in einem Abstand von 800 mm beim Hackgutkessel bzw. 900 mm beim Stückholzkessel vor der ersten Staubmessstelle.

Somit werden für beide Messstrecken die Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 bezüglich der Ein- und Auslaufstrecke von fünf bzw. zwei hydraulischen Durchmessern erfüllt.

Feuerungsanlagen und Brennstoffe

Als moderne mechanisch beschickte Anlage mit Lambdaregelung wurde ein Hackgutkessel der Firma Fröling GmbH mit einer Nennwärmeleistung von 24 kW eingesetzt, der sowohl mit Hackgut als auch mit Holzpellets betrieben werden kann. Die wichtigsten Kennwerte des Heizkessels und einige Angaben zur Messstelle sind in der Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4 Kennwerte des Hackgutkessels T4 (Fröling, 2011) und der Messstelle

Hersteller	Fröling GmbH
Hackgutheizkesseltyp	T4-24
Baujahr	2011
Nennwärmeleistung	24 kW
Wärmeleistungsbereich	7,2 – 24 kW
Zulässige Brennstoffe	Holzpellets, Holzhackgut W30 G 30/P16 M30
Wirkungsgrad (Hackgut Nenn-/Teillast)	92,3 % / 91,6 %
Wirkungsgrad (Pellets Nenn-/Teillast)	92,2 % / 91 %
Kesselklasse nach EN 303-5	3
Wasserinhalt	105 Liter
Max. Kesseltemperatur	90 °C
Zulässiger Betriebsdruck	3 bar
Nenn-Brennstoffwärmeleistung	26,1 kW
Abgasgeschwindigkeit Messstelle Staub	ca. 2 m/s
Abgastemperatur Messstelle Gase	ca. 145 °C (Hackgut) bis 175 °C (Holzpellets)

Mit Holzpellets befeuert erreicht dieser Hackgutheizkessel niedrige Staubemissionen im Bereich ca. 20 mg/m³. Mit Hackgut steigt die Staubkonzentration auf ca. 60 mg/m³ an. An dieser Anlage soll das Verhalten der Schornsteinfegermessgeräte bei niedrigen und mittleren Staubkonzentrationen untersucht werden.

Hierbei werden für die Prüfstandsmessungen zwei Brennstoffe eingesetzt: Holzpellets und Hackgut. Die eingesetzten Holzpellets von der Firma BayWa AG entsprechen der Güteklasse A1 der DIN EN 14961-2 (2011) für Holzpellets. Sie haben einen Durchmesser von 6 mm. Die Qualität des verfeuerten Hackguts war aufgrund des geringen Rindenanteils und der geringen Feinanteile sowie des geringen Wassergehalt von 16,1 % gut.

Als Vertreter für ältere einfach aufgebaute Stückholzkessel wurde der Typ D 15 des Herstellers Atmos mit einer Nennwärmeleistung von 14,5 kW eingesetzt. Die wichtigen Kennwerte des Heizkessels und einige Angaben zur Messstelle sind in Tabelle 4.5 zusammengestellt.

Tabelle 4.5 Kennwerte des Stückholzkessels laut Typenschild und der Messstelle

Hersteller	JAROSLAV CANKAŘ & SYN ATMOS
Kesseltyp	D 15
Baujahr	2006
Nennwärmeleistung	14,5 kW
Wärmeleistungsbereich	7 kW – 14,5 kW
Brennstoff	Holzzscheite bis 310 mm Länge
Wirkungsgrad	71 % - 83 %
Kesselklasse nach EN 303-5	1
Wasserinhalt	38 Liter
Max. Kesseltemperatur	95 °C
Maximaler Arbeitsüberdruck	2 bar
Betriebszug	-18 Pa
Abgasgeschwindigkeit Messstelle Staub	ca. 3 m/s
Abgastemperatur Messstelle Gase	ca. 370 °C

An dieser Anlage soll das Verhalten der Schornsteinfegermessgeräte bei hohen Staubkonzentrationen im Bereich bis zu 200 mg/m³ untersucht werden.

Als Brennstoff wurde Buchenscheitholz mit einer maximalen Länge von 350 mm mit einem Wassergehalt von 12,2 % eingesetzt.

Messprogramm und Vorgehensweise

Bei den Prüfstandsmessungen wurden jeweils Doppelbestimmungen mit dem Referenzmessverfahren und Messungen mit den zwei Schornsteinfegermessgeräten (Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM) durchgeführt. Nach jeder Messung wurden die Messpositionen des Standardreferenzmessverfahrens und der Schornsteinfegermessgeräte getauscht, um ggf. einen Einfluss der Messstellen auf die ermittelten Staubkonzentrationen zu erkennen. Weiterhin wurden die CO- und O₂-Konzentrationen im Abgas an der Messstelle Gase mit den Referenzmessverfahren bestimmt.

Beim Hackgutkessel wurden mit den Brennstoffen Holzpellets und Hackgut jeweils 5 Vergleichsmessungen und mit dem Stückholzkessel wurden mit Buchenscheitholz ebenfalls 5 Messungen durchgeführt.

Die Vorgehensweise bei den Messungen orientierte sich an der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016). Bei den Prüfstandsmessungen wurden die Anlagen im Dauerbetrieb im Bereich der

Nennwärmeleistung betrieben, der Anlagenzustand war stationär. Vor Messbeginn wurde eine Kernstromsuche durchgeführt, die Staub- und Gasmessungen erfolgten immer im Kernstrom. Aufgrund der langen Ein- und Auslaufstrecken für die Messstellen befand sich der Kernstrom bei beiden Heizkesseln in der Mitte des Abgasrohres, die Gaskonzentrationen im Abgasrohquerschnitt waren homogen.

Sowohl beim Referenzmessverfahren für Staub als auch bei den Schornsteinfegermessgeräten wird eine Dichtheitsprüfung durchgeführt. Die Schornsteinfegermessgeräte können danach aufheizen bzw. eine Stabilisierungsphase durchlaufen. Nach Abschluss der Aufheiz- bzw. der Stabilisierungsphase werden die Sonden der Schornsteinfegermessgeräte und des Standardreferenzmessverfahrens in das Abgasrohr eingeführt und ausgerichtet. Alle Schornsteinfegermessgeräte und das Standardreferenzmessverfahren wurden jeweils gleichzeitig gestartet. Nach Ablauf der Messdauer von 15 Minuten wurden die Sonden aus dem Abgasrohr entfernt. Die Sonden beim Standardreferenzmessverfahren wurden mit Spülflüssigkeit und destilliertem Wasser gespült. Am Ende des Messtages wurden die Schornsteinfegermessgeräte gemäß den Anleitungen sowie die Entnahmesonde und die Planfilterkopfgeräte des Referenzmessverfahrens gründlich gereinigt.

4.3 Ergebnisse der Prüfstandsmessungen

4.3.1 Bewertung des Standardreferenzmessverfahrens für Staub

Zur Bewertung des Standardreferenzmessverfahrens für Staub wurden auf dem Prüfstand insgesamt 15 zeitgleiche Doppelbestimmungen durchgeführt, 10 Doppelbestimmungen an der Messstrecke für den Hackgutkessel (bezeichnet als Prüfstand 1) und fünf Doppelbestimmungen an der Messstrecke für den Stückholzkessel (bezeichnet als Prüfstand 2). Das Ergebnis einer Doppelbestimmung mit Hackgut wurde nicht weiter verwendet, da sich die Feuerungsanlage nach dem Start der Messung abgeschaltet hatte.

Die Ergebnisse der Doppelbestimmungen auf dem Prüfstand mit den Messaufbauten 1 und 2 sind in Abbildung 4.3 als nicht bezogene Konzentrationen dargestellt. Eine Umrechnung der gemessenen Konzentrationen auf den Bezugssauerstoffgehalt kann auf dem Prüfstand entfallen, da sich die Sauerstoffkonzentration zwischen der Gasmessstelle und den Staubbmessstellen nicht ändert. Bei den Feldmessungen wurde der Messaufbau 1 eingesetzt.

Bis auf eine Ausnahme bei der höchsten gemessenen Staubkonzentration liegen alle Doppelbestimmungen nahe oder auf der Sollwertlinie. Für die 14 verwertbaren Doppelbestimmungen ergibt sich bei den unbezogenen Messwerten eine absolute Standardunsicherheit von $5,9 \text{ mg/m}^3$ und eine auf den Mittelwert der Doppelbestimmungen bezogene relative Standardunsicherheit von 9,6 %, siehe Tabelle 4.6. Die Berechnung erfolgt nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015). Diese gibt als zulässige relative Standardunsicherheit für Messergebnisse von Doppelbestimmungen 10 % des zu überwachenden Grenzwertes. In diesem Fall wird die relative Standardunsicherheit mit Bezug auf den Mittelwert aller Doppelbestimmungen gebildet. Damit ist das eingesetzte Standardreferenzverfahren für die Staubbmessung ausreichend genau. Da bei den Feldmessungen keine Doppel- sondern Einfachbestimmungen durchgeführt werden, kann mit diesen Erkenntnissen die Genauigkeit der Einfachbestimmungen abgeschätzt werden.

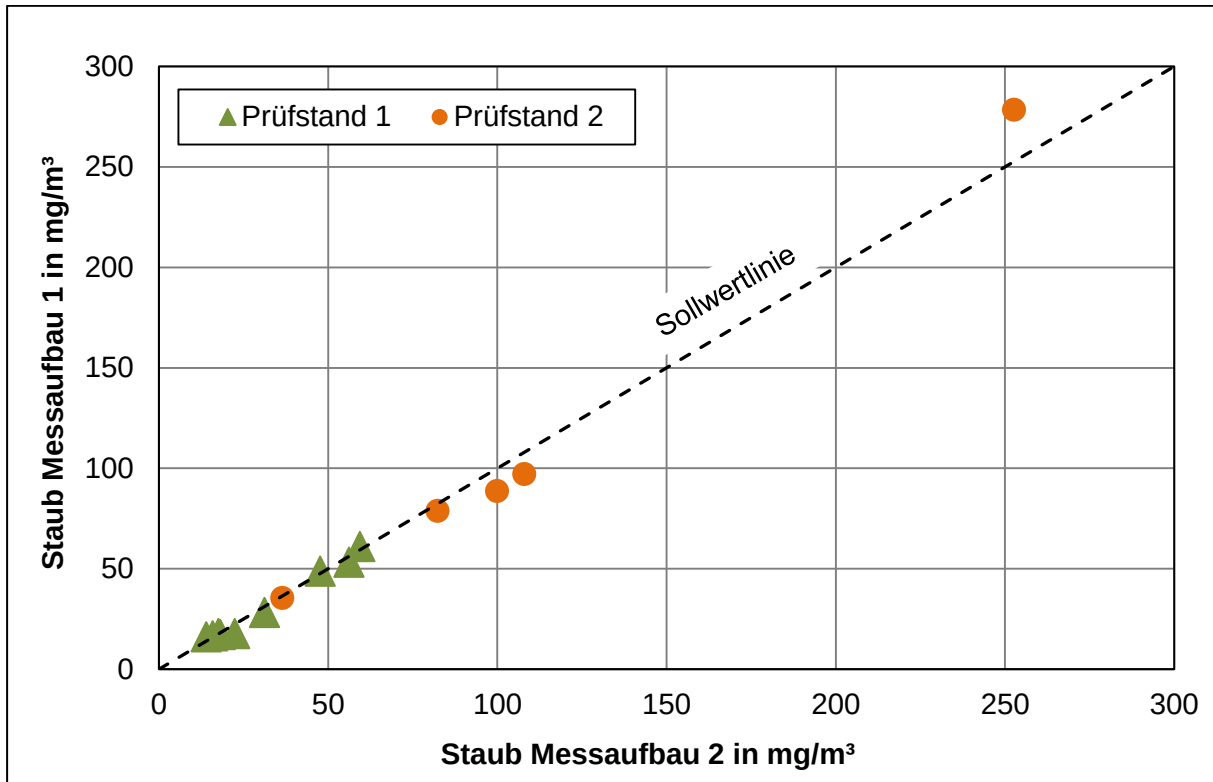


Abbildung 4.3 Prüfstand - Staubkonzentrationen (unbezogen) aus Doppelbestimmungen mit Messaufbau 1 und 2 mit Standardreferenzverfahren

Tabelle 4.6 Berechnung der Standardunsicherheit für 14 verwendete Doppelbestimmungen mit dem Standardreferenzverfahren für Staub

Doppelbestimmungen mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub auf dem Prüfstand	unbezogene Messwerte	bezogene Messwerte *
Anzahl der Doppelbestimmungen	14	14
Mittelwert aller Doppelbestimmungen	61,3 mg/m ³	47,0 mg/m ³
absolute Standardunsicherheit $u_{D,Referenz}$	5,9 mg/m³	4,3 mg/m³
relative Standardunsicherheit $u_{D,Referenz}^{**}$	9,6 %	9,2 %

* Bezugssauerstoffgehalt: 13 Vol.-%

** Bezug: Mittelwert der Doppelbestimmungen

In der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) erfolgt die Berechnung der Standardunsicherheit in Bezug auf die zu überwachenden Grenzwerte, wobei keine Umrechnung auf den Bezugs-sauerstoffgehalt erfolgt. Hierzu werden die Messwerte in die Grenzwertklassen GW 0,02, GW 0,06, GW 0,09, GW 0,10 und GW 0,15 g/m³ (siehe hierzu auch Tabelle 2.2) eingeteilt, wobei jeweils ein Intervall von ± 50 % des Grenzwertes um den jeweiligen Grenzwert herangezogen wird. D.h. z.B., dass dem GW 0,02 (entsprechend 20 mg/m³) alle Messwerte von 10 bis 30 mg/m³ zugeordnet werden. Da bei den Prüfstandsmessungen nur für diese Grenzwertklasse eine ausreichende Anzahl an Messergebnissen vorliegt, wurde die Standardunsicherheit für diese Klasse berechnet, siehe Tabelle 4.7.

Für diese Grenzwertklasse weist das Referenzmessverfahren für Staub eine geringere Standardunsicherheit von 8,8 % im Vergleich zur Berechnung für alle Messwerte (Standardunsi-

cherheit 9,6 %) auf. Ursache hierfür ist die ungleiche Verteilung der vorliegenden Messwerte, da fast die Hälfte der Werte im Bereich $< 30 \text{ mg/m}^3$ liegen. Letztlich ist deshalb die berechnete Standardunsicherheit in der GW $0,02 \text{ g/m}^3$ aussagekräftiger.

Tabelle 4.7 Berechnung der Standardunsicherheit für 6 Doppelbestimmungen mit dem Standardreferenzverfahren für Staub für die Grenzwertklasse $0,02 \text{ g/m}^3$ (mit Messwerten im Bereich von 10 bis 30 mg/m^3)

Doppelbestimmungen mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub auf dem Prüfstand	unbezogene Messwerte
Anzahl der Doppelbestimmungen	6
Mittelwert der Doppelbestimmungen	$19,4 \text{ mg/m}^3$
absolute Standardunsicherheit $u_{D,Referenz}$	$1,8 \text{ mg/m}^3$
relative Standardunsicherheit $u_{D,Referenz}^*$	8,8 %

* Bezug: Grenzwert in Höhe von 20 mg/m^3

4.3.2 Staub-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten

Von den insgesamt 15 durchgeführten Vergleichsmessungen mit den beiden Staub-Referenzaufbauten und den beiden Schornsteinfegermessgeräten konnte eine Messung beim Hackgutkessel (Brennstoff Hackgut) nicht verwendet werden, da sich der Kessel nach Messbeginn abgeschaltet hat und für eine Messung am Hackgutkessel mit Holzpellets liegen für das Feinstaub-Messgerät FSM keine Messwerte vor.

In Abbildung 4.4 sind die Ergebnisse der Prüfstandsmessungen für die unbezogenen Staubkonzentrationen des Referenzmessverfahrens (Mittelwerte der beiden Messaufbauten) im Vergleich zu den Schornsteinfegermessgeräten aufgetragen. In der Tendenz liegen die Messwerte vom FSM etwas unterhalb und die Messwerte vom Wöhler SM 500 etwas oberhalb der Sollwertlinie. Mit eingezeichnet sind die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) zugelassene erweiterte Messunsicherheit von $\pm 40 \%$ (im Bereich 10 bis 300 mg/m^3 bezogen auf den Referenzmesswert, bei Werten < 10 bzw. $> 300 \text{ mg/m}^3$ bezogen auf den Bereichsendwert 10 bzw. 300 mg/m^3), in diesem Bereich sollten erwartungsgemäß 95 % der Messwerte liegen. Das bedeutet, dass jeweils ein Messwert vom SM 500 und vom FSM außerhalb des Intervalls liegen darf, was hier der Fall ist.

Die entsprechend der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) berechneten erweiterten Messunsicherheiten für die beiden Schornsteinfegermessgeräte für die Grenzwertklasse GW $0,02 \text{ g/m}^3$ ist in Tabelle 4.8 dargestellt. Für das Wöhler SM 500 ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit von rund 25 % und beim Feinstaub-Messgerät FSM von rund 29 %. In der Eignungsprüfung der beiden Messgeräte wurde beim Wöhler SM 500 ein Wert von 32 % und beim FSM von 39 % für diese Grenzwertklasse ermittelt (siehe Tabelle 2.2). Somit werden die Ergebnisse der Eignungsprüfung in den aktuellen Prüfstandsmessungen für die Grenzwertklasse bestätigt.

Insgesamt halten die beiden Schornsteinfegermessgeräte die Anforderung bezüglich der erweiterten Messunsicherheit und der Messwertabweichung im gesamten untersuchten Messbereich ein.

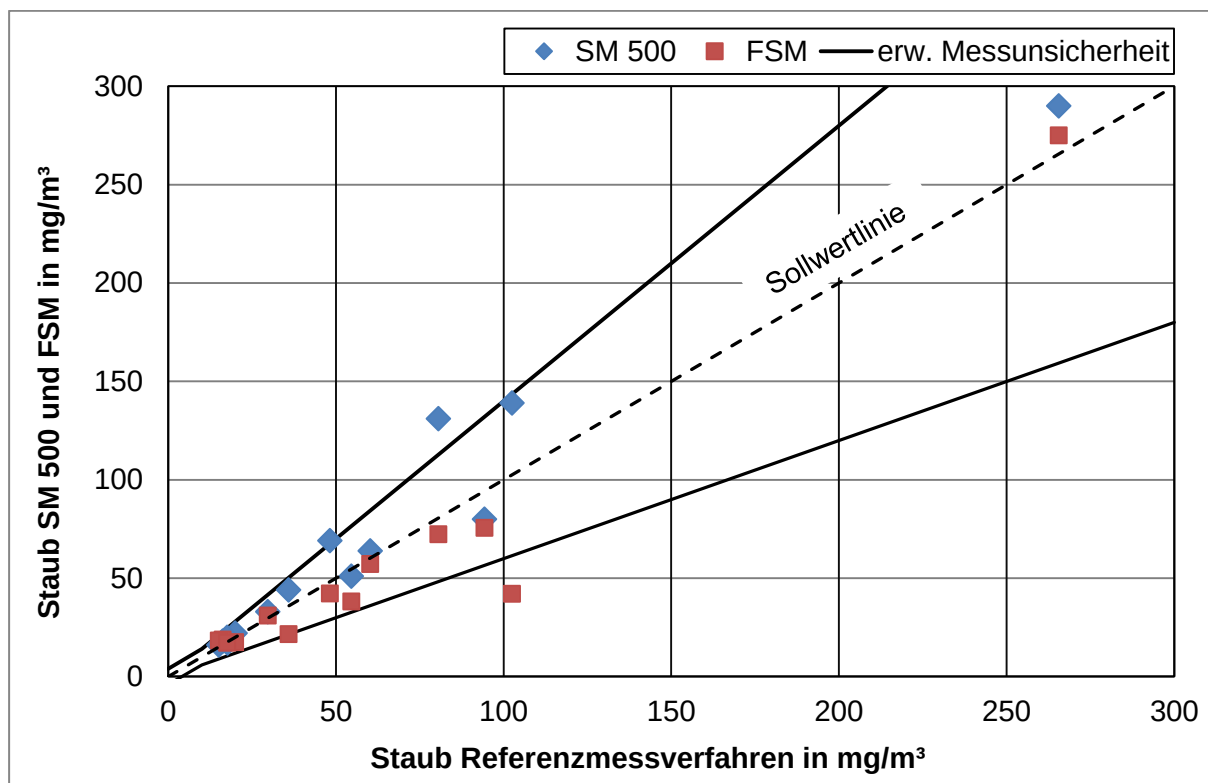


Abbildung 4.4 Prüfstand - Staubkonzentrationen (unbezogen) des Referenzmessverfahrens (Mittelwert von Messaufbau 1 und 2) im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an erweiterte Messunsicherheit von $\pm 40\%$)

Tabelle 4.8 Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für Staub der Grenzwertklasse $0,02 \text{ g/m}^3$ für die beiden Schornsteinfegermessgeräte (mit Messwerten im Bereich von 10 bis 30 mg/m^3 beim Standardreferenzmessverfahren)

erweiterte Messunsicherheit für Staub in der Grenzwertklasse $0,02 \text{ g/m}^3$ (Prüfstandsmessungen)	Wöhler SM 500	FSM
Anzahl der Messungen (Anzahl N)	6	5
Mittelwert der Messungen für GW $0,02 \text{ g/m}^3$	$21,0 \text{ mg/m}^3$	$20,6 \text{ mg/m}^3$
Messunsicherheit $u_{SM\ 500 \text{ bzw. } FSM}$	$2,1 \text{ mg/m}^3$	$2,3 \text{ mg/m}^3$
Erweiterungsfaktor *	2,447	2,571
erweiterte Messunsicherheit $U_{SM500 \text{ bzw. } FSM}^{**}$	25,1 %	29,2 %

* zweiseitiger Studentfaktor für Anzahl N der Freiheitsgrade und Sicherheit von 95%

** Bezug: Grenzwert in Höhe von 20 mg/m^3

4.3.3 O₂-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten

Von den insgesamt 15 durchgeführten Vergleichsmessungen mit den Referenzmessgeräten für Staub und Gase (CO und O₂) und den beiden Schornsteinfegermessgeräten konnte eine Messung beim Hackgutkessel (Brennstoff Hackgut) nicht verwendet werden, da sich der Kessel nach Messbeginn abgeschaltet hat und für eine Messung am Hackgutkessel mit Holzpellets liegen für das Feinstaub-Messgerät FSM keine Messwerte vor.

Abbildung 4.5 stellt die Messergebnisse der Vergleichsmessungen zwischen dem O₂-Referenzmessgerät und den Schornsteinfegermessgeräten dar. Idealerweise sollten die Messwerte auf der gestrichelten Sollwertlinie liegen. Die Anforderung bezüglich der erweiterten Messunsicherheit von 0,5 Vol.-% nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) ist mit durchgezogenen Linien eingezeichnet. 95 % der Messwerte sollen demnach im eingezeichneten Intervall liegen. Das bedeutet, dass jeweils ein Messwert vom SM 500 und FSM außerhalb des Intervalls liegen darf. Sowohl beim SM 500 als auch beim FSM liegt kein Wert außerhalb der zulässigen Messunsicherheit.

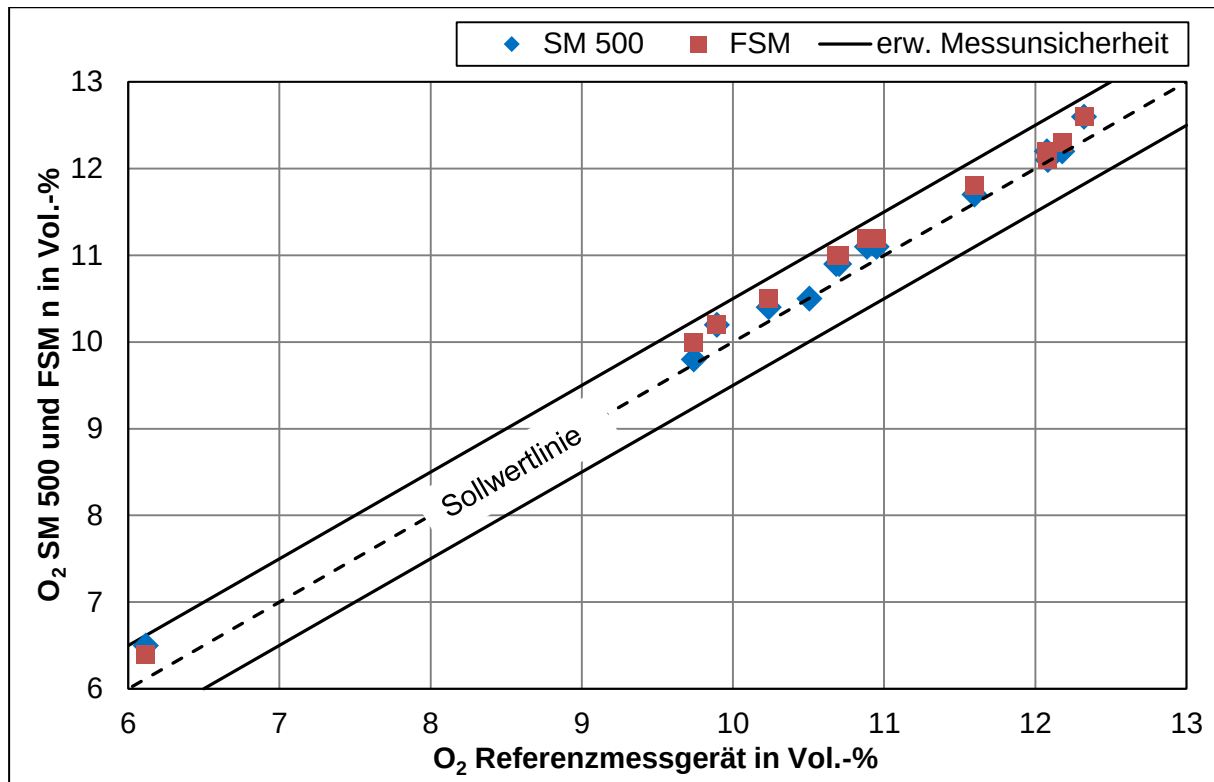


Abbildung 4.5 Prüfstand - O₂-Konzentrationen des Referenzmessgerätes im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit von $\pm 0,5$ Vol.-%)

Nach der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) ist eine maximale Messwertabweichung von $\pm 0,3$ Vol.-% zugelassen. Das Schornsteinfegermessgerät SM 500 liegt in rund 14 % der Messungen (2 von 14 Messungen) und das Schornsteinfegermessgerät FSM in 23 % der Messungen (3 von 13 Messungen) außerhalb dieses Bereiches, wobei eine Abweichung beim SM 500 und alle Abweichungen beim FSM nur gering sind.

In Tabelle 4.9 ist die Auswertung der gemessenen O₂-Konzentrationen zusammengefasst. In der Tendenz liegen die von den Schornsteinfegermessgeräten auf dem Prüfstand mit realen Abgasen ermittelten O₂-Konzentrationen etwas zu hoch. Bei der Überprüfung der Messgeräte mit Prüfgasen zeigten diese in den meisten Fällen ebenfalls etwas zu hohe Werte an (siehe auch Tabelle 4.3).

Tabelle 4.9 Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für O₂ für die beiden Schornsteinfegermessgeräte

erweiterte Messunsicherheit für O ₂ (Prüfstandsmessungen)	Wöhler SM 500	Feinstaub- messgerät FSM
Anzahl der Messungen (Anzahl N)	14	13
Mittelwert der Messungen *	10,9 Vol.-%	11,0 Vol.-%
Messunsicherheit $u_{SM\ 500\ bzw.\ FSM}$	0,19 Vol.-%	0,25 Vol.-%
Erweiterungsfaktor **	2,145	2,160
erweiterte Messunsicherheit $U_{SM500\ bzw.\ FSM}$	0,4 Vol.-%	0,5 Vol.-%

* Mittelwert des Referenzmessgerätes für N = 14 und 13: 10,7 Vol.-%

** zweiseitiger Studentfaktor für Anzahl N der Freiheitsgrade und Sicherheit von 95%

4.3.4 CO-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten

Von den insgesamt 15 durchgeführten Vergleichsmessungen mit den Referenzmessgeräten für Staub und Gase (CO und O₂) und den beiden Schornsteinfegermessgeräten konnte eine Messung beim Hackgutkessel (Brennstoff Hackgut) nicht verwendet werden, da sich der Kessel nach Messbeginn abgeschaltet hat. Beim Feinstaub-Messgerät FSM liegen für eine Messung am Hackgutkessel mit Holzpellets und für den Stückholzkessel (Ausfall des Sensors für hohe Konzentrationen) keine Messwerte vor.

In Abbildung 4.6 sind die gemessenen unbezogenen CO-Konzentrationen in Abhängigkeit der Messwerte des Referenzmessgerätes sowie die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) zugelassene erweiterte Messunsicherheit von $\pm 20\%$ (im Bereich 150 bis 8.000 mg/m³ bezogen auf den Referenzmesswert, bei Werten < 150 bzw. > 8.000 mg/m³ bezogen auf den Bereichsendwert von 150 bzw. 8.000 mg/m³) aufgetragen. Im oberen Diagramm sind alle Messwerte aufgeführt. Beim Stückholzkessel lagen die meisten gemessenen CO-Konzentrationen über 4 g/m³ und damit höher als der höchste einzuhaltende Grenzwert der 1. BImSchV. Im unteren Diagramm sind nur Messwerte bis 600 mg/m³ dargestellt, diese wurden am Hackgutkessel ermittelt.

Die Messwerte vom SM 500 streuen bei höheren Konzentrationen um die Sollwertlinie, bei niedrigen Konzentrationen von ≤ 600 mg/m³ liegen diese alle unterhalb der Sollwertlinie. Da in dieses Messgerät nur ein CO-Sensor für hohe Konzentrationen eingebaut war, können sehr geringe CO-Konzentrationen von unter 100 mg/m³ nicht exakt gemessen werden und werden auch nicht zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit herangezogen. Als Messwertabweichung sind bei CO-Konzentrationen unter 1.000 ppm für den eingesetzten Sensor ± 100 ppm (125 mg/m³) zugelassen, siehe Tabelle 3.4.

Beim FSM liegen die Messwerte für die ermittelten CO-Konzentrationen bis 600 mg/m³ nahe der Sollwertlinie. Bei der Überprüfung mit Prüfgasen zeigten die beiden Schornsteinfegermessgeräte geringe Unterschiede im Vergleich zueinander, siehe Tabelle 4.3.

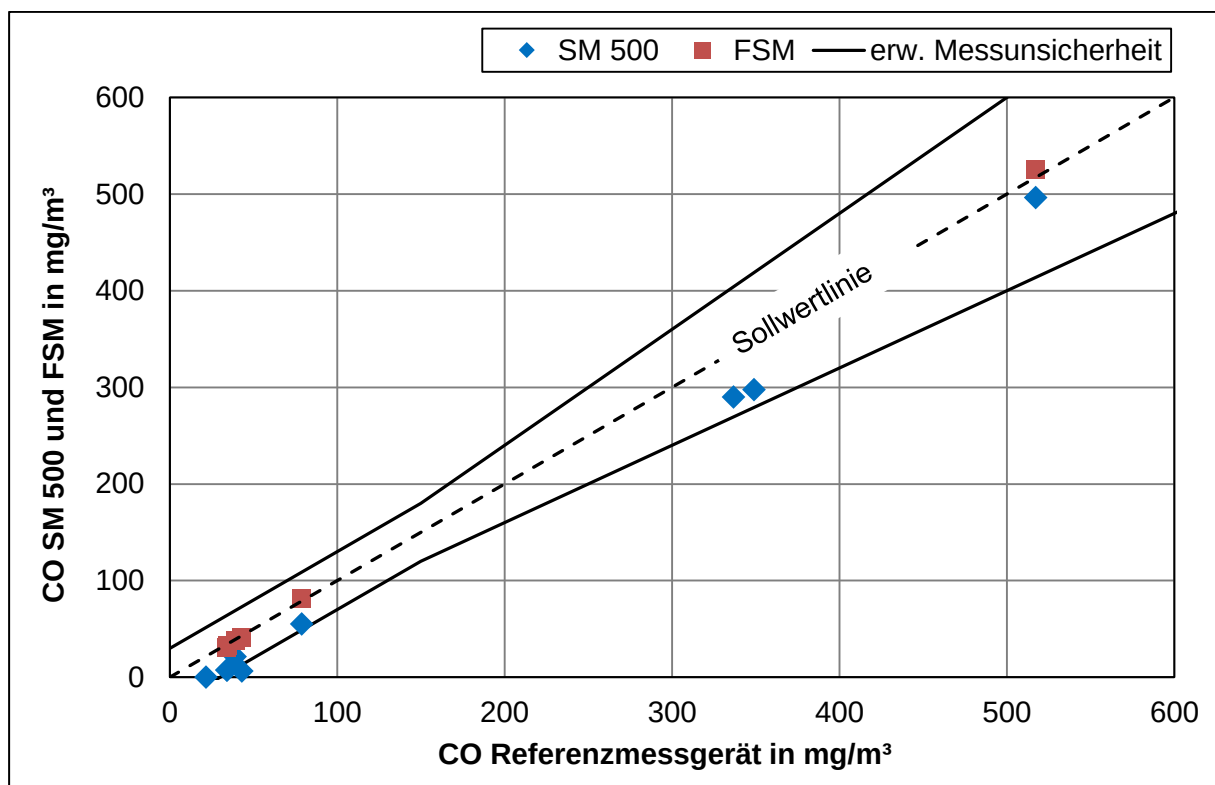
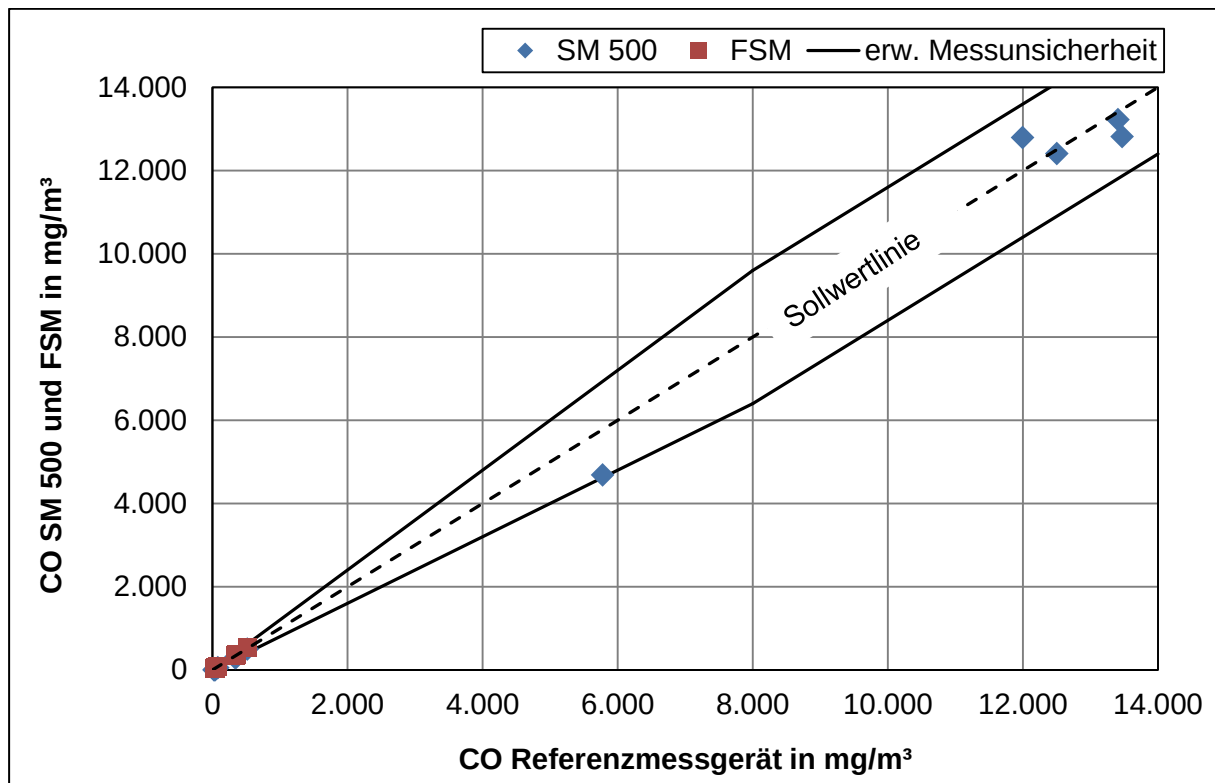


Abbildung 4.6 Prüfstand - CO-Konzentrationen (unbezogen) des Referenzmessgerätes im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit von $\pm 20\%$)
oben: alle Messwerte unten: Messwerte $\leq 600 \text{ mg/m}^3$

In Tabelle 4.10 sind für die unbezogenen Messwerte die berechneten erweiterten Messunsicherheiten aufgelistet. Für die beiden Schornsteinfegermessgeräte konnten hierfür jeweils 8 Messwerte herangezogen werden, allerdings z.T. aus unterschiedlichen Messungen. Für das Wöhler SM 500 wurden alle Messungen mit Werten größer als 100 mg/m³ (Referenzwert) und für das FSM wurden alle vorliegenden Messwerte des Hackgutkessels mit Werten unterhalb von 600 mg/m³ (Referenzwert) verwendet. Hierdurch ergeben sich auch stark abweichende Mittelwerte für diese Messungen, beim Wöhler SM 500 von 7.126 mg/m³ und für das FSM von 182 mg/m³.

Für das Wöhler SM 500 ergibt sich mit den verwendeten Messwerten eine erweiterte Messunsicherheit von 17 % und für das Feinstaub-Messgerät FSM von 8 %. Beide Messgeräte erfüllen somit die Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) an die zugelassene maximale erweiterte Messunsicherheit für CO.

Tabelle 4.10 Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für CO für die beiden Schornsteinfegermessgeräte

erweiterte Messunsicherheit für CO (Prüfstandsmessungen)	Wöhler SM 500	Feinstaub- Messgerät FSM
Anzahl der Messungen (Anzahl N)	8	8
Mittelwert der Messungen **	7.126 mg/m ³	182 mg/m ³
Messunsicherheit $u_{SM\ 500\ bzw.\ FSM}$	538 mg/m³	6 mg/m³
Erweiterungsfaktor *	2,306	2,306
erweiterte Messunsicherheit $U_{SM500\ bzw.\ FSM}$	17 %	8 %

* zweiseitiger Studentfaktor für Anzahl N der Freiheitsgrade und Sicherheit von 95%

** Bezug auf Mittelwert des Referenzmessgerätes. Für Wöhler SM 500: 7.295 mg/m³ und für FSM: 162 mg/m³

5 Feldmessungen

Im Rahmen des Vorhabens wurden Feldmessungen an zwei Pelletkesseln, einem Hackschnitzkessel mit Elektrofilter und einem Stückholzkessel durchgeführt. Bei den Feldmessungen wurden über einen Zeitraum von 4 Wochen verteilt mehrere Staubmessungen je Feuerungsanlage im wöchentlichen Rhythmus entsprechend der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) durchgeführt. Bei den jeweiligen Messungen wurden Brennstoffproben entnommen und der aktuelle Wartungszustand der Anlage bewertet.

Parallel zu den Messungen des IFK wurde jeweils einmal für jede mechanisch beschickte Anlage eine Überwachungsmessung durch den zuständigen Schornsteinfeger mit dessen Messgerät durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst die ausgewählten Anlagen beschrieben. Die Auswahl der Feuerungsanlagen im Feldmessprogramm und die Kontaktvermittlung zu den Betreibern erfolgten mit tatkräftiger Unterstützung des Landesinnungsverbandes des Schornsteinfegerhandwerks Baden-Württemberg.

5.1 Feuerungsanlagen im Feldmessprogramm

5.1.1 Anlage 1 - Hackschnitzkessel

Hierbei handelt es sich um einen mechanisch beschickten Hackschnitzkessel mit einer Nennwärmeleistung von 800 kW. Bestandteil der Anlage ist ein nachgeschalteter Elektrofilter der Firma Ionitec Anlagenbau GmbH zur Staubabscheidung. Die Messstellen befinden sich nach dem Elektrofilter, sodass der Einfluss des Elektrofilters mit untersucht wird. In Tabelle 5.1 sind wichtige Angaben zur Anlage 1 aufgelistet.

Tabelle 5.1 Kennwerte zu Anlage 1 - Hackschnitzkessel (Angaben von Typenschild und Betreiberinformationen) und Messstelle

Hersteller	HKI Heizkessel- und Industrieanlagenbau GmbH
Typ	K 8 - 800 mit nachgeschaltetem Elektrofilter
Baujahr	2007
Inbetriebnahme	2008
Grenzwerte 1. BImSchV	bis 2025: Staub 150 mg/m ³ , CO 500 mg/m ³ ab 2025 Stufe 1: Staub 100 mg/m ³ , CO 500 mg/m ³
Nennwärmeleistung	800 kW
Zulässige Brennstoffe	Holz / Rinde
Heizfläche	54 m ²
Wasserinhalt	3.042 Liter
Zulässige Vorlauftemperatur	110 °C
Zulässiger Betriebsüberdruck	6 bar
Abgasgeschwindigkeit Messstelle Staub	ca. 10 m/s
Abgastemperatur Messstelle Gase	ca. 136 °C
Unterdruck an Messstelle	ca. -35 Pa

Der Kessel wurde 2008 in Betrieb genommen und muss ab 2025 die Anforderungen der 1. Stufe der 1. BImSchV (2010) erfüllen. Bis zu diesem Zeitpunkt gilt eine Übergangsregelung, sodass der Staubgrenzwert bei 150 mg/m^3 ($0,15 \text{ g/m}^3$ bei 13 Vol.-% O_2) und der CO -Grenzwert bei 500 mg/m^3 ($0,5 \text{ g/m}^3$ bei 13 Vol.-% O_2) liegen. Die letzte Kesselreinigung erfolgte im Oktober 2015, während der Feldmesskampagne erfolgten weder eine Kesselreinigung noch Wartungsarbeiten am Kessel. Die Anlage ist Bestandteil einer Nahwärmeversorgung von im Wesentlichen öffentlichen Gebäuden und wird als Grundlastkessel eingesetzt.

Messstrecke

Die Messstrecke befindet sich ca. 1,8 m nach dem Elektrofilter und nach dem unmittelbar am Elektrofilterausgang installierten Saugzuggebläse. In Abbildung 5.1 ist eine Skizze der Messstrecke mit den wichtigsten Längenangaben dargestellt. Der Durchmesser des Abgasrohres beträgt 360 mm.

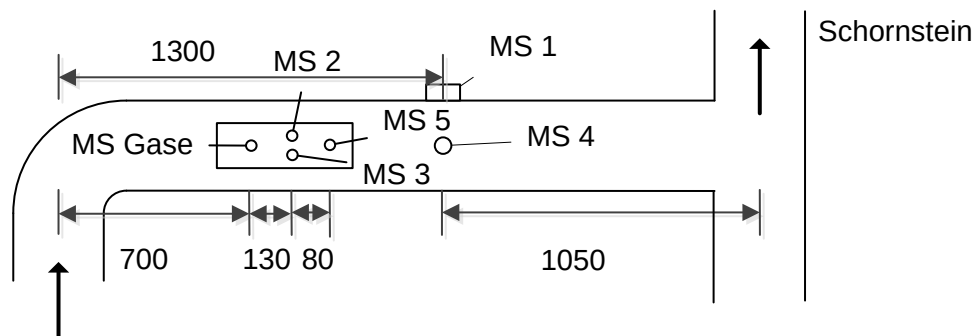


Abbildung 5.1 Schematische Darstellung der Messstrecke bei Anlage 1 mit Messstellen MS für Gase und Staub (MS 1 bis MS 5); Längenangaben in mm

Die Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) bezüglich der Einlaufstrecke von fünf hydraulischen Durchmessern werden hier nicht erfüllt. Die Auslaufstrecke genügt den Anforderungen von zwei hydraulischen Durchmessern.

Messstelle MS 1 ist für die Messung mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub vorgesehen. Die Schornsteinfegermessgeräte können an den Messstellen MS 2 bis MS 5 eingesetzt werden. Die Probenahme für die Gasmessungen mit dem Referenzmessgerät erfolgt an der Messstelle MS Gase.

Brennstoffproben

An jedem Messtag wurde eine Brennstoffprobe entnommen, um den Wassergehalt des Brennstoffes, bezogen auf die feuchte Brennstoffprobe, ermitteln zu können. Außerdem wurden die Brennstoffproben im Labor analysiert. Die Ergebnisse zu den Brennstoffanalysen für die Anlage 1 sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Das verwendete Hackgut weist einen hohen und schwankenden Wassergehalt auf. Aufgrund des hohen Wassergehalts des Brennstoffs und einer zusätzlichen Wassereindüsung als Brennkammertemperaturregelung wird eine Abgasfeuchte von bis zu 60 Vol.-% erreicht.

Tabelle 5.2 Anlage 1 - Brennstoffproben: Wassergehalte der Hackschnitzel und Ergebnisse der Laboranalysen

Messdatum	09.02.2016	19.02.2016	24.02.2016	03.03.2016	11.03.2016
Wassergehalt und Heizwert					
Wassergehalt in Massen-%	54,3	31,9	48,1	54,9	58,1
Heizwert in kJ/kg (Bezug: wasserfrei)	18.536	17.767	18.201	18.536	18.690
Aschegehalt und Elementaranalyse (Angaben in Massen-%, Bezug: wasserfrei)					
Asche ($O_2+550^\circ C$)	0,85	3,06	2,57	1,70	0,80
Kohlenstoff (C)	50,8	48,8	49,2	50,3	50,9
Wasserstoff (H)	6,2	6,0	6,0	6,2	6,2
Stickstoff (N)	0,276	0,431	0,455	0,240	0,235
Schwefel (S)	0,026	0,035	0,048	0,021	0,023
Chlor (Cl)	0,032	0,013	0,033	0,021	0,022
Ascheschmelzverhalten (Angaben in $^\circ C$, Veraschungstemperatur: $550^\circ C$)					
Sinterbeginn	1.100	1.150	1.100	1.030	730
Erweichungstemperatur	1.150	n.e.	1.120	1.340	1.400
Halbkugeltemperatur	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	1.450
Fließtemperatur	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
Aschehauptelemente (Angaben in Massen-%, Veraschungstemperatur: $550^\circ C$)					
Aluminium (Al_2O_3)	4,23	2,19	3,44	5,00	3,67
Barium (BaO)	0,569	0,151	0,052	0,270	0,280
Kalzium (CaO)	33,1	32,7	34,7	31,5	30,7
Eisen (Fe_2O_3)	1,17	0,689	0,794	2,06	0,615
Kalium (K_2O)	12,4	10,2	8,85	9,07	14,8
Magnesium (MgO)	4,37	4,20	3,16	5,47	5,33
Mangan (MnO)	4,10	0,958	0,349	3,42	3,87
Natrium (Na_2O)	0,917	0,407	1,06	0,559	0,684
Phosphor (P_2O_5)	4,02	5,13	3,58	3,72	3,24
Schwefel (SO_3)	2,42	1,09	1,81	1,71	1,04
Silizium (SiO_2)	5,80	12,4	12,6	12,7	8,42
Strontium (SrO)	0,055	0,044	0,100	0,042	0,046
Titan (TiO_2)	0,153	0,128	0,088	0,124	0,067

n.e. nicht erkennbar

Die verfeuerten Hackschnitzel wurden entweder aus Sägeresten oder aus Waldholz hergestellt, entsprechend unterschiedlich sind auch die Asche- und Siliziumgehalte der Proben. Bei Hackschnitzeln aus Waldholz lag der Fein- und Nadelanteil auch höher, wodurch sich der höhere Ascheanteil erklärt. Die geringsten Aschegehalte ergaben sich bei reinen Hackschnitzeln aus Sägeresten, die beiden höchsten Aschegehalte traten bei reinen Hackschnitzeln aus Waldrestholz auf. Der mittlere Aschegehalt ergab sich aus einer Brennstoffmischung aus beiden Qualitäten.

5.1.2 Anlage 2 - Pelletkessel 1

Die Anlage 2 ist ein mechanisch beschickter Pelletkessel der Firma HDG Bavaria GmbH und wird zur Versorgung von ca. 40 Wohnungen und einigen Einfamilienhäusern mit Heizwärme und Warmwasser eingesetzt. In den Heizkreis ist ein Pufferspeicher mit einem Wasserinhalt von ca. 7 m³ integriert. Die Tabelle 5.3 fasst die Informationen zur Anlage 2 zusammen.

Tabelle 5.3 Kennwerte zu Anlage 2 - Pelletkessel 1 (Angaben von Typenschild und Betreiberinformationen) und Messstelle

Hersteller	HDG Bavaria GmbH
Typ	HDG Compact 200
Inbetriebnahme	2009
Nennwärmeleistung	190 kW
Min. Wärmeleistung	57 kW
Zulässige Brennstoffe	Holzpellets, Hackgut B1
Wirkungsgrad (Hackgut Nennlast)	92,0 %
Wirkungsgrad (Pellets Nennlast)	93,1 %
Kesselklasse nach EN 303-5	3
Wasserinhalt	450 Liter
Max. Kesseltemperatur	+95 °C
Max. Betriebsüberdruck	3 bar
Grenzwerte 1. BImSchV	bis 2025: Staub 150 mg/m ³ , CO 1000 mg/m ³ ab 2025 Stufe 1: Staub 60 mg/m ³ , CO 800 mg/m ³
Abgasgeschwindigkeit Messstelle Staub	ca. 3,5 m/s
Abgastemperatur Messstelle Gase	ca. 259 °C
Unterdruck an der Messstelle	ca. -50 Pa bis -60 Pa

Der Kessel wurde 2009 in Betrieb genommen und muss ab 2025 den Anforderungen der 1. Stufe der 1. BImSchV genügen. Bis zu diesem Zeitpunkt gilt eine Übergangsregelung, sodass der Staubgrenzwert bei 150 mg/m³ (0,15 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) und der CO-Grenzwert bei 1.000 mg/m³ (1,0 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) liegen.

Zuletzt wurde die Anlage in der letzten Januarwoche 2016 gereinigt und visuell überprüft, sodass für die ersten durchgeführten Feldmessungen von einem guten Anlagenzustand ausgegangen wird und der Einfluss der zunehmenden Verschmutzung beobachtet werden kann.

Messstrecke

Die in Abbildung 5.2 dargestellte Messstrecke der Anlage 2 ist gegen die Vertikale um ca. 50 ° gekippt. Der Durchmesser des Abgasrohres beträgt 300 mm.

Die Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) bezüglich der Einlaufstrecke von fünf hydraulischen Durchmessern und der Auslaufstrecke von zwei hydraulischen Durchmessern werden hier nicht erfüllt.

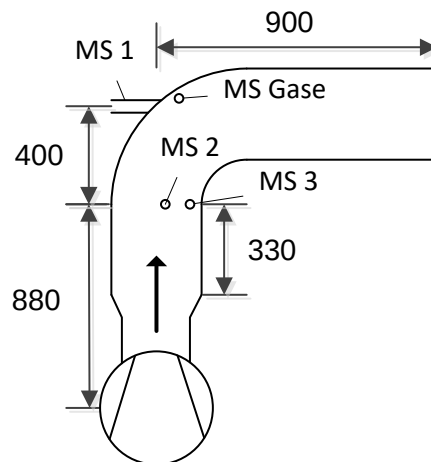


Abbildung 5.2 Schematische Darstellung der Messstrecke bei Anlage 2 mit Messstellen MS für Gase und Staub (MS 1 bis MS 3); Längenangaben in mm

Messstelle MS 1 ist für die Messung mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub vorgesehen. Das Schornsteinfegermessgerät FSM wird an der Messstelle MS 2 und das SM 500 an Messstelle MS 3 eingesetzt. Die Probenahme für die Gasmessungen erfolgt an der Messstelle MS Gase.

Brennstoffproben

Da das Brennstofflager bei dieser Anlage nicht immer zugänglich war und da in dieser Anlage ausschließlich Holzpellets verfeuert wurden, die nach Betreiberinformation zumindest die Anforderungen der DIN EN ISO17225-2 (2014) erfüllen, wurde nicht an jedem Messtag eine Brennstoffprobe entnommen. Insgesamt wurden im Messzeitraum drei Brennstoffproben entnommen und der Wassergehalt bestimmt. Eine Brennstoffprobe wurde im Labor analysiert. Das Ergebnis der Brennstoffanalyse ist in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Der Wassergehalt der Holzpellets schwankt nur geringfügig und liegt bei 7,1 % bzw. 7,7 %. Zwischen den Messtagen 10.2. und 25.2.2016 erfolgte eine neue Pelletslieferung. Diese Pellets wiesen einen etwas geringeren Wassergehalt auf. Somit wurden die ersten beiden Messungen mit der bereits vorliegenden Pelletsqualität (Wassergehalt 7,7 %) durchgeführt und die folgenden zwei Messungen u.U. mit der neuen Qualität vorgenommen. Da die Probenentnahme für den Brennstoff nicht direkt aus der Förderschnecke zum Heizkessel vorgenommen werden konnte, sondern im Austragbereich aus dem Brennstofflager stattfand, kann nicht genau bestimmt werden, ab wann nur noch die neue Brennstoffqualität verfeuert wurde.

Tabelle 5.4 **Anlage 2 - Brennstoffproben: Wassergehalte der Holzpellets und Ergebnis der Laboranalyse**

Messdatum	10.02.2016	25.02.2016	04.03.2016
Wassergehalt und Heizwert			
Wassergehalt in Massen-%	7,7	7,1	7,1
Heizwert in kJ/kg (Bezug: wasserfrei)		18.604	
Aschegehalt und Elementaranalyse (Angaben in Massen-%, Bezug: wasserfrei)			
Asche ($O_2+550^\circ C$)		0,40	
Kohlenstoff (C)		50,4	
Wasserstoff (H)		6,3	
Stickstoff (N)		0,137	
Schwefel (S)		0,022	
Chlor (Cl)		0,011	
Ascheschmelzverhalten (Angaben in $^\circ C$, Veraschungstemperatur: $550^\circ C$)			
Sinterbeginn		720	
Erweichungstemperatur		1.360	
Halbkugelttemperatur		1.450	
Fließtemperatur		n.e.	
Aschehauptelemente (Angaben in Massen-%, Veraschungstemperatur: $550^\circ C$)			
Aluminium (Al_2O_3)		2,21	
Barium (BaO)		0,377	
Kalzium (CaO)		32,1	
Eisen (Fe_2O_3)		1,54	
Kalium (K_2O)		13,3	
Magnesium (MgO)		5,66	
Mangan (MnO)		3,87	
Natrium (Na_2O)		2,14	
Phosphor (P_2O_5)		3,80	
Schwefel (SO_3)		2,00	
Silizium (SiO_2)		6,18	
Strontium (SrO)		0,109	
Titan (TiO_2)		0,078	

n.e. nicht erkennbar

5.1.3 Anlage 3 - Pelletkessel 2

Bei dieser Anlage handelt es sich ebenfalls um einen mechanisch beschickten Pelletkessel mit einer Nennwärmeleistung von 199 kW. In diesem können sowohl Holzpellets als auch

Hackgut verfeuert werden. Die Kennwerte der Anlage 3 sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Die Anlage dient zur Versorgung eines Gewerbebetriebs. In den Heizkreis ist ein Pufferspeicher mit einem Wasserinhalt von ca. 2,6 m³ integriert.

Tabelle 5.5 Kennwerte zu Anlage 3 - Pelletkessel 2 (Angaben von Typenschild und Betreiberinformationen) und Messstelle

Hersteller	Hargassner GesmbH
Typ	WTH 200 HSV 200
Baujahr	2014
Inbetriebnahme	ab August 2014
Nennwärmeleistung	199 kW
Brennstoffwärmeleistung	213,7 kW
Zulässige Brennstoffe	Holzpellets A1, Hackgut B1
Kesselklasse nach EN 303-5	3
Wasserinhalt	505 Liter
Max. Kesseltemperatur	+95 °C
Max. Betriebsdruck	3 bar
BLT-Wieselburg Prüfbericht	041/08
Anforderungen 1. BImSchV	Stufe 1: Holzpellets: Staub 60 mg/m ³ , CO 800 mg/m ³ Hackgut: Staub 100 mg/m ³ , CO 1.000 mg/m ³
Abgasgeschwindigkeit Messstelle Staub	ca. 3,5 m/s
Abgastemperatur Messstelle Gase	ca. 152 °C
Unterdruck an der Messstelle	ca. -25 Pa bis -35 Pa

Der Pelletkessel wurde zuletzt in der ersten Februarwoche 2016 gereinigt und gewartet, so dass für die ersten durchgeführten Feldmessungen von einem guten Anlagenzustand ausgegangen wird und der Einfluss der zunehmenden Verschmutzung beobachtet werden kann. Während den Feldmessungen erfolgte keine weitere Wartung des Kessels. Grundsätzlich erfolgt die Kesselreinigung und Wartung jährlich zwei Mal im festen Rhythmus.

Ab August 2014 erfolgte die Inbetriebnahme des Pelletkessels, dieser muss demnach die 1. Stufe der 1. BImSchV erfüllen. Im Dezember 2014 wurde der Pelletkessel erstmals vom Schornsteinfeger erfolgreich abgenommen (Inbetriebnahmemessung), hierbei wurde der Heizkessel als Hackschnitzelanlage eingestuft. Für die Feldmessungen wurde der Kessel als Pelletanlage geführt, da z.T. nur Holzpellets verfeuert wurden oder zumindest ein gewisser Pelletsanteil im aktuellen Brennstoff enthalten war.

Messstrecke

Die gesamte in Abbildung 5.3 abgebildete Abgasführung erfolgt horizontal. Der Durchmesser des Abgasrohres beträgt 250 mm. Während der Messungen wurde der Zugbegrenzer verschlossen, sodass keine Raumlufte angesaugt wird, die die Messung verfälscht. Der Unterdruck wurde während den Messungen über eine Reinigungstür im Schornstein entsprechend

dem Wert mit geöffnetem Zugbegrenzer eingestellt, so dass der Kesselbetrieb durch das Verschließen des Zugbegrenzers nicht beeinträchtigt wird.

Die Messstelle MS 3 genügt nicht den Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006) bezüglich der Einlaufstrecke, dafür ist die Auslaufstrecke ausreichend. Genau umgekehrt sieht es bei der Messstelle MS 1 aus.

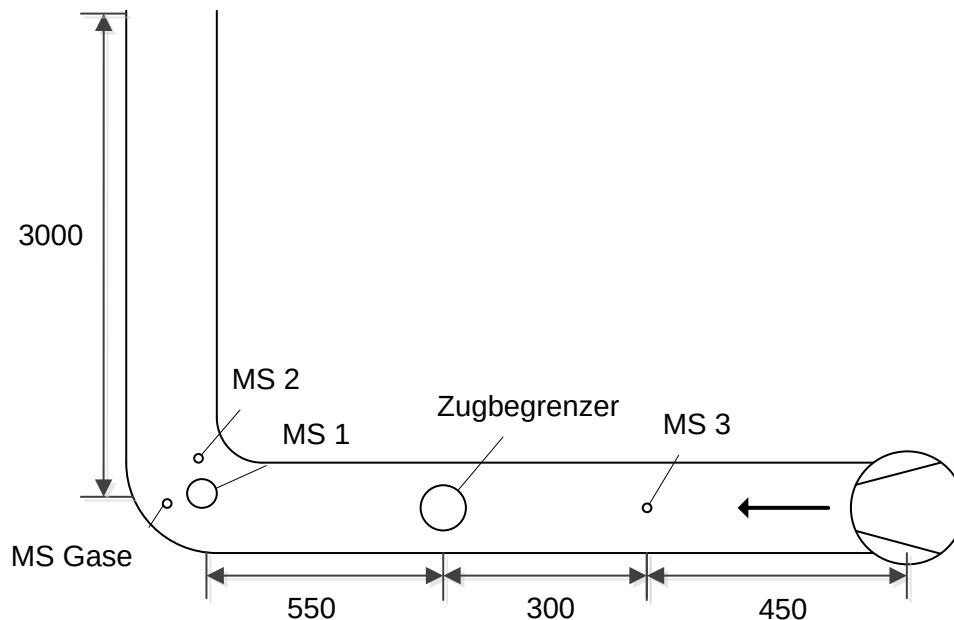


Abbildung 5.3 Schematische Darstellung der Messstrecke der Anlage 3 mit Messstellen MS für Gase und Staub (MS 1 bis MS 3); Längenangaben in mm

Dort kann die Einlaufstrecke noch als ausreichend lang betrachtet werden, da sich die Vorderkante der Staubsonde noch im geraden Teil der Messstrecke befindet. Jedoch ist die Auslaufstrecke nicht vorhanden, da die Öffnung der Messstelle mittig im Bogen sitzt und die Staubsonde etwas vor Beginn des Bogens positioniert ist. Die Messstelle MS 2 hat weder eine ausreichende Ein- noch Auslaufstrecke.

Die Messstelle MS 1 ist für die Messung mit dem Standardreferenzmessverfahren vorgesehen. Die Schornsteinfegermessgeräte werden an den Messstellen MS 2 und MS 3 eingesetzt. Die Probenahme für die Gasmessungen mit dem Referenzgerät erfolgt an der Messstelle MS Gase.

Brennstoffproben

Die in dieser Anlage verwendeten Brennstoffe unterscheiden sich z. B. bezüglich ihrer Holzart, Form und den Feinanteilen. Es werden sowohl Holzpellets nach DIN EN ISO17225-2 (2014) als auch Hackschnitzel und feine Hobelreste, die aus Resthölzern der Produktion bzw. der Absaugung von Holzverarbeitungsmaschinen stammen, verfeuert. Hierbei handelt es sich vor allem um Buchenholz oder andere naturbelassene Holzarten.

Die Holzpellets werden, je nach Anfall der Resthölzer, entweder in reiner Form oder gemischt mit diesen verbrannt, wobei die Mischungsverhältnisse stark schwanken. An jedem

Messtag wurde eine Brennstoffprobe direkt aus der Brennstoffschnecke zum Heizkessel entnommen, und deren Wassergehalt bestimmt. Im Labor analysiert wurde die Brennstoffprobe mit dem geringsten Anteil an Holzpellets. Das Ergebnis der Brennstoffanalyse ist in Tabelle 5.6 aufgeführt. Der Wassergehalt der verfeuerten Brennstoffe schwankt nur gering zwischen 5,6 % und 7,1 %.

Tabelle 5.6 **Anlage 3 - Brennstoffproben: Wassergehalte der Brennstoffmischungen aus Holzpellets und Resthölzern sowie Ergebnisse der Laboranalysen**

Messdatum	16.02.2016	23.02.2016	01.03.2016	08.03.2016
Wassergehalt und Heizwert				
Wassergehalt in Massen-%	6,9	7,1	6,0	5,6
Heizwert in kJ/kg (Bezug: wasserfrei)	17.849			
Aschegehalt und Elementaranalyse (Angaben in Massen-%, Bezug: wasserfrei)				
Asche (O ₂ +550°C)	0,54			
Kohlenstoff (C)	49,5			
Wasserstoff (H)	6,2			
Stickstoff (N)	0,208			
Schwefel (S)	0,022			
Chlor (Cl)	0,011			
Ascheschmelzverhalten (Angaben in °C, Veraschungstemperatur: 550 °C)				
Sinterbeginn	710			
Erweichungstemperatur	1.420			
Halbkugeltemperatur	1.470			
Fließtemperatur	n.e.			
Aschehauptelemente (Angaben in Massen-%, Veraschungstemperatur: 550 °C)				
Aluminium (Al ₂ O ₃)	1,94			
Barium (BaO)	0,514			
Kalzium (CaO)	28,1			
Eisen (Fe ₂ O ₃)	0,478			
Kalium (K ₂ O)	17,9			
Magnesium (MgO)	8,00			
Mangan (MnO)	2,37			
Natrium (Na ₂ O)	1,50			
Phosphor (P ₂ O ₅)	3,91			
Schwefel (SO ₃)	1,72			
Silizium (SiO ₂)	3,55			
Strontium (SrO)	0,064			
Titan (TiO ₂)	0,326			

n.e. nicht erkennbar

Die Brennstoffprobe vom 16.02.2016 bestand im Wesentlichen aus feinen Hackschnitzeln guter Qualität mit einzelnen Holzpellets, am 23.02.2016 wurden Säge- und Hobelreste mit hohem Feinanteil, am 01.03.2016 nahezu reine Holzpellets und am 08.03.2016 wiederum eine Mischung aus feinen Hackschnitzeln und Hobelreste mit geringem Anteil an Holzpellets verfeuert.

5.1.4 Anlage 4 - Stückholzkessel

Der manuell beschickte Stückholzkessel mit einer Nennwärmeleistung von 47 kW wurde ab August 2014 in Betrieb genommen und wurde erstmals im November 2015 erfolgreich vom Schornsteinfeger nach einigen Änderungen in der Abgasführung abgenommen.

Die Reinigung des Kessels und eine Sichtprüfung erfolgt während der Heizperiode jeden Samstag durch eine Fachfirma. In der Tabelle 5.7 sind die wichtigsten Kennwerte der Anlage 4 zusammengefasst. Die Anlage dient zur Versorgung eines Gewerbebetriebs. In den Heizkreis ist ein Pufferspeicher mit einem Wasserinhalt von ca. 2,6 m³ integriert.

Tabelle 5.7 Kennwerte zu Anlage 4 - Stückholzkessel (Angaben von Typenschild und Betreiberinformationen) und Messstelle]

Hersteller	Hargassner GesmbH
Typ	MV 49
Baujahr	2013
Inbetriebnahme	ab August 2014
Anforderungen 1. BImSchV	Stufe 1: Staub 100 mg/m ³ , CO 1.000 mg/m ³
Nennwärmeleistung	47 kW
Brennstoffwärmeleistung	52,2 kW
Zulässiger Brennstoff	Stückholz bis 1,1 m Scheitlänge
Kesselklasse nach EN 303-5	5
Wasserinhalt	210 Liter
Max. Kesseltemperatur	+95 °C
Max. Betriebsdruck	3 bar
Abgasgeschwindigkeit Messstelle Staub	ca. 2 m/s
Abgastemperatur Messstelle Gase	ca. 171 °C
Unterdruck an der Messstelle	ca. -17 Pa bis +1 Pa (leichter Überdruck)

Messstrecke

In Abbildung 5.4 ist die Messstrecke der Anlage 4 dargestellt. Vom Gebläse bis zum ersten Bogen verläuft das Abgasrohr horizontal, danach folgt ein vertikales Stück bis zum zweiten Bogen. Anschließend verläuft das Abgasrohr wieder horizontal. Der Durchmesser des Abgasrohres beträgt 180 mm.

Die Messstellen MS 1 und MS 2 erfüllen die Anforderungen bezüglich den Ein- und Auslaufstrecken nicht. Bei der Messstelle MS 3 ist die Anforderung bezüglich der Auslaufstrecke von zwei hydraulischen Durchmessern erfüllt. Die Messstelle MS 4 erfüllt beide Anforderungen.

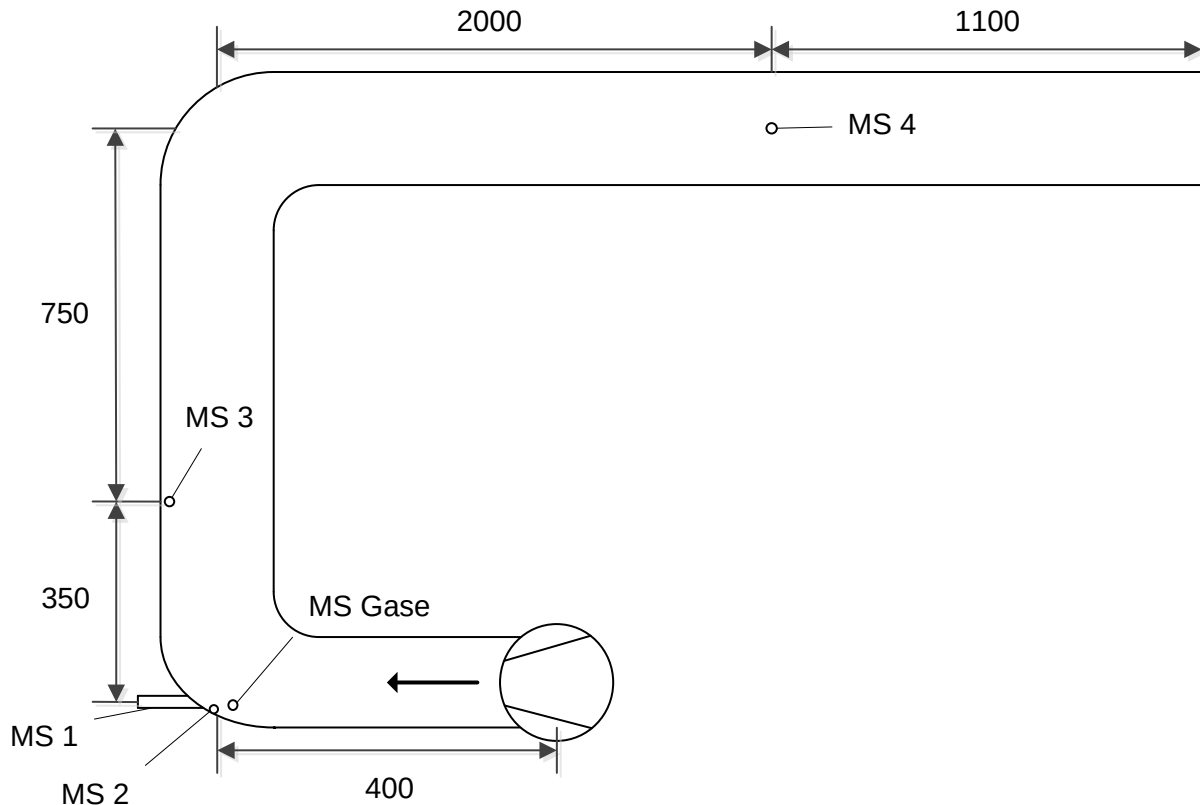


Abbildung 5.4 Schematische Darstellung der Messstrecke der Anlage 4 mit Messstellen MS für Gase und Staub (MS 1 bis MS 4); Längenangaben in mm

Die Messstelle MS 1 ist für die Messung mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub vorgesehen. Die Schornsteinfegermessgeräte werden an den Messstellen MS 2 bis MS 4 eingesetzt. Die Probenahme für die Gasmessungen mit dem Referenzmessgerät erfolgt an der Messstelle MS Gase.

Brennstoffproben

In der Anlage 4 wird stückiges Holz verfeuert. Die verfeuerten Holzscheite hatten ungefähr eine Länge von 800 mm, mit unterschiedlichen Durchmessern und Formen. Neben Baumschnitt wurden auch Resthölzer aus der Produktion und aus Verpackungen verheizt. Es wurden auch unterschiedliche Holzarten verwendet, neben heimischem Laub- und Nadelholz auch nicht europäische Arten. An dieser Anlage wurden insgesamt drei Brennstoffproben an den jeweiligen Messtagen entnommen und die Wassergehalte bestimmt. Eine Probe wurde im Labor analysiert, das Ergebnis der Brennstoffanalyse ist in Tabelle 5.8 aufgeführt.

Die Brennstoffprobe vom 16.02.2016 bestand überwiegend aus Buchenholz. Am 23.02.2016 wurde eine Mischung aus Nadel- und Buchenholz sowie nicht europäisches Hartholz und am 01.03.2016 wurde vorwiegend Buchen- und Nadelholz verfeuert.

Tabelle 5.8 **Anlage 4 - Brennstoffproben: Wassergehalte des Stückholzes und Ergebnis der Laboranalyse**

Messdatum	16.02.2016	23.02.2016	01.03.2016
Wassergehalt und Heizwert			
Wassergehalt in Massen-%	9,0	14,7	14,0
Heizwert in kJ/kg (Bezug: wasserfrei)		17.928	
Aschegehalt und Elementaranalyse (Angaben in Massen-%, Bezug: wasserfrei)			
Asche ($O_2+550^\circ C$)		0,58	
Kohlenstoff (C)		48,6	
Wasserstoff (H)		6,2	
Stickstoff (N)		0,188	
Schwefel (S)		0,025	
Chlor (Cl)		0,020	
Ascheschmelzverhalten (Angaben in $^\circ C$, Veraschungstemperatur: $550^\circ C$)			
Sinterbeginn		710	
Erweichungstemperatur		1.300	
Halbkugelttemperatur		1.400	
Fließtemperatur		1.410	
Aschehauptelemente (Angaben in Massen-%, Veraschungstemperatur: $550^\circ C$)			
Aluminium (Al_2O_3)		2,63	
Barium (BaO)		0,333	
Kalzium (CaO)		29,8	
Eisen (Fe_2O_3)		0,897	
Kalium (K_2O)		15,0	
Magnesium (MgO)		6,35	
Mangan (MnO)		3,41	
Natrium (Na_2O)		1,47	
Phosphor (P_2O_5)		3,75	
Schwefel (SO_3)		1,70	
Silizium (SiO_2)		4,53	
Strontium (SrO)		0,074	
Titan (TiO_2)		0,112	

n.e. nicht erkennbar

5.1.5 Messprogramm und Vorgehensweise

Bei den Feldmessungen wurden mit dem Referenzmessverfahren für Staub keine Doppelbestimmungen durchgeführt, sondern nur Messungen mit Staubaufbau 1 (siehe Abbildung 4.3)

vorgenommen. Außerdem wurden die Referenzmessgeräte für CO und O₂ eingesetzt. Zeitgleich wurden dann jeweils Messungen mit den zwei Schornsteinfegermessgeräten (Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM) durchgeführt. Wenn möglich, wurden die Messpositionen der Schornsteinfegermessgeräte getauscht, um ggf. einen Einfluss der Messstellen auf die ermittelten Staubkonzentrationen zu erkennen. Die Referenzmesswerte werden immer an den gleichen Messstellen ermittelt.

Die folgende Tabelle 5.9 gibt einen Überblick darüber, wann und wie viele Messungen an jeder der vier Anlagen durchgeführt wurden. Die Feldmesskampagne dauerte insgesamt vier Wochen. Dabei wurde, mit Ausnahme des Stückholzkessels, jede Anlage einmal in jeder Woche vermessen. Die Wiederholungsmessungen sollten einen Eindruck vermitteln, wie konstant sich die Anlagen im Betrieb verhalten.

Tabelle 5.9 Feldmessprogramm an den Anlagen 1 bis 4 (Messpositionen in Reihenfolge der Messungen, siehe auch Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.4)

Anlage	Messdatum	Anzahl der Messungen	Messpositionen	
			SM 500	FSM
Anlage 1 Hackschnitzelkessel	09.02.2016	3	MS 4 / 4 / 4	MS 5 / 5 / 5
	19.02.2016	3	MS 2 / 3 / 2	MS 3 / 2 / 3
	24.02.2016	3	MS 2 / 3 / 2	MS 3 / 2 / 3
	03.03.2016	3	MS 5 / 5 / 4	MS 4 / 4 / 5
Anlage 2 Pelletkessel 1	10.02.2016	2	MS 3 / 3	MS 2 / 2
	18.02.2016	3	MS 3 / 3 / 3	MS 2 / 2 / 2
	25.02.2016	2	MS 3 / 3	MS 2 / 2
	04.03.2015	3	MS 3 / 3 / 3	MS 2 / 2 / 2
Anlage 3 Pelletkessel 2	16.02.2016	2	MS 3 / 3	MS 2 / 2
	23.02.2016	2	MS 2 / 3	MS 3 / 2
	01.03.2016	1	MS 3	MS 2
	08.03.2016	3	MS 3 / 2 / 3	MS 2 / 3 / 2
Anlage 4 Stückholzkessel	16.02.2016	3	MS 3 / 3 / 3	MS 2 / 2 / 2
	23.02.2016	2	MS 3 / 2	MS 2 / 3
	01.03.2016	2	MS 3 / 2	MS 2 / 4
Summe		37		

Zusätzlich wurden noch Messungen zusammen mit dem zuständigen Schornsteinfeger und seinem Messgerät durchgeführt. Insgesamt waren zwei Schornsteinfeger an den Messungen beteiligt, die jeweils ein testo 380 von der Firma Testo AG als Messgerät verwendeten. Nach Möglichkeit wurden auch hier die Messpositionen nach jeder Messung getauscht. Hierbei musste aus Termin- und Platzgründen gänzlich auf die Referenzmessverfahren verzichtet werden, zeitgleich eingesetzt wurden das Wöhler SM 500 und das FSM.

Tabelle 5.10 gibt einen Überblick über das Messprogramm mit den Schornsteinfegern. Am Pelletkessel 1 (Anlage 2) waren ebenfalls zwei Messungen geplant, allerdings erfolgte aufgrund zu hoher Staubbelastung bei der ersten Messung ein Abbruch durch das testo 380. Die Anlage 4 (Stückholzkessel) wurde vom Schornsteinfeger aufgrund der extrem hohen Staub- und Teerkonzentrationen nicht vermessen. Zum einen wären keine neuen Erkenntnisse zu

erwarten gewesen und zum anderen sollte eine aufwändige Reinigung des Schornsteinfegeressgerätes vermieden werden.

Tabelle 5.10 Feldmessprogramm mit Schornsteinfegern

Anlage	Messdatum	Messgerät des Schornsteinfegers	Anzahl der Messungen
Anlage 1 Hackschnitzelkessel	11.03.2016	testo 380 Firma Testo AG	2
Anlage 2 Pelletkessel 1	11.03.2016	testo 380 Firma Testo AG	1
Anlage 3 Pelletkessel 2	17.03.2016	testo 380 Firma Testo AG	2

Die Vorgehensweise bei den Messungen orientierte sich an der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016). Bevor eine Messung gestartet wurde, sollte die Feuerungsanlage einen weitgehend stationären Zustand bei der maximal eingestellten Feuerungswärmeleistung erreichen. Anschließend erfolgt eine Kernstromsuche, um die Messposition im Abgasquerschnitt festzulegen. Bei den untersuchten Anlagen befand sich der Kernstrom jeweils in der Mitte des Abgasgasrohres.

Sowohl beim Referenzmessverfahren für Staub als auch bei den Schornsteinfegermessgeräten wird eine Dichtheitsprüfung durchgeführt. Die Schornsteinfegermessgeräte können danach aufheizen bzw. eine Stabilisierungsphase durchlaufen. Nach Abschluss der Aufheiz- bzw. der Stabilisierungsphase werden die Sonden der Schornsteinfegermessgeräte und des Standardreferenzmessverfahrens in das Rauchgasrohr eingeführt und in Strömungsrichtung ausgerichtet. Alle Schornsteinfegermessgeräte und das Standardreferenzmessverfahren werden gleichzeitig gestartet. Nach dem Ablauf der Messdauer von 15 Minuten werden die Sonden aus dem Rauchgasrohr entfernt. Die Sonde des Standardreferenzmessverfahrens wurde mit Spülflüssigkeit und destilliertem Wasser gespült.

Am Ende des Messtages wurden die Schornsteinfegermessgeräte gemäß der Anleitung sowie die Entnahmesonden und das Planfilterkopfggerät des Referenzmessverfahrens gründlich gereinigt.

Die Randbedingungen bei den Feldmessungen unterschieden sich vor allem in folgenden Punkten von den Prüfstandsmessungen:

- **Messstrecken:** Die Abgasrohre bei den installierten Anlagen verlaufen in der Regel nicht vertikal, sondern horizontal. Die Anforderungen bezüglich einer Einlauf- und Auslaufstrecke von fünf bzw. zwei hydraulischen Durchmessern werden nicht oder nur teilweise eingehalten.
- **Messstellen:** Die Messstellen befinden sich bei den Praxisanlagen oft kurz nach dem installierten Kesselgebläse am Anfang der Messstrecke. Da keine baulichen Veränderungen an der Abgasführung vorgenommen werden konnten, wurde das Standardreferenzmessverfahren für Staub an drei der vier Anlagen in Abgasrohrbögen eingesetzt.

- **Umgebungstemperaturen:** Drei der vier Anlagen befinden sich in engen Heizräumen, die sich durch die Wärmeverluste der laufenden Feuerungsanlagen schnell aufheizen. Die Kondensatabscheidung der Schornsteinfegermessgeräte hängt stark von der Umgebungstemperatur ab, da die Wärme des Probengases nur an die Umgebung abgegeben wird und keine extra Kühlung erfolgt.
- **Mechanische Belastungen:** Bedingt durch die Einbausituation und durch beengte Platzverhältnisse wurden die Sonden und auch die damit verbundenen Schläuche z.T. unter Spannung eingebaut werden. Das kann an Verbindungsstellen zu Undichtigkeiten führen, die bei der Dichtheitsprüfung nicht detektiert werden.
- **Transport der Messgeräte:** Während dem Transport der Messgeräte sind diese auch niedrigeren Umgebungstemperaturen ausgesetzt. Hierdurch werden längere Stabilisierungs- und Aufheizzeiten notwendig. Neben den Standardmessverfahren (vor allem die Messgeräte für O₂ und CO) betrifft dies auch das SM 500. In einigen wenigen Fällen führte dies zu überlangen Stabilisierungszeiten beim SM 500. In diesen Fällen wurde die Stabilisierungsphase von Hand abgebrochen und der Messzyklus wurde erneut gestartet.

5.2 Ergebnisse der Feldmessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Feldmessungen dargestellt. Zuerst erfolgt ein Überblick aller Messergebnisse für die einzelnen Messkomponenten Staub, O₂ und CO und dann eine detailliertere anlagenbezogene Diskussion. Abschließend werden die mit den Schornsteinfegern durchgeführten Vergleichsmessungen mit Schornsteinfegermessgeräten beschrieben.

An den vier installierten Feuerungsanlagen wurden insgesamt 37 Messungen (siehe Tabelle 5.9) durchgeführt. Aus unterschiedlichen Gründen liegen allerdings nicht bei allen Messgeräten (Referenz und Schornsteinfegergeräte) für alle Messkomponenten eine vollständige Anzahl an Ergebnissen vor, siehe Tabelle 5.11.

Bei Anlage 1 wurde eine Messung aufgrund einer zu hohen Messgerätedrift abgebrochen. Ursache war der Anfall von Wasserdampfkondensat in der Messzelle. Bei Anlage 2 wurde beim Feinstaubmessgerät FSM bei einer Messung beim Ausbau der beheizten Sonde mit Staubsammelfilter festgestellt, dass diese nicht mehr fest verschraubt war, so dass Undichtigkeiten vorhanden waren und bei einer Messung lag eine Störung beim CO-Sensor für hohe Konzentrationen vor. Bei Anlage 3 lag an einem Messtag ein Ausfall der Messwerterfassung für die Erfassung der Gaskonzentrationen (O₂ und CO) beim Referenzmessverfahren vor. Aufgrund extrem hoher Staubkonzentrationen wurde bei Anlage 4 (Stückholzkessel) eine Staubbmessung abgebrochen.

Tabelle 5.11 Anzahl fehlender Messwerte im Feldmessprogramm an den Anlagen 1 bis 4

Anlage	Messdatum	Anzahl fehlender Messwerte		
		Referenz	SM 500	FSM
Anlage 1 Hackschnitzelkessel	03.03.2016		1	
Anlage 2 Pelletkessel 1	18.02.2016			1
	04.03.2016			1
Anlage 3 Pelletkessel 2	16.02.2016	2 (Gase)		
Anlage 4 Stückholzkessel	16.02.2016	1	1	1

Bei den Feldmessungen konnte kein Einfluss der Messposition beim Referenzverfahren und bei den Schornsteinfegermessgeräten auf die gemessenen O₂-Konzentrationen festgestellt werden, weshalb Staub- und CO-Konzentrationen meist nur als unbezogene Messwerte dargestellt werden.

In Tabelle 8.1 bis Tabelle 8.4 im Anhang sind die Einzelergebnisse der Feldmessungen aufgeführt.

5.2.1 Staub-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten

Abbildung 5.5 zeigt die mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen unbezogenen Staubkonzentrationen in Abhängigkeit der Ergebnisse des Standardreferenzmessverfahrens. Mit eingezeichnet sind die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) geforderte erweiterte Messunsicherheit (im Bereich 10 bis 300 mg/m³ bezogen auf den Referenzmesswert, bei Werten < 10 bzw. > 300 mg/m³ bezogen auf den Bereichsendwert von 10 bzw. 300 mg/m³), wobei 95 % der Messwerte für jedes Schornsteinfegermessgerät in diesem Intervall liegen sollten.

Besonders auffällig sind die vier Messungen mit unbezogenen Staubkonzentrationen über 300 mg/m³, die alle an der Anlage 4 - Stückholzkessel durchgeführt wurden. Diese Ergebnisse sollen in die weiteren Betrachtungen nicht mit eingehen, da diese außerhalb der bekannten Messbereiche der Schornsteinfegermessgeräte liegen. Dies wäre allerdings noch keine alleinige Erklärung für die schlechte Übereinstimmung von Referenzverfahren und Schornsteinfegermessgeräten. Wesentliche Ursache hierfür sind vielmehr die extrem hohen Teergehalte im Abgas des Stückholzkessels bei diesen hohen Staubkonzentrationen.

Hohe Teerkonzentrationen im Abgas verursachen stark anhaftende Beläge in den Staubsonden, deren Masse u.a. auch stark von den Randbedingungen in der Sonde (z.B. örtliche Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsprofil) und der aktuellen Teerzusammensetzung abhängen. D.h. die Masse der abgelagerten Beläge kann sich im Verhältnis zum Staub der auf den Filtern gesammelt wird, gegenüber den Verhältnissen mit geringen Teeranteilen im Abgas, stark verändern. Die teerhaltigen Beläge lassen sich beim Referenzverfahren auch nur teilweise durch Spülung entfernen. Hierdurch ergeben sich auch beim Referenzmessverfahren größere Schwankungsbreiten und damit größere Unsicherheiten.

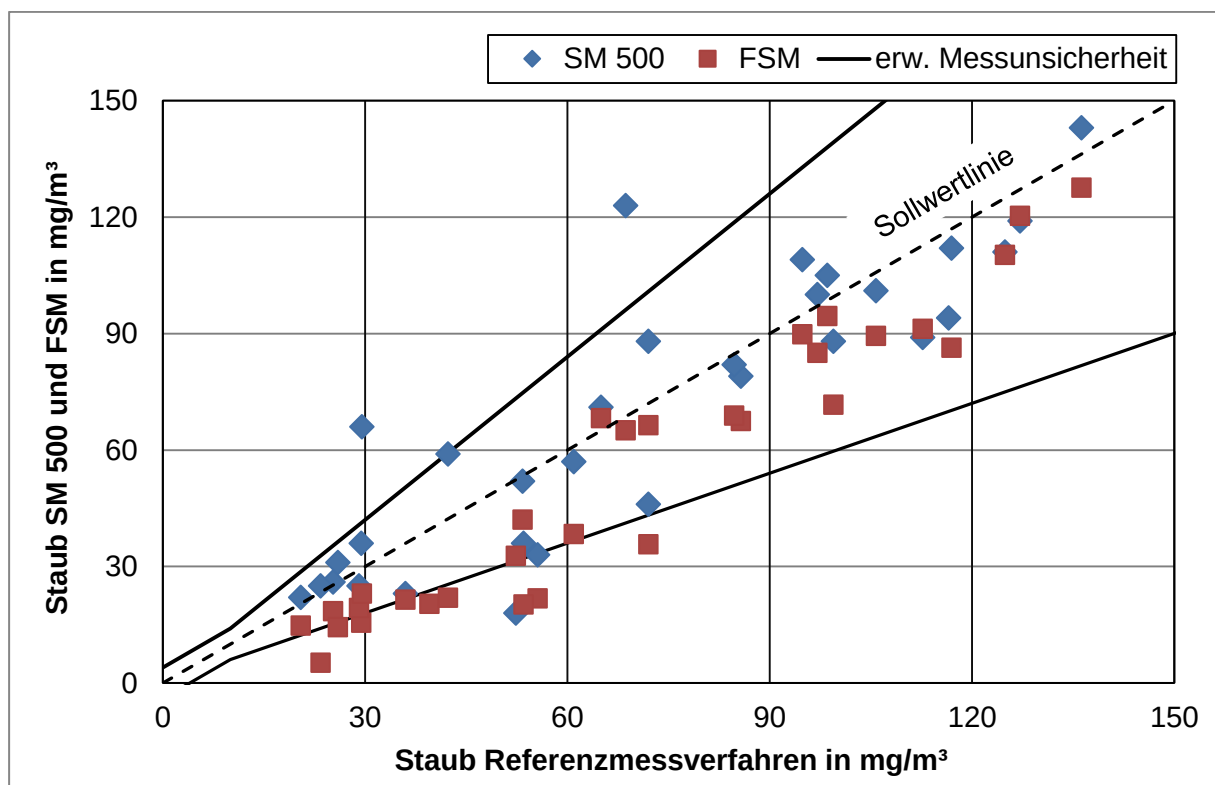
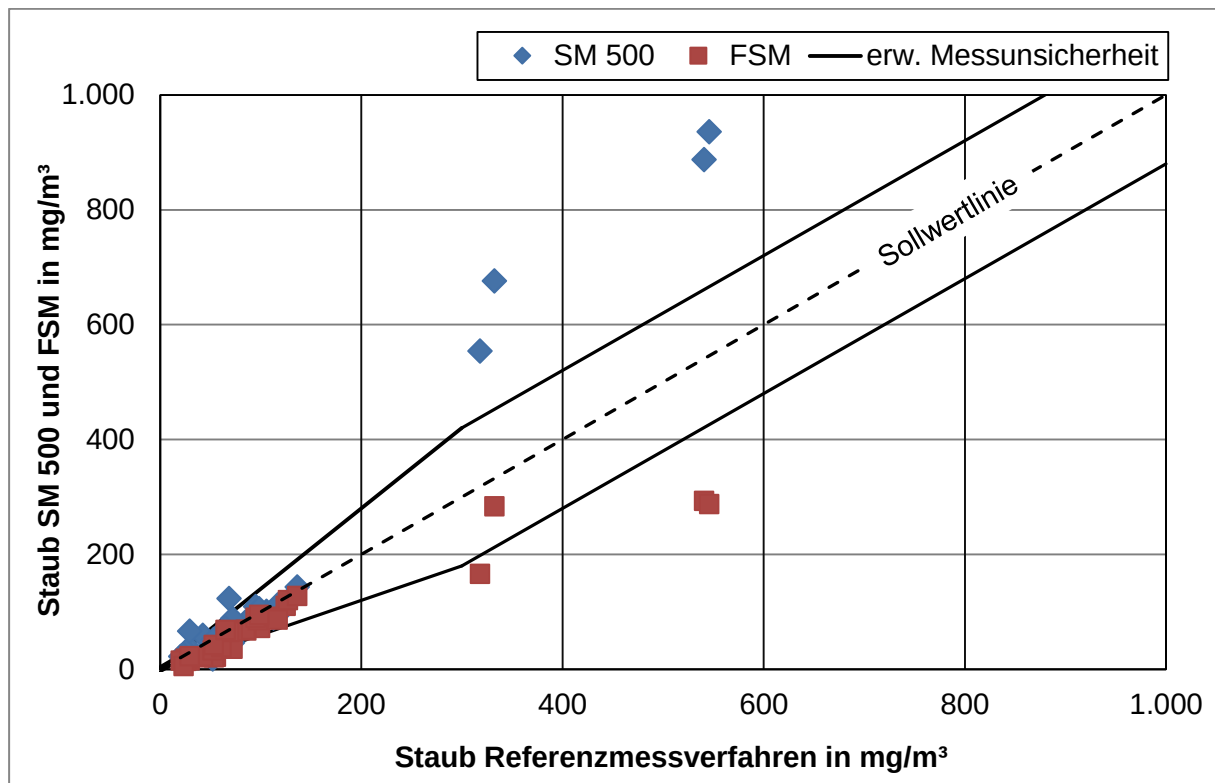


Abbildung 5.5 Feldmessungen - Staubkonzentrationen (unbezogen) des Referenzmessverfahrens im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an erweiterte Messunsicherheit von $\pm 40\%$)
oben: alle Messwerte unten: Messwerte $\leq 150 \text{ mg/m}^3$

Des Weiteren hängt die auf den Staubfiltern gesammelte Staubmasse bei diesen Stäuben auch von der Filtertemperatur ab. Je tiefer diese liegt, desto mehr organische Verbindungen in Form von z.B. Teeren lagern sich als Partikel ab. Bei höheren Filtertemperaturen kann ein gewisser Anteil dieser Verbindungen den Filter gasförmig passieren.

So lag beim Referenzmessverfahren die Filtrationstemperatur aufgrund der hohen Abgas-temperaturen (im Mittel 171 °C) bei im Mittel 101 °C. Beim SM 500 liegt die Filtrationstemperatur bei ca. 70 bis 75 °C. Dies könnte eine wesentliche Ursache für die Mehrbefunde beim SM 500 gegenüber dem Referenzmessverfahren sein. Außerdem wird davon ausgegangen, dass beim SM 500 im beheizten Probenahmeschlauch bis zum Wiegemodul nur relativ geringere Ablagerungen auftreten, da die Probenahmesonde elektrisch deutlich über 75 °C beheizt wurde und die Strömungsgeschwindigkeit bis zum Wiegemodul sehr hoch ist.

Die Ursache der Minderbefunde im Vergleich zum Referenzmessverfahren beim Feinstaubmessgerät FSM wird vor allem in verstärkten Ablagerungen in der Entnahmesonde vor der Filterhülse gesehen. Die Filterhülse wird elektrisch auf ca. 70 °C beheizt, das Sondenrohr wird nicht beheizt (siehe Abbildung 3.3).

Bei den verbleibenden 32 Ergebnissen für die Staubkonzentration mit Werten $< 300 \text{ mg/m}^3$ für die Feldmessungen je Schornsteinfegermessgerät dürfen rechnerisch 1,55 (5 %) außerhalb des Intervalls für die maximale erweiterte Messunsicherheit liegen. Allerdings sind besondere Randbedingungen zu berücksichtigen: beim SM 500 die Messposition bei Anlage 3 und beim Feinstaubmessgerät FSM die Messungen nach Elektrofilter bei Anlage 1 (genaue Begründung siehe bei detaillierter Beschreibung der Anlagenergebnisse). Werden die betreffenden Messwerte bei dieser Bewertung nicht berücksichtigt, dann liegen bei keinem Schornsteinfegermessgerät Messwerte außerhalb der Anforderungen an die erweiterte Messunsicherheit.

Insgesamt streuen die Messwerte des SM 500 relativ gleichmäßig um die Sollwertlinie und beim FSM liegen diese in der Tendenz eher unterhalb der Sollwertlinie. Somit zeigt sich bei den Feldmessungen im Vergleich zu den Prüfstandsmessungen (siehe Abbildung 4.4) im Grundsatz dasselbe Verhalten der Schornsteinfegermessgeräte in Bezug auf die Ergebnisse des Referenzmessverfahrens und auch im Verhältnis zueinander. Beim Feinstaubmessgerät FSM, welches in der Tendenz etwas zu geringe Staubkonzentrationen im Vergleich zum Referenzmessverfahren ausgibt (die Abweichungen liegen aber meist noch im zulässigen Bereich), könnte dies an Staubablagerungen in der Sonde vor dem Filter liegen, die damit bei der Filterwägung nicht erfasst werden.

Abbildung 5.6 zeigt für die einzelnen Tage der Feldmessungen die absoluten Differenzen der Staubkonzentrationen zwischen dem Referenzmessverfahren und den Schornsteinfegermessgeräten. Die höchsten absoluten Differenzen treten bei den Messungen an Anlage 4 (Stückholzkessel) auf.

Für das SM 500 beträgt der Mittelwert der Differenzen für alle Staubmessungen bei den Felduntersuchungen 36 mg/m^3 und für alle Messwerte $< 300 \text{ mg/m}^3$ (unbezogen, Referenzmessverfahren) lediglich noch -1 mg/m^3 . Beim FSM 500 liegt der Mittelwert der Differenzen für alle Staubmessungen bei -34 mg/m^3 und für alle Messwerte $< 300 \text{ mg/m}^3$ (unbezogen, Referenzmessverfahren) lediglich noch -15 mg/m^3 .

Werden die relativen Differenzen (absolute Differenz bezogen auf Messwert des Referenzmessverfahrens) betrachtet, dann ergibt sich für alle Messwerte $< 300 \text{ mg/m}^3$ (unbezogen, Referenzmessverfahren) für das SM 500 eine mittlere Abweichung von 1 % und für das Feinstaubmessgerät FSM von - 28 % und - 16 % ohne Berücksichtigung der Messwerte von Anlage 1.

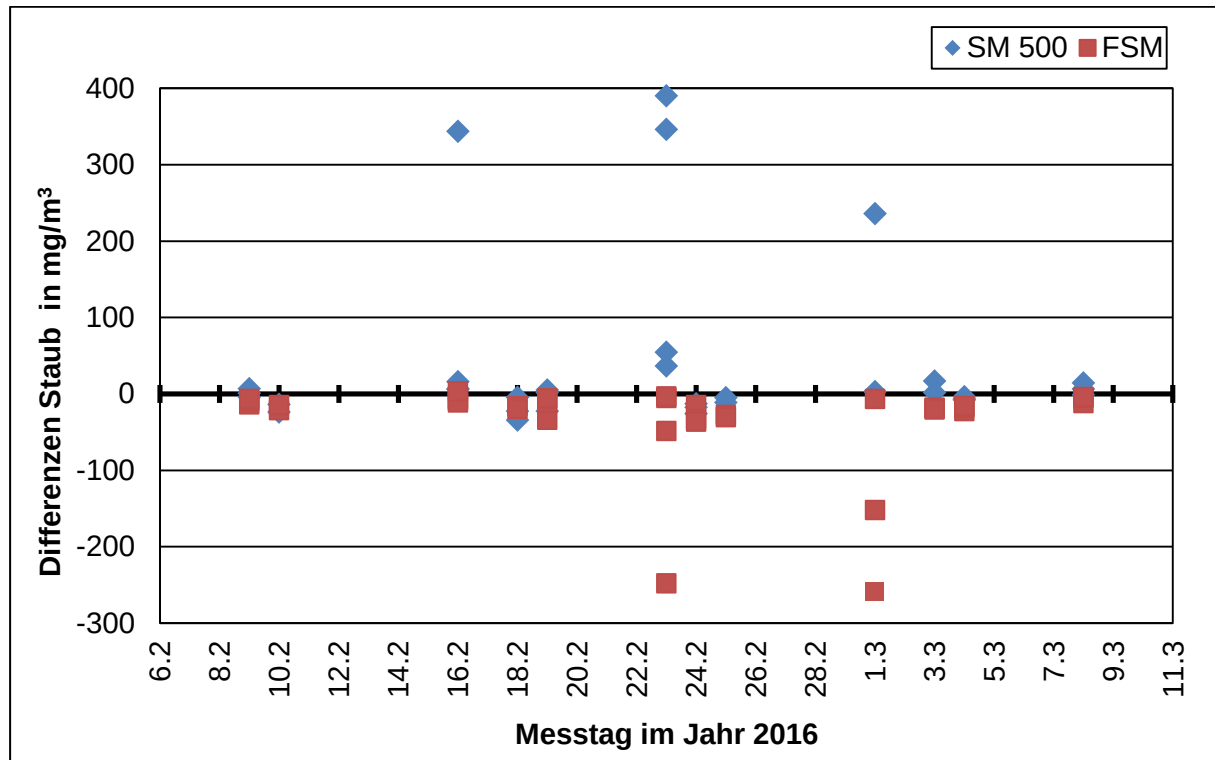


Abbildung 5.6 Feldmessungen - absolute Differenzen der unbezogenen Staubkonzentrationen des Referenzmessverfahrens zum Wöhler SM 500 und zum Feinstaubmessgerät FSM für die unterschiedlichen Messtage

Die entsprechend der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) berechneten erweiterten Messunsicherheiten für die beiden Schornsteinfegermessgeräte für die Grenzwertklasse GW 0,10 g/m^3 für die Ergebnisse der Feldmessungen ist in Tabelle 5.12 dargestellt. Bei der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit wurden alle unbezogenen Messwerte für Staub im Bereich 50 bis 150 mg/m^3 mit einigen Ausnahmen (SM 500: ein Messwert bei Anlage 3; FSM: ohne Messwerte der Anlage 1) herangezogen. Für das Wöhler SM 500 ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit von rund 31 % und für das Feinstaub-Messgerät FSM von rund 37 %. In der Eignungsprüfung der beiden Messgeräte wurde beim Wöhler SM 500 ein Wert von 30 % und beim FSM von 25 % für diese Grenzwertklasse ermittelt (siehe Tabelle 2.2).

Somit werden die Ergebnisse der Eignungsprüfung in den Feldmessungen für das SM 500 nahezu erreicht, beim FSM liegt der Wert für die erweiterte Messunsicherheit bei den Feldmessungen höher, es werden aber immer noch die Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) eingehalten. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass in der Eignungsprüfung die erweiterte Messunsicherheit mit Bezug auf den Grenzwert und hier mit Bezug auf den Mittelwert der Messungen berechnet wurde, wodurch sich für die Feldmessungen eine etwas erhöhte erweiterte Messunsicherheit ergibt.

Tabelle 5.12 Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für Staub der Grenzwertklasse 0,10 g/m³ für die beiden Schornsteinfegermessgeräte (mit Messwerten im Bereich von 50 bis 150 mg/m³ beim Standardreferenzmessverfahren)

erweiterte Messunsicherheit für Staub in der Grenzwertklasse 0,10 g/m ³ (Feldmessungen)	Wöhler SM 500	Feinstaubmessgerät FSM
Anzahl der Messungen (Anzahl N)	20	18
Mittelwert der Messungen für GW 0,10 g/m ³	91,7 mg/m ³	92,0 mg/m ³
Messunsicherheit $u_{SM\ 500\ bzw.\ FSM}$	13,5 mg/m ³	16,0 mg/m ³
Erweiterungsfaktor *	2,086	2,101
erweiterte Messunsicherheit $U_{SM500\ bzw.\ FSM}^{**}$	30,8 %	36,6 %

* zweiseitiger Studentfaktor für Anzahl N der Freiheitsgrade und Sicherheit von 95%

** Bezug: Mittelwert der Messungen

5.2.2 O₂-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten

In Abbildung 5.7 sind die bei den Feldmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen O₂-Konzentrationen in Abhängigkeit der O₂-Konzentration des Referenzmessgerätes dargestellt. Die durchgezogenen Linien markieren den Bereich der zulässigen erweiterten Messunsicherheit von $\pm 0,5$ Vol.-% nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010), 95 % der Messwerte sollten in diesem Bereich liegen. Es liegt keine Messung außerhalb der zulässigen erweiterten Messunsicherheit.

Die meisten Messwerte liegen im Bereich von knapp 6 Vol.-% bis etwas über 9 Vol.-%. Eine Messung bei Anlage 4 (Stückholzkessel) fand im Ausbrand statt, hier wurde eine O₂-Konzentration von über 15 Vol.-% gemessen. Die höchste O₂-Konzentration von über 17 Vol.-% wurde bei Anlage 2 gemessen, hier hatte sich der Pelletkessel während der Messung abgeschaltet.

Die zugelassene Messwertabweichung von $\pm 0,3$ Vol.-% wird beim SM 500 nicht und beim FSM nur in einem Fall bei einer Messung an Anlage 2 überschritten, wobei hier eine leichte Undichtigkeit vermutet wird, durch eine nicht fest genug verschraubte Staubsonde.

In Abbildung 5.8 sind für die einzelnen Tage der Feldmessungen die relativen Differenzen der O₂-Konzentrationen zwischen dem Referenzmessverfahren und den Schornsteinfegermessgeräten dargestellt.

Für das SM 500 beträgt der Mittelwert der relativen Differenzen für alle O₂-Messungen bei den Felduntersuchungen 1,2 % und für das FSM 1,4 %. Werden die absoluten Differenzen betrachtet, dann ergibt sich für alle Messwerte für das SM 500 und für das FSM eine mittlere Abweichung von 0,1 Vol.-% gegenüber dem Referenzmessgerät.

In Tabelle 5.13 sind die berechneten erweiterten Messunsicherheiten für die mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen O₂-Konzentrationen zusammengefasst. Für die Berechnung wurden alle vorliegenden Messwerte verwendet, mit Ausnahme der in Tabelle 5.11 aufgeführten fehlenden Werte, wodurch sich jeweils 33 Messwertpaare (Referenz und jeweiliges Schornsteinfegermessgerät) ergeben.

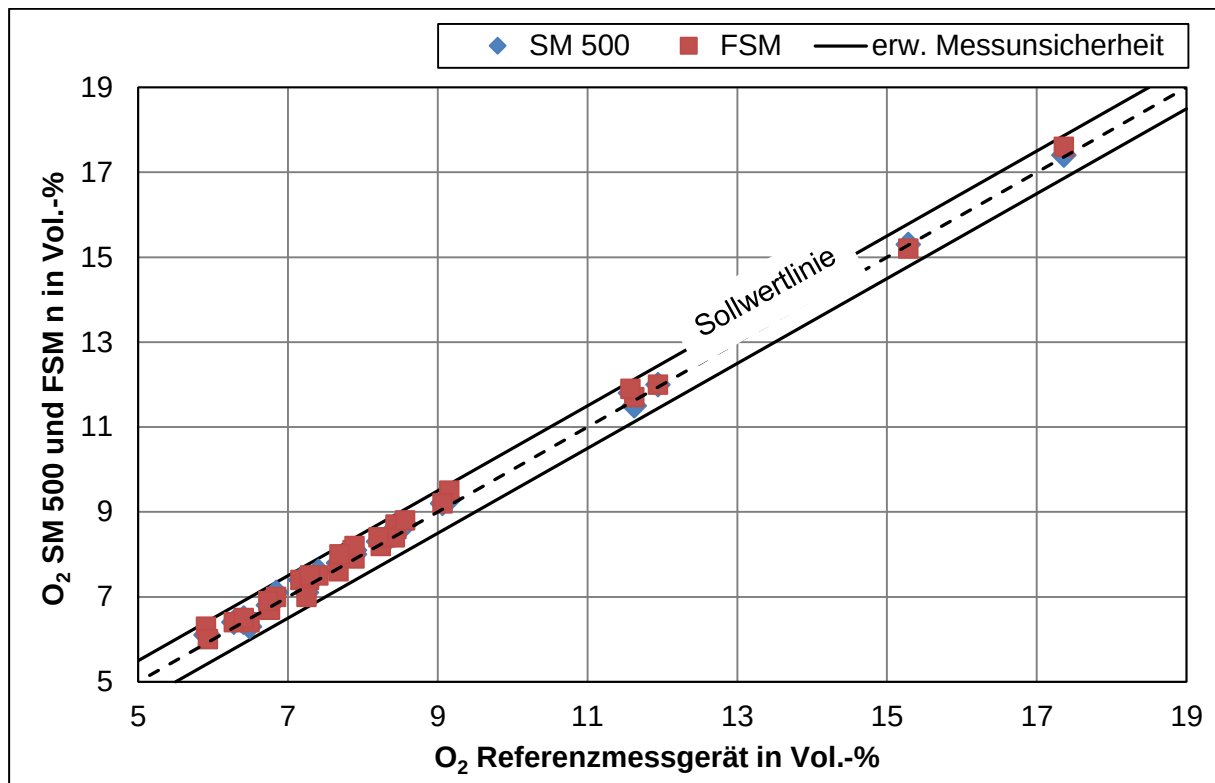


Abbildung 5.7 Feldmessungen - O₂-Konzentrationen des Referenzmessgerätes im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit von $\pm 0,5$ Vol.-%)

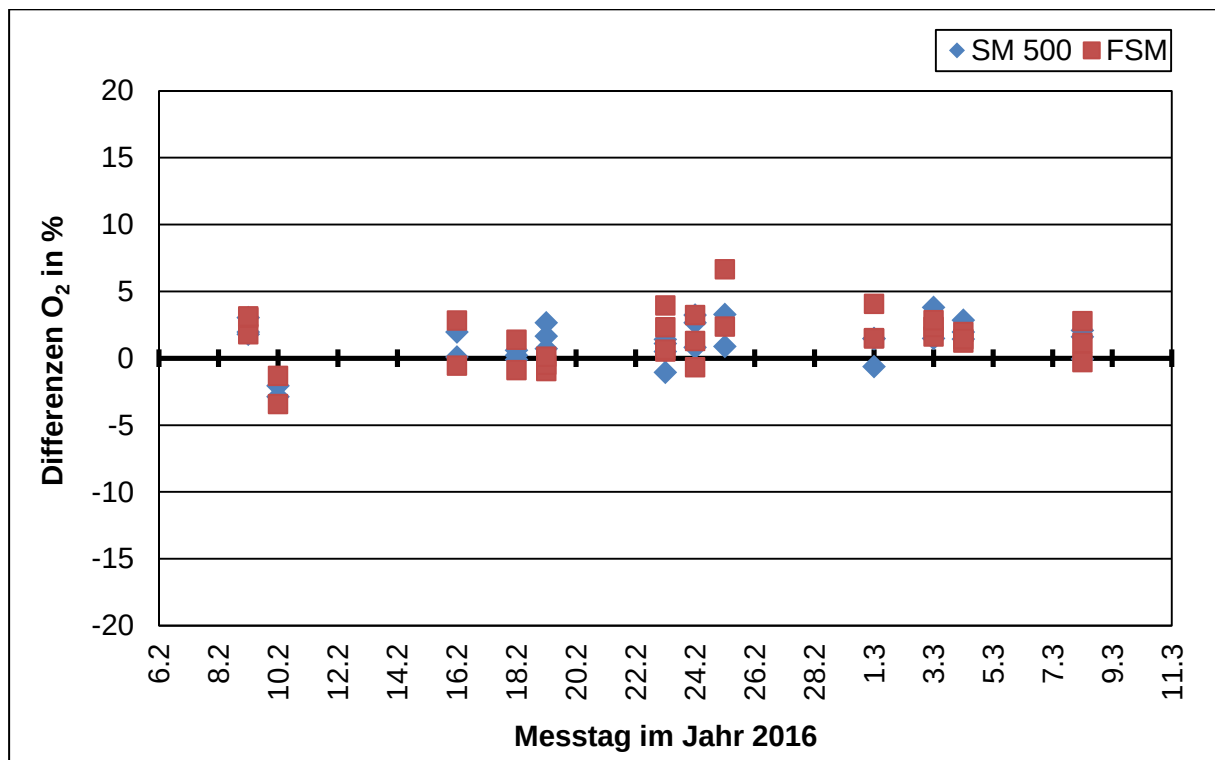


Abbildung 5.8 Feldmessungen - relative Differenzen der O₂-Konzentrationen des Referenzmessgerätes zum Wöhler SM 500 und zum Feinstaubmessgerät FSM für die unterschiedlichen Messtage

In der Tendenz liegen die von den Schornsteinfegermessgeräten bei den Feldmessungen ermittelte O₂-Konzentrationen etwas zu hoch. Die berechneten erweiterten Messunsicherheiten sind für beide Schornsteinfegermessgeräte geringer als nach der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) zulässig.

Tabelle 5.13 Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für O₂ für die beiden Schornsteinfegermessgerät

erweiterte Messunsicherheit für O ₂ (Feldmessungen)	Wöhler SM 500	Feinstaubmessgerät FSM
Anzahl der Messungen (Anzahl N)	33	33
Mittelwert der Messungen *	8,5 Vol.-%	8,5 Vol.-%
Messunsicherheit $u_{SM\ 500\ bzw.\ FSM}$	0,14 Vol.-%	0,19 Vol.-%
Erweiterungsfaktor **	2,042	2,042
erweiterte Messunsicherheit $U_{SM500\ bzw.\ FSM}$	0,3 Vol.-%	0,4 Vol.-%

* Mittelwert des Referenzmessgerätes für N = 33: jeweils 8,4 Vol.-%

** zweiseitiger Studentfaktor für Anzahl N der Freiheitsgrade und Sicherheit von 95%

5.2.3 CO-Vergleichsmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten

Die Abbildung 5.9 zeigt die mit dem Referenzverfahren und mit den Schornsteinfegermessgeräten bei den Feldmessungen gemessenen CO-Konzentrationen. Mit eingezeichnet sind ebenfalls die Linien der nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) geforderten erweiterten Messunsicherheit von 20 % (im Bereich von 150 bis 8.000 mg/m³ bezogen auf den Referenzmesswert, bei Werten < 150 bzw. > 8.000 mg/m³ bezogen auf den Bereichsendwert von 150 bzw. 8.000 mg/m³). Im umfassten Bereich sollten sich jeweils 95 % der Messungen befinden. Dies trifft bei Messwerten bis 4.000 mg/m³ für beide Messgeräte auch zu.

Abbildung 5.10 zeigt für die einzelnen Tage der Feldmessungen die absoluten Differenzen der CO-Konzentrationen zwischen dem Referenzmessgerät und den Schornsteinfegermessgeräten. Die höchsten absoluten Differenzen treten bei den Messungen an Anlage 4 (Stückholzkessel) auf.

Für das SM 500 beträgt der Mittelwert der Differenzen für alle CO-Messungen bei den Felduntersuchungen 474 mg/m³ und für alle Messwerte bei den Anlagen 1 bis 3 noch 81 mg/m³. Beim FSM 500 liegt der Mittelwert der Differenzen für alle CO-Messungen bei 305 mg/m³ und für alle Messwerte der Anlagen 1 bis 3 bei 67 mg/m³.

Werden die relativen Differenzen (absolute Differenz bezogen auf Messwert des Referenzmessverfahrens) betrachtet, dann ergibt sich für alle Messwerte > 100 mg/m³ bei den Anlagen 1 bis 3 für das SM 500 eine mittlere Abweichung von - 1 % und für das Feinstaubmessgerät FSM für alle Messwerte der Anlagen 1 bis 3 von 13 %.

Bei den CO-Messungen sind die Ergebnisse bei Anlage 4 (Stückholzkessel) ebenfalls auffällig. Die Messwerte oberhalb von 6.000 mg/m³ weisen z.T. größere Abweichungen zwischen Referenz- und Schornsteinfegermessgeräten auf. Liegen die Messwerte der Schornsteinfegermessgeräte außerhalb der Linien für die erweiterte Messunsicherheit, dann wird von den Schornsteinfegermessgeräten immer ein zu hoher Messwert angezeigt.

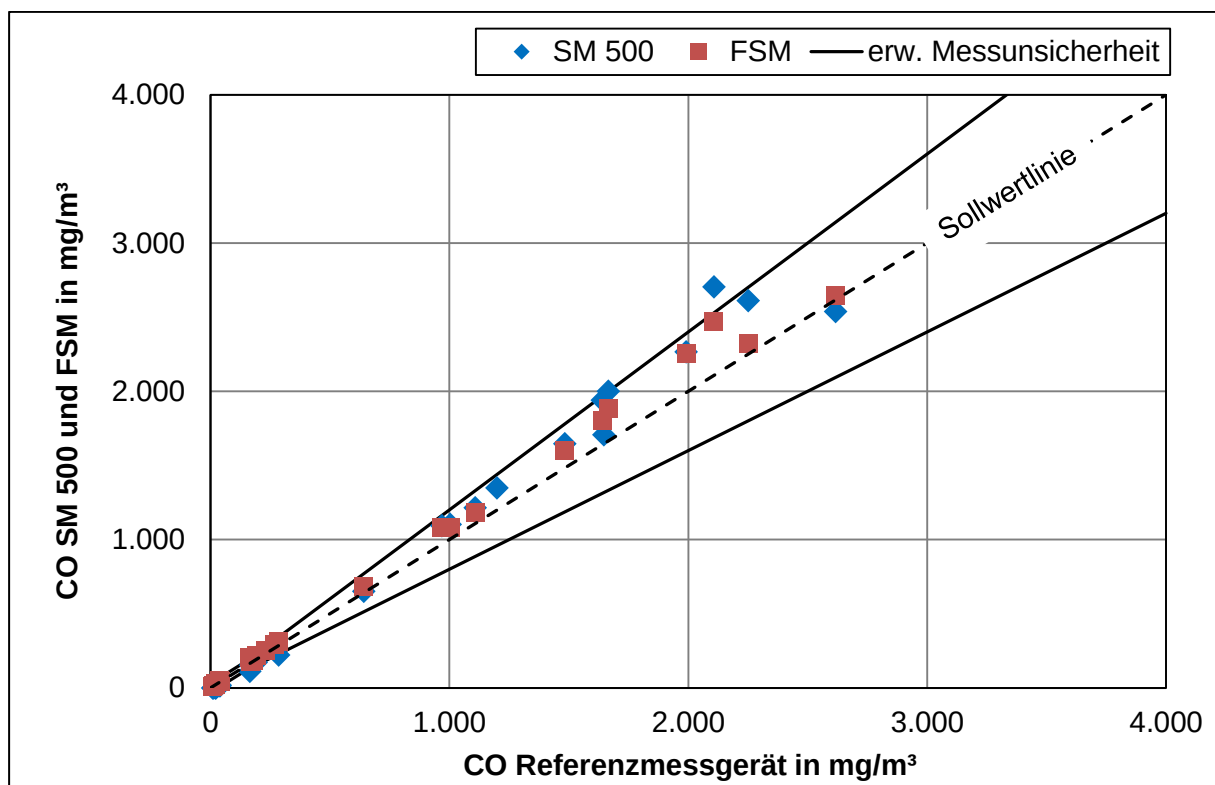
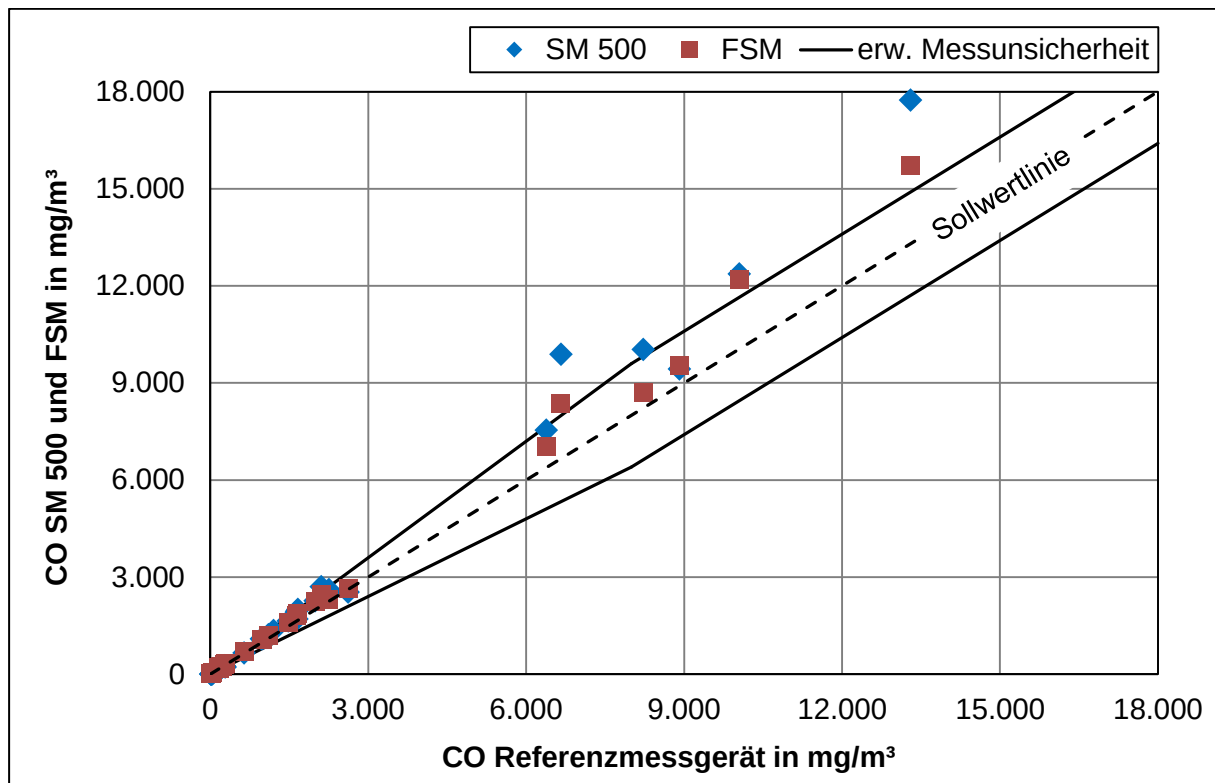


Abbildung 5.9: Feldmessungen - CO-Konzentrationen (unbezogen) des Referenzmessgerätes im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit von $\pm 20\%$)
oben: alle Messwerte unten: Messwerte $\leq 4.000 \text{ mg/m}^3$

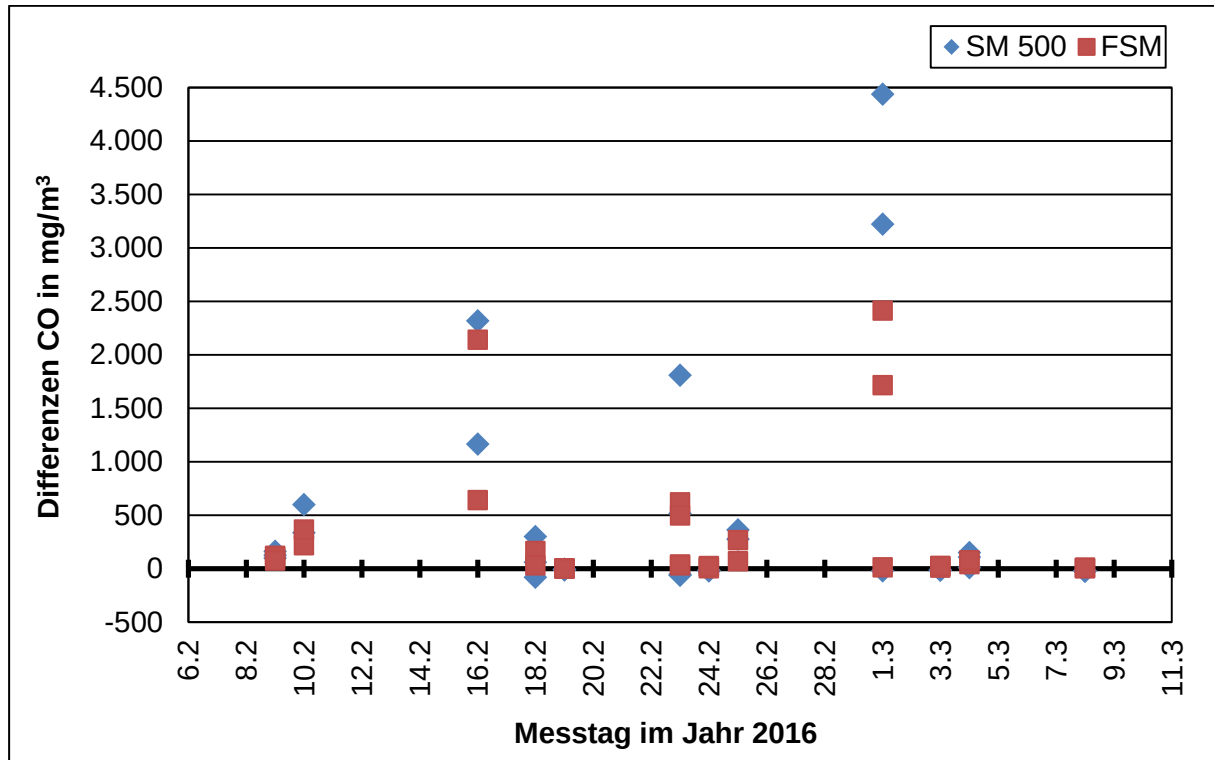


Abbildung 5.10 Feldmessungen - absolute Differenzen der unbezogenen CO-Konzentrationen des Referenzmessverfahrens zum Wöhler SM 500 und zum Feinstaubmessgerät FSM für die unterschiedlichen Messtage

Die Unterschiede zwischen den beiden Schornsteinfegermessgeräten sind hierbei in 2 von 3 Fällen relativ gering. Als Ursache für die zu hohen Messwertanzeigen bei den Schornsteinfegermessgeräten wird eine Querempfindlichkeit zu Wasserstoff vermutet. Dieser könnte bei sehr ungünstigen Verbrennungsbedingungen und damit hohen CO-Konzentrationen in unterschiedlichen Konzentrationen im Abgas vorliegen.

Die entsprechend der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) berechneten erweiterten Messunsicherheiten für die beiden Schornsteinfegermessgeräte für die Grenzwertklasse GW 1 g/m³ für die Ergebnisse der Feldmessungen ist in Tabelle 5.14 dargestellt. Bei der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit wurden alle unbezogenen Messwerte für CO im Bereich 500 bis 1.500 mg/m³ herangezogen. Messwerte in dieser Grenzwertklasse liegen nur für die Anlage 1 (Hackschnitzelkessel) und Anlage 2 (Pelletkessel 1) vor. Für das Wöhler SM 500 ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit von rund 27 % und für das Feinstaub-Messgerät FSM von rund 22 %, womit beide Messgeräte außerhalb der Anforderung von 20 % der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) liegen. Bei der Bewertung ist die vergleichsweise geringe Anzahl an Messergebnissen in der betrachteten Grenzwertklasse zu berücksichtigen.

Ein Vergleich zwischen den CO-Messergebnissen (alle Messwerte ≤ 800 mg/m³) der Feld- und Prüfstandsmessungen ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Da im Messgerät SM 500 nur ein CO-Sensor für hohe Konzentrationen eingebaut war, können sehr geringe CO-Konzentrationen von unter 100 mg/m³ nicht exakt gemessen werden, die Messwerte sind aber trotzdem dargestellt. Bei den beiden Schornsteinfegermessgeräten ist jeweils zwischen den Feld- und Prüfstandsergebnissen kein unterschiedliches Verhalten zu erkennen.

Tabelle 5.14 Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für CO der Grenzwertklasse 1 g/m³ für die beiden Schornsteinfegermessgeräte (mit Messwerten im Bereich von 500 bis 1.500 mg/m³ beim Referenzmessverfahren)

erweiterte Messunsicherheit für CO in der Grenzwertklasse 1 g/m ³ (Feldmessungen)	Wöhler SM 500	Feinstaubmessgerät FSM
Anzahl der Messungen (Anzahl N)	6	5
Mittelwert der Messungen **	1.068 mg/m ³	1.041 mg/m ³
Messunsicherheit $u_{SM\ 500\ bzw.\ FSM}$	119 mg/m ³	90 mg/m ³
Erweiterungsfaktor *	2,447	2,571
erweiterte Messunsicherheit $U_{SM500\ bzw.\ FSM}$	27 %	22 %

* zweiseitiger Studentfaktor für Anzahl N der Freiheitsgrade und Sicherheit von 95%

** Bezug auf Mittelwert des Referenzmessgerätes. Für Wöhler SM 500: 1.176 mg/m³ und für FSM: 1.126 mg/m³

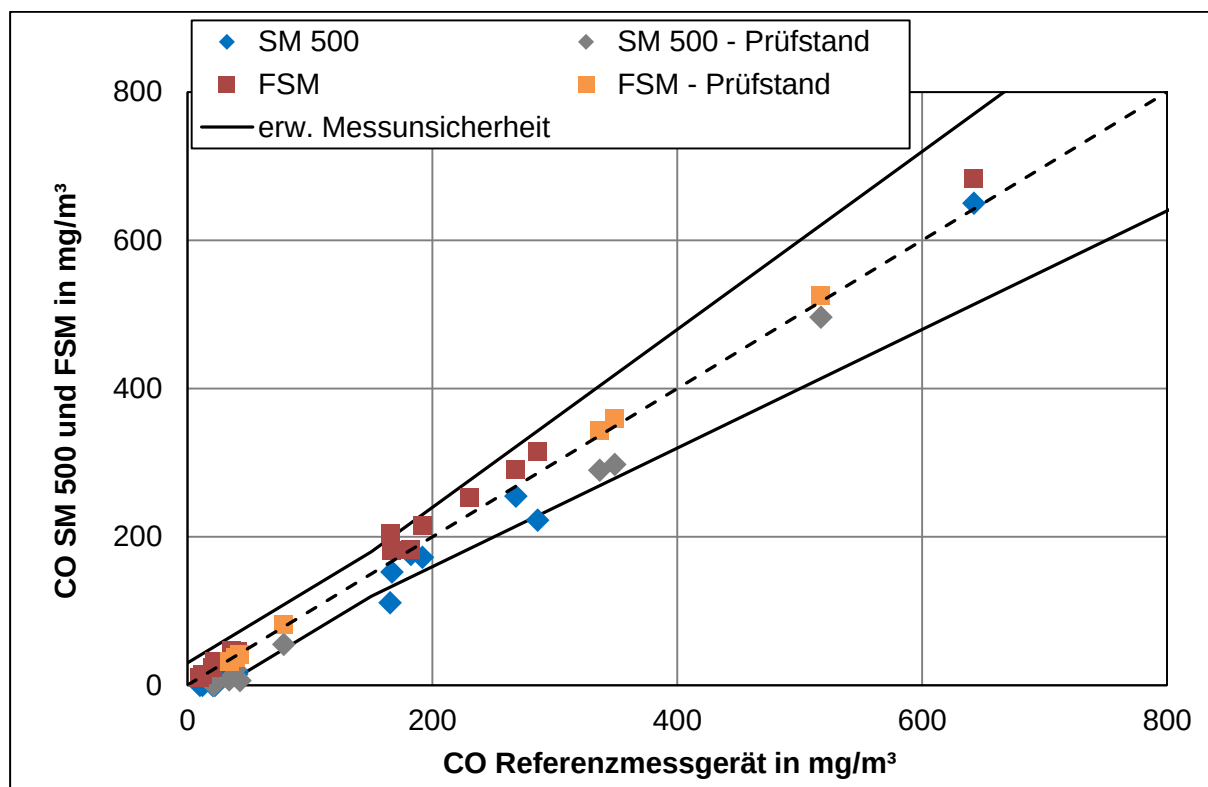


Abbildung 5.11 Vergleich der CO-Konzentrationen (unbezogen) des Referenzmessgerätes im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM für die Feld- und Prüfstandsmessungen (alle Messwerte ≤ 800 mg/m³, mit angegeben: Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit von ± 20 %)

5.2.4 Vergleichsmessungen an Anlage 1 - Hackschnitzelkessel

In Abbildung 5.12 sind die an der Anlage 1 mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen unbezogenen Staubkonzentrationen in Abhängigkeit der Ergebnisse des Standardrefe-

renzmessverfahrens gezeigt. Mit eingezeichnet sind die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) geforderte erweiterte Messunsicherheit. Auffällig sind die deutlichen Minderbefunde beim Feinstaub-Messgerät FSM und die größere Streuung der Messwerte beim Wöhler SM 500 bei Staubkonzentrationen über 30 mg/m³.

Der Hackschnitzelkessel ist mit einem Elektrofilter ausgerüstet, die Messstrecke befand sich ca. 1,8 m nach dem Filter. Unmittelbar am Elektrofilterausgang ist ein Saugzuggebläse installiert. Der im Abgas nach Elektrofilter enthaltene Staub bestand, nach einer visuellen Bewertung der auf den Planfiltern abgeschiedenen Stäube, aus verhältnismäßig groben aggregierten Partikeln mit einer geringen elektrischen Ladung, was aus den Ablagerungen auf der Entnahmesonde geschlossen werden kann (siehe Abbildung 5.13.).

Beim Feinstaub-Messgerät FSM wird das Abgas senkrecht zur Strömungsrichtung mit einer an der Spitze abgeschrägten Sonde entnommen (siehe Abbildung 3.3). Liegen im Abgas überwiegend feine Partikel vor (aerodynamische Partikeldurchmesser < 2,5 µm), die der Gasströmung gut folgen können, ist der Einfluss der Absaugbedingungen (Absaugrichtung und Absauggeschwindigkeit) deutlich geringer als bei gröberen Partikeln (aerodynamische Partikeldurchmesser > 10 µm).

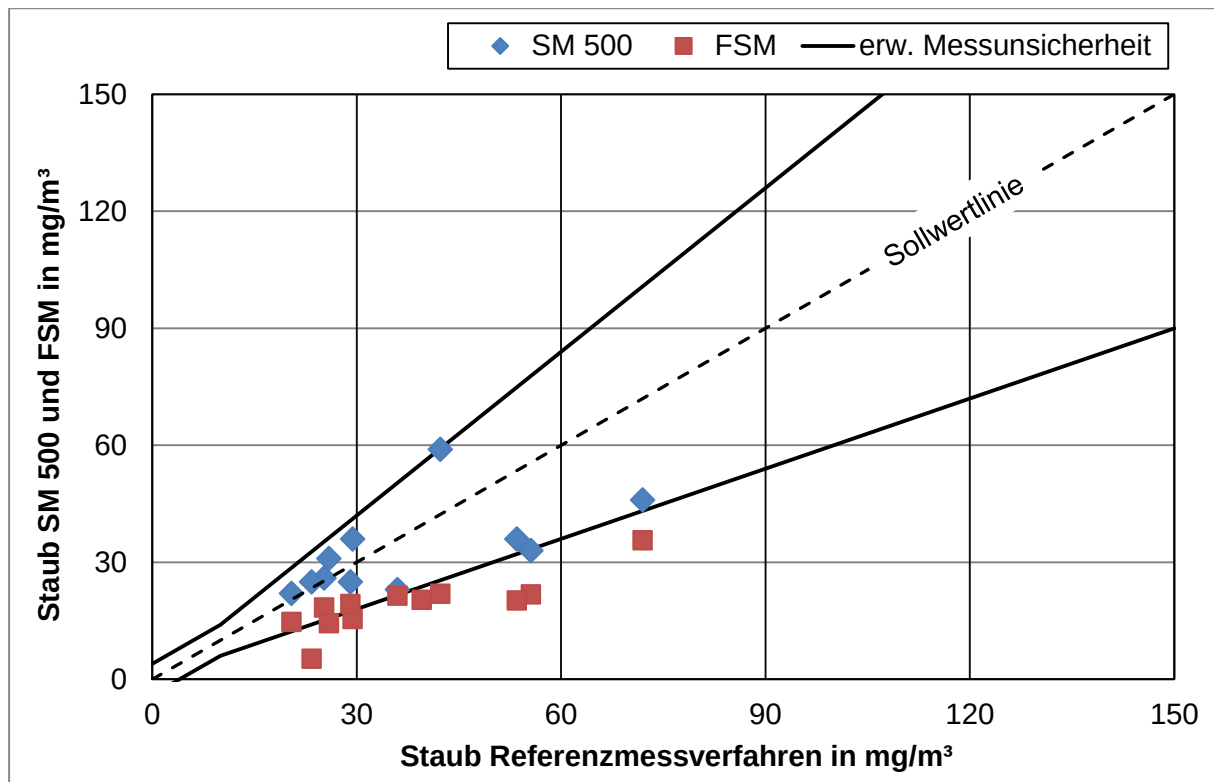


Abbildung 5.12 Feldmessungen Anlage 1 - Staubkonzentrationen (unbezogen) des Referenzmessverfahrens im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an erweiterte Messunsicherheit von $\pm 40\%$)



Abbildung 5.13 Feldmessungen Anlage 1- Referenzmessverfahren: auf Planfilter abgeschiedene Stäube (links) und Staubablagerungen auf Entnahmesonde (rechts)

Aufgrund der hohen Abgasgeschwindigkeit bei dieser Anlage (ca. 10 m/s) erfolgte bei beiden Schornsteinfegermessgeräten die Staubprobenahme bei geringerer Absauggeschwindigkeit (unter-isokinetisch), was im Grundsatz bei gröberen Partikeln im Abgas zu einer zu hohen gemessenen Staubkonzentration führt. Da beim FSM an dieser Anlage deutlich zu geringe Staubkonzentrationen gemessen wurden, kann die Absauggeschwindigkeit nicht zu den Minderbefunden geführt haben. Inwieweit die Absaugrichtung und die Sondenform zu den hierzu beiträgt, kann anhand der vorliegenden Messwerte nicht beurteilt werden.

Dies gilt auch für den Einfluss der Ausrichtung der Sonde in der Messstrecke. Grundsätzlich wurde diese wie in Abbildung 3.3 skizziert eingebracht, ausgerichtet an den Achsen der Abgasrohre. An der Messstelle können aber auch andere Strömungsverhältnisse vorliegen, so dass die abgeschrägte Öffnung der Sonde nicht genau entgegen der Strömungsrichtung liegt. Die genauen Strömungsverhältnisse konnten vor Ort nicht ermittelt werden.

Deshalb wird vermutet, dass die deutlicheren Minderbefunde beim FSM bei den Messungen nach Elektrofilter im Wesentlichen durch verstärkte Ablagerungen der vergleichsweise groben und elektrisch geladenen Partikel in der Entnahmesonde verursacht werden.

Beim SM 500 ist die Ursache der größeren Bandbreite der Messergebnisse, die allerdings noch innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) liegen, nicht so offensichtlich zu erklären, da im Vergleich zum Referenzmessverfahren, auch eine zu hohe Konzentration ermittelt wurde (Messwert SM 500 mit $\sim 60 \text{ mg/m}^3$). Diese Messung wurde allerdings als 3. Messung am Messtag durchgeführt. Deshalb wird davon ausgegangen, dass erhöhte Ablagerungen in der Entnahmesonde und im beheizten Schlauch auch hier mitverantwortlich für Minderbefunde sind, der Mehrbefund könnte sich durch einen Wiedereintrag von Staubablagerungen aus Bereichen vor der Filterpatrone ergeben haben. Während eines Messtages wurden die Messgeräte bzw. Entnahmesonden nicht gereinigt.

Abbildung 5.14 (oben) zeigt für die Anlage 1 die bei den Feldmessungen gemessenen O_2 -Konzentrationen für die Schornsteinfegermessgeräte in Abhängigkeit des Referenzmessgerätes. Die Linien markieren den Bereich der zulässigen erweiterten Messunsicherheit von $\pm 0,5 \text{ Vol.-%}$ nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010). In Abbildung 5.14 (unten) sind die mit dem Referenzverfahren und mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen CO -Konzentrationen aufgeführt. Mit eingezeichnet sind die Linien der nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) geforderten erweiterten Messunsicherheit von 20 %.

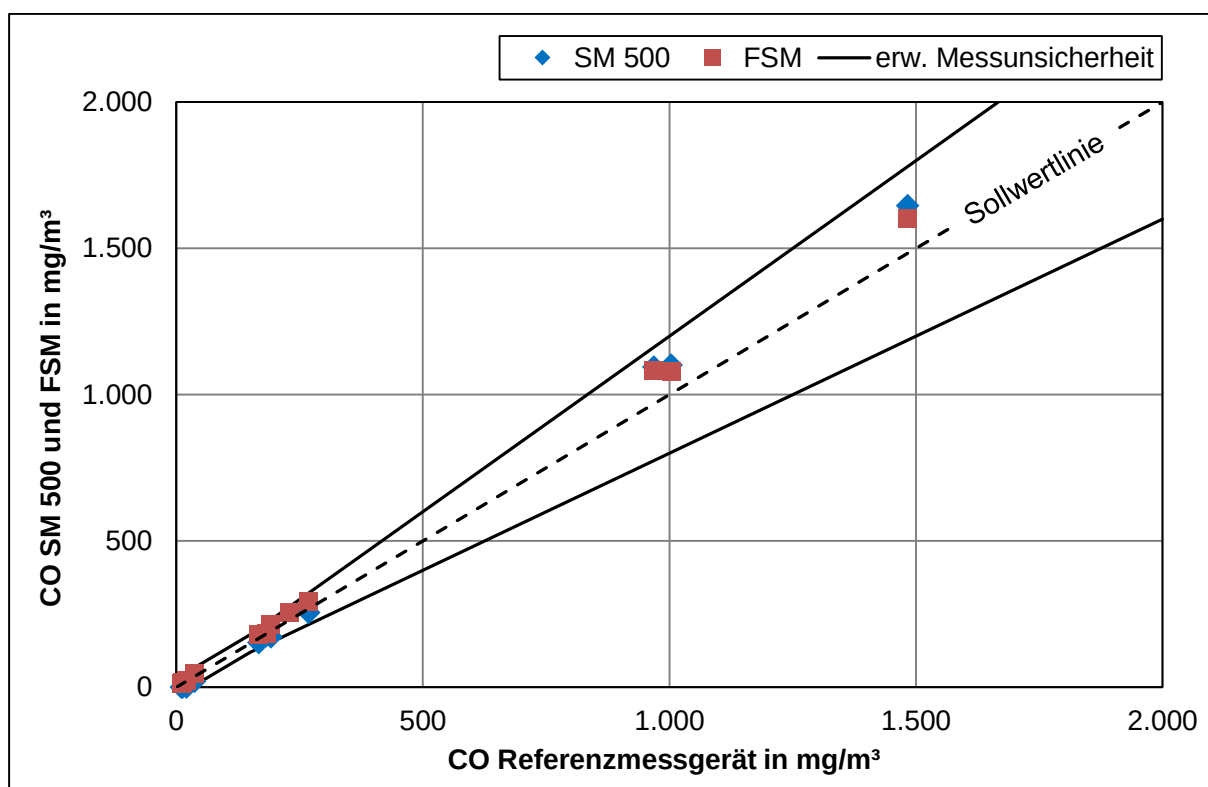
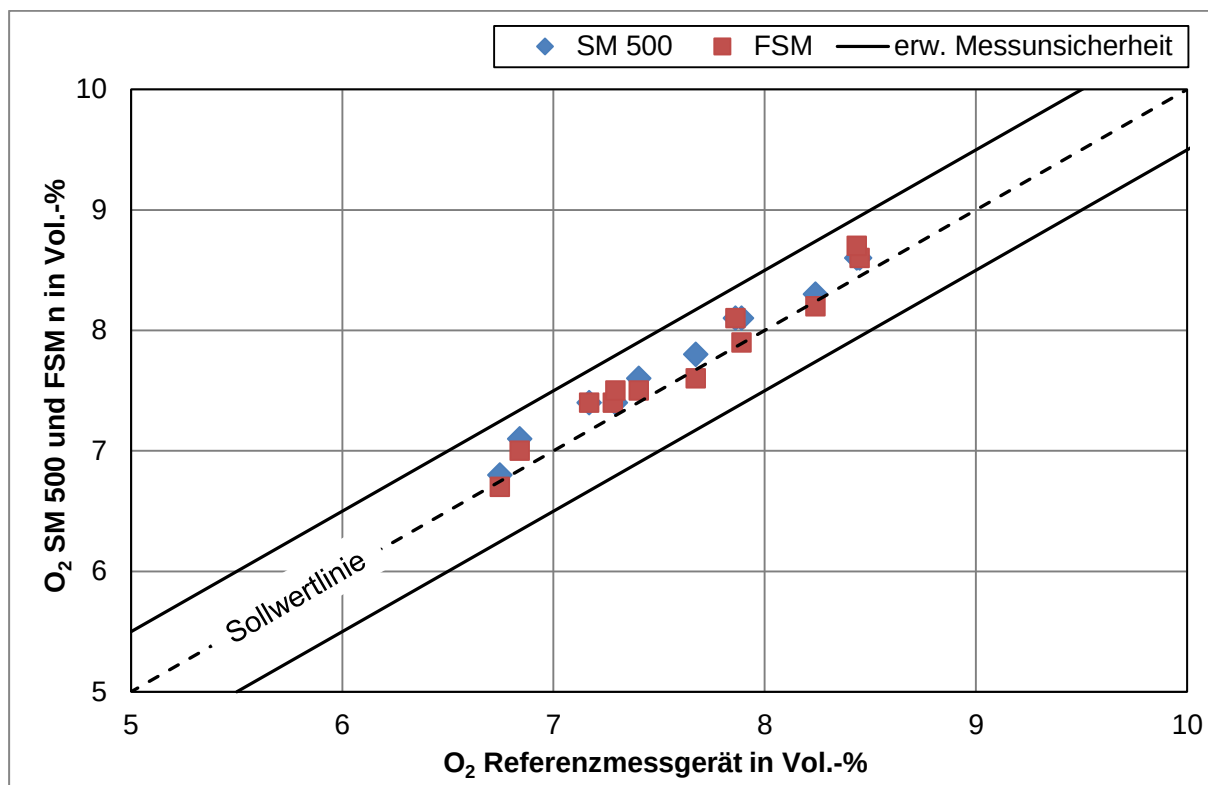


Abbildung 5.14 Feldmessungen Anlage 1 - O₂-Konzentrationen (oben) und unbezogene CO-Konzentrationen (unten) des Referenzmessgerätes jeweils im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit: O₂ ± 0,5 Vol.-% und CO ± 20 %)

Bei der Anlage 1 bewegen sich die gemessenen O₂-Konzentrationen in einem Bereich von 6,7 bis 8,4 Vol.-% und alle Messwerte der Schornsteinfegermessgeräte liegen innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit und streuen vergleichsweise gering um die Sollwertlinie. Die CO-Konzentrationen liegen in einem Bereich von 10 bis rund 1.480 mg/m³ (unbezogen) und liegen ebenfalls alle innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit, wobei das FSM in der Tendenz etwas zu hohe CO-Konzentrationen und das SM 500 bei geringeren Konzentrationen etwas zu geringe und bei höheren Konzentrationen etwas zu hohe CO-Konzentrationen misst.

Die CO-Konzentrationen sind nicht unmittelbar vom Wassergehalt im Brennstoff abhängig. Dies zeigt Abbildung 5.15 (oben), in der die Mittelwerte der jeweils 3 Messungen für die insgesamt 4 Messtage (siehe Tabelle 5.9) dargestellt sind. Obwohl der Wassergehalt im Brennstoff von 31,9 bis 54,9 Massen.-% schwankt (siehe Tabelle 5.2), ist allenfalls eine schwache Tendenz bei den CO-Konzentrationen zu erkennen, diese steigen bei höherem Wassergehalt im Brennstoff etwas an.

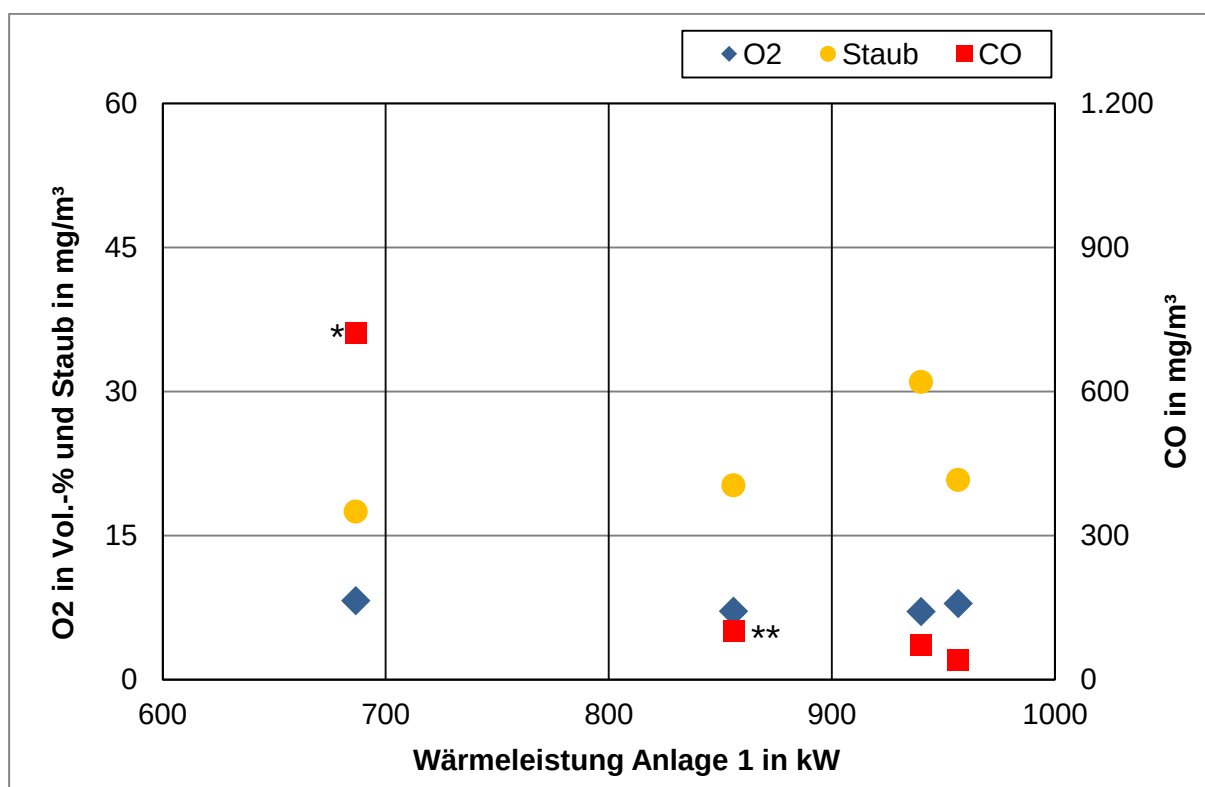
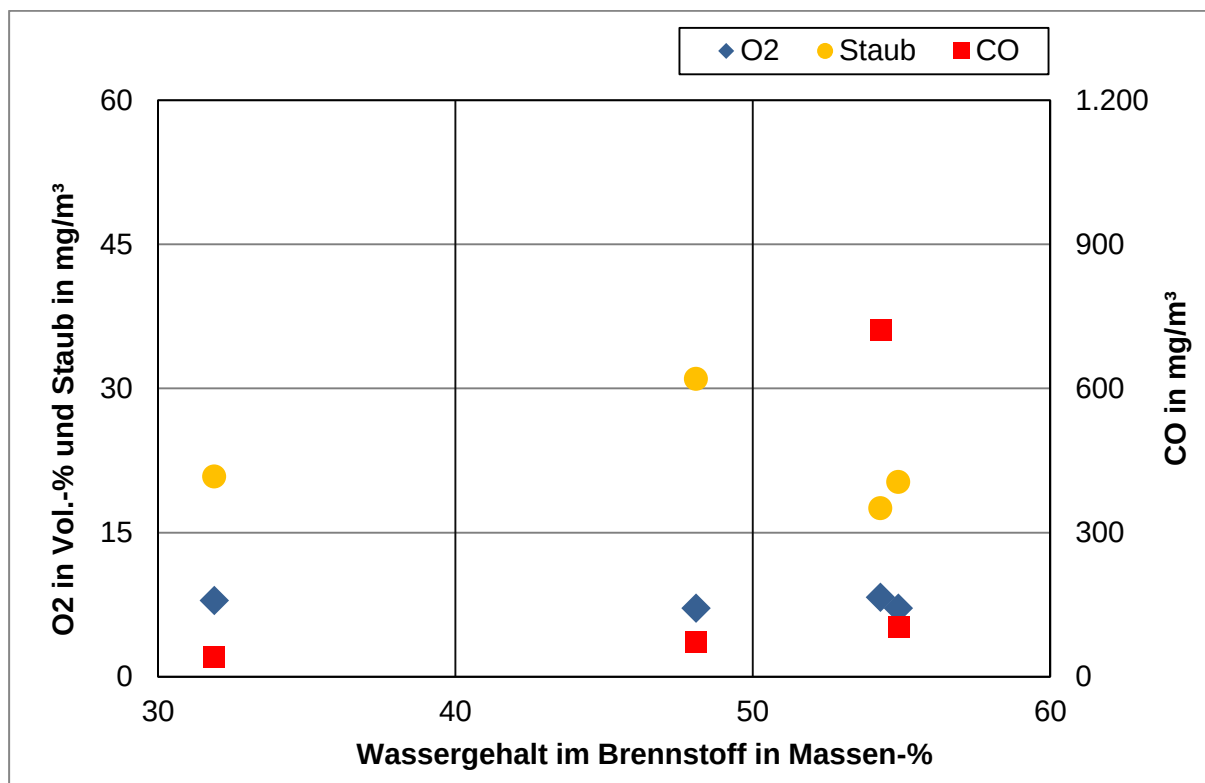
Allerdings waren die Kesselleistungen während den unterschiedlichen Messtagen und Messungen nicht gleich. Die Wärmeleistungen des Kessels lagen während der Feldmesskampagne in einem Bereich von 640 bis 990 kW. Eine vergleichsweise geringe Wärmeleistung in Verbindung mit einem hohen Wassergehalt des Brennstoffes führt bei dieser Anlage zu erhöhten CO-Konzentrationen im Abgas, siehe Abbildung 5.12 (unten).

In dem während den Messungen angetroffenen Leistungsbereich des Heizkessels wurden Lastschwankungen und Änderungen der Brennstoffqualität soweit durch die Sauerstoffregelung ausgeregelt, dass die mittleren O₂-Konzentrationen in einem engen Band liegen, wobei keine Abhängigkeiten von diesen beiden Größen erkennbar sind.

Im Abgas nach Elektrofilter ist für Staub kein Zusammenhang zwischen Kessellast und Brennstoffqualität zu erkennen. Die auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen Staubkonzentrationen liegen in einem Bereich von 12 bis 42 mg/m³ (Mittelwert für alle 12 Messungen: 22 mg/m³), der Grenzwert der Anlage (0,15 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) wurde bei keiner Messung überschritten.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich bei den 15-Minuten Mittelwerten der CO-Konzentrationen. Diese schwanken deutlich stärker in einem Bereich von 6 bis 945 mg/m³ (Mittelwert für alle 12 Messungen: 236 mg/m³, jeweils bei 13 Vol.-% O₂). An einem Messtag (9.2.2016) bei der Verbrennung von Hackschnitzeln mit hohem Wassergehalt (54,3 Massen.-%) und vergleichsweise geringer Wärmeleistung (640 bis 720 kW, Mittelwert für die drei Messungen: 687 kW) wurde der CO-Grenzwert von 0,5 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) bei allen drei Messungen des Tages überschritten. Mit dem Referenzmessgerät wurden hierbei CO-Konzentrationen im Bereich von 639 bis 945 mg/m³ (Mittelwert für die drei Messungen: 723 mg/m³, jeweils bezogen auf 13 Vol.-% O₂ und ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit) gemessen.

Erhöhte CO-Konzentrationen ergeben sich bei diesem Kessel durch CO-Spitzen, die z.B. durch die Brennstoffbeschickung, Rostbewegungen oder Entaschungsvorgänge entstehen. Dies ist beispielhaft anhand der CO- und O₂-Konzentrationsverläufe für eine Messung am 9.2.2016 in Abbildung 5.16 gezeigt. Hierbei bleiben, außer bei den Entaschungsvorgängen, die O₂-Konzentrationen nahezu unverändert. Zur Entfernung der Rostasche öffnet sich eine Klappe am Ende des Rostes und die Asche fällt in einen darunter stehenden Behälter.



Wassergehalt im Brennstoff: * 54,3 Massen.-%, ** 54,9 Massen.-%

Abbildung 5.15 Feldmessungen Anlage 1 - Zusammenhang zwischen gemessenen O₂-, CO- und Staubkonzentrationen im Abgas und Wassergehalt im Brennstoff (oben) und Wärmeleistung des Heizkessels (unten) (Mittelwerte der vier Messtage für Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂)

Durch das Öffnen der Klappe nimmt der Unterdruck im Kessel ab, woraufhin die Kesselregelung den Saugzug auf höhere Drehzahl einstellt, um den eingestellten Sollwert für den Unterdruck wieder zu erreichen. Hierdurch nehmen die O_2 -Konzentration und die Strömungsgeschwindigkeit im Kessel stark zu, was sich auf die Verbrennungsqualität negativ auswirkt. Ein deutlicher Anstieg der CO-Konzentration ist die Folge. Während den Messungen mit dem SM 500 konnte hierbei auch ein Anstieg der Staubkonzentrationen beobachtet werden.

Treten die CO-Konzentrationsspitzen und Entaschungsvorgänge nicht auf, beispielhaft für eine Messung am 19.2.2016 in Abbildung 5.16 gezeigt, liegen die CO-Konzentrationen während der gesamten Messzeit auf konstant niedrigem Niveau. Die Schwankungen der O_2 -Konzentrationen haben hierbei auf die Verbrennungsqualität keinen erkennbaren Einfluss.

Eine Anpassung der Kesseleinstellungen an die jeweilige Brennstoffqualität wird nach Auskunft des Betreibers nicht vorgenommen. Es erfolgen auch keine routinemäßigen Messungen des Wassergehaltes im Brennstoff. Da die Anlage als Grundlastkessel Bestandteil einer Nahwärmeversorgung ist, war der Kessel im Dauerbetrieb mit Kesselwassertemperaturen im Bereich von $\sim 90^\circ\text{C}$.

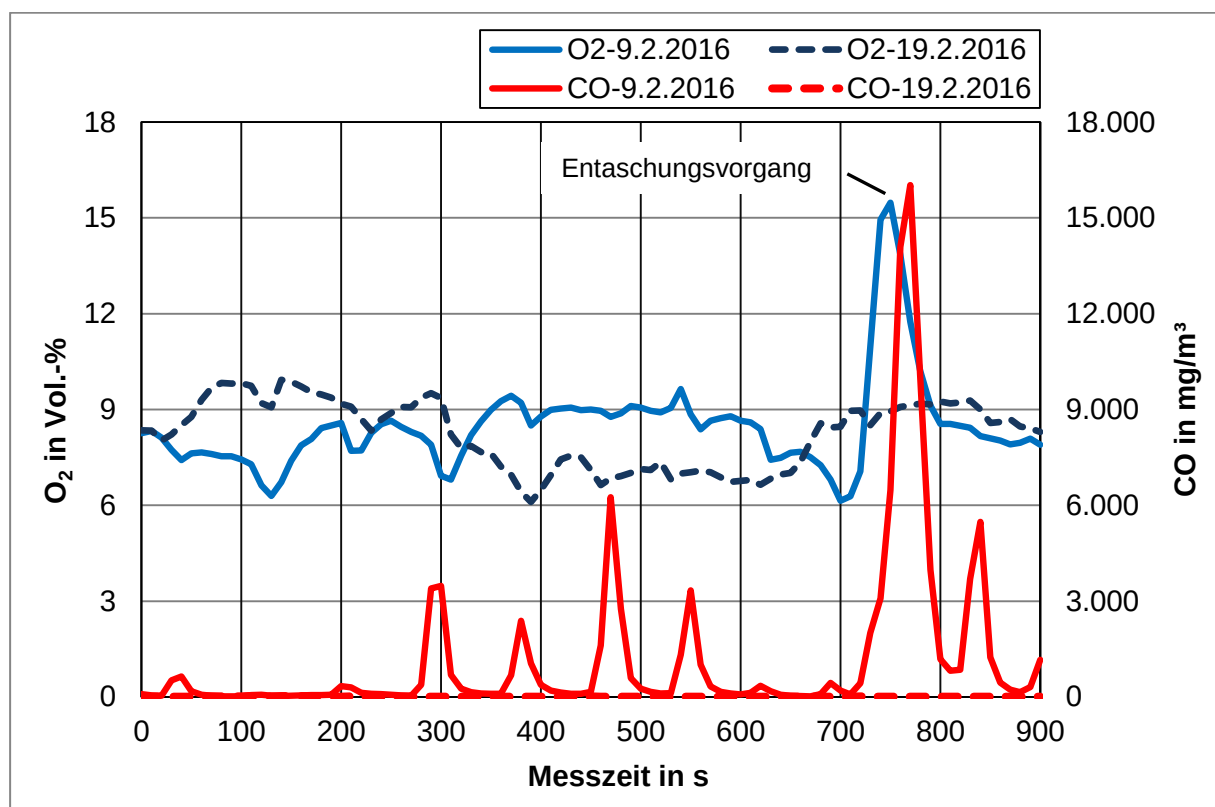


Abbildung 5.16 Verlauf der O_2 - und CO-Konzentrationen (Referenzmessgeräte) im Abgas der Anlage 1 während der 15-Minuten-Messungen am 9.2.2016 (Messung 1) und am 19.2.2016 (Messung 2)

Abbildung 5.17 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas von Anlage 1 während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O_2). An der Anlage wurden während der Feldmesskampagne keine Wartungs- oder Reinigungsarbeiten (Kesselreinigung) durchgeführt.

Die Anlage war immer in einem technisch ordnungsgemäßen Zustand, es waren keine offensichtlichen Mängel erkennbar. Einen Einfluss zunehmender Verschmutzung (z.B. im Wärmeübertrager) auf die Staub- und CO-Konzentrationen ist anhand der Messwerte nicht erkennbar. Die Staub- und CO-Messwerte schwanken vornehmlich aufgrund wechselnder Brennstoffqualitäten und unterschiedlicher Lastzustände bei den Messungen.

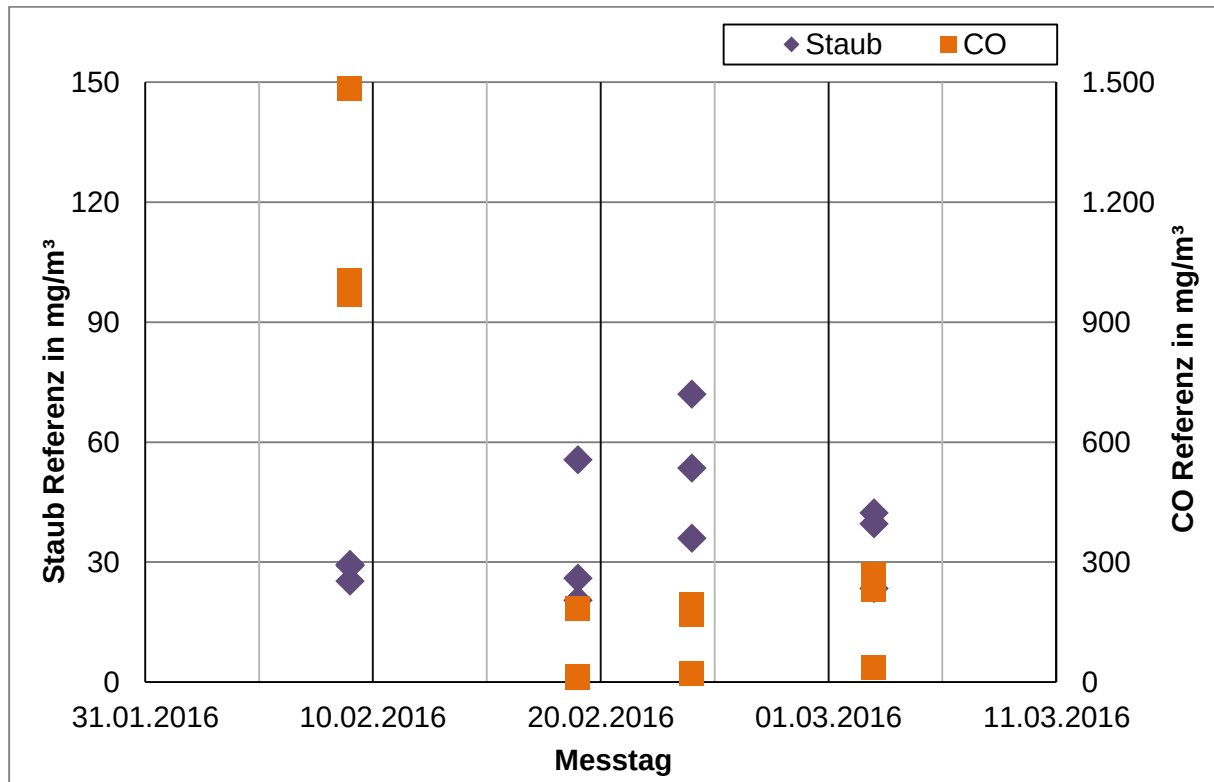


Abbildung 5.17 Feldmessungen Anlage 1 - zeitlicher Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂)

5.2.5 Vergleichsmessungen an Anlage 2 - Pelletkessel 1

Abbildung 5.18 zeigt die an der Anlage 2 mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen unbezogenen Staubkonzentrationen in Abhängigkeit der Ergebnisse des Standardreferenzmessverfahrens. Mit eingezeichnet sind die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) geforderte erweiterte Messunsicherheit.

Insgesamt liegen die mit den Schornsteinfegermessgeräten ermittelten Staubkonzentrationen bei dieser Anlage unterhalb der Sollwertlinie und, bis auf eine Ausnahme bei SM 500, innerhalb der geforderten Grenzen für die erweiterte Messunsicherheit. Bei diesem Messwert des SM 500 und beim zeitgleich vom FSM ermittelten Messwert erfolgte eine Abschaltung des Heizkessels während der Messung, entsprechend hoch liegen die O₂- und CO-Konzentrationen. Diese beiden Messwerte sollen nicht in die weitere Bewertung einfließen, womit alle von den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen Staubkonzentrationen innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit liegen.

Die unbezogenen Staubkonzentrationen liegen bei dieser Anlage in einem Bereich von 52 bis 125 mg/m³ (auf 13 Vol.-% O₂ bezogen: 29 bis 69 mg/m³). Bei einem Grenzwert von 0,15 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) liegen alle mit dem Referenzmessverfahren ermittelten Staubkonzentrationen unterhalb des Grenzwertes.

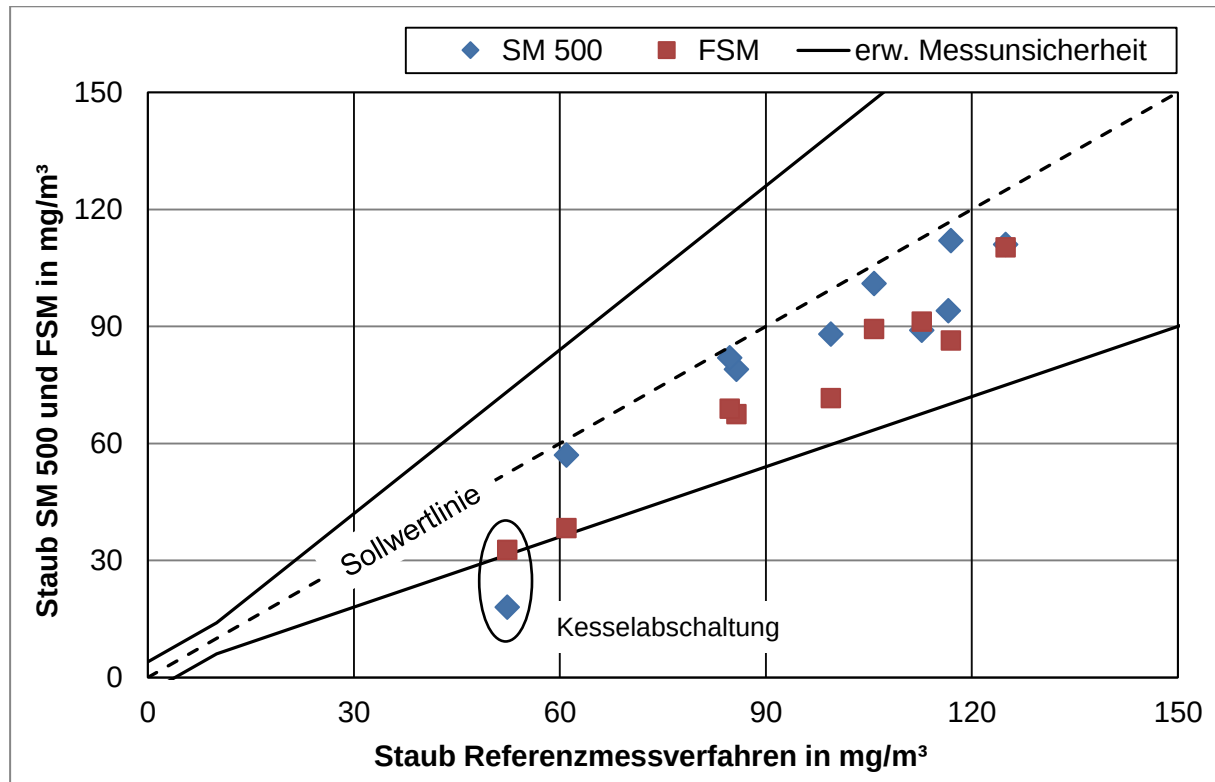


Abbildung 5.18 Feldmessungen Anlage 2 - Staubkonzentrationen (unbezogen) des Referenzmessverfahrens im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an erweiterte Messunsicherheit $\pm 40\%$)

Anlage 2 ist Bestandteil eines Wärmenetzes zur Erzeugung von Heizwärme und Warmwasser, integriert ist ein größerer Pufferspeicher. Der Pelletkessel stellt die einzige Wärmequelle in dem Wärmenetz dar und wird taktend betrieben. Sinkt die Temperatur im Pufferspeicher unter den Sollwert wird der Kessel gestartet und heizt den Pufferspeicher wieder auf. Nach dem Startvorgang und einer Stabilisierungsphase schaltet der Kessel während der Pufferladedauer auf eine Volllasteinstellung, eine Leistungsanpassung an den aktuellen Ladezustand konnte nicht beobachtet werden. Wird die Sollwerttemperatur für die Pufferspeicherladung erreicht, erfolgt die Kesselabschaltung. Je nach Wärmebedarf waren die Kesselaufzeiten für den Ladevorgang ausreichend für 2 bis 3 Messungen. Nach dem Ladevorgang schloss sich meist eine Stillstandszeit von 1 bis 3 Stunden an. Aufgrund der hydraulischen Verschaltung des Heizkessels mit dem Pufferspeicher und dem Wärmenetz lag die Kesseltemperatur immer oberhalb von 65 °C, meist im Bereich von 70 °C oder etwas darüber.

Abbildung 5.19 (oben) zeigt für die Anlage 2 die mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen O₂-Konzentrationen in Abhängigkeit der O₂-Konzentration des Referenzmessgerätes, die durchgezogenen Linien markieren den Bereich der zulässigen erweiterten Messunsicherheit von $\pm 0,5$ Vol.-% nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010).

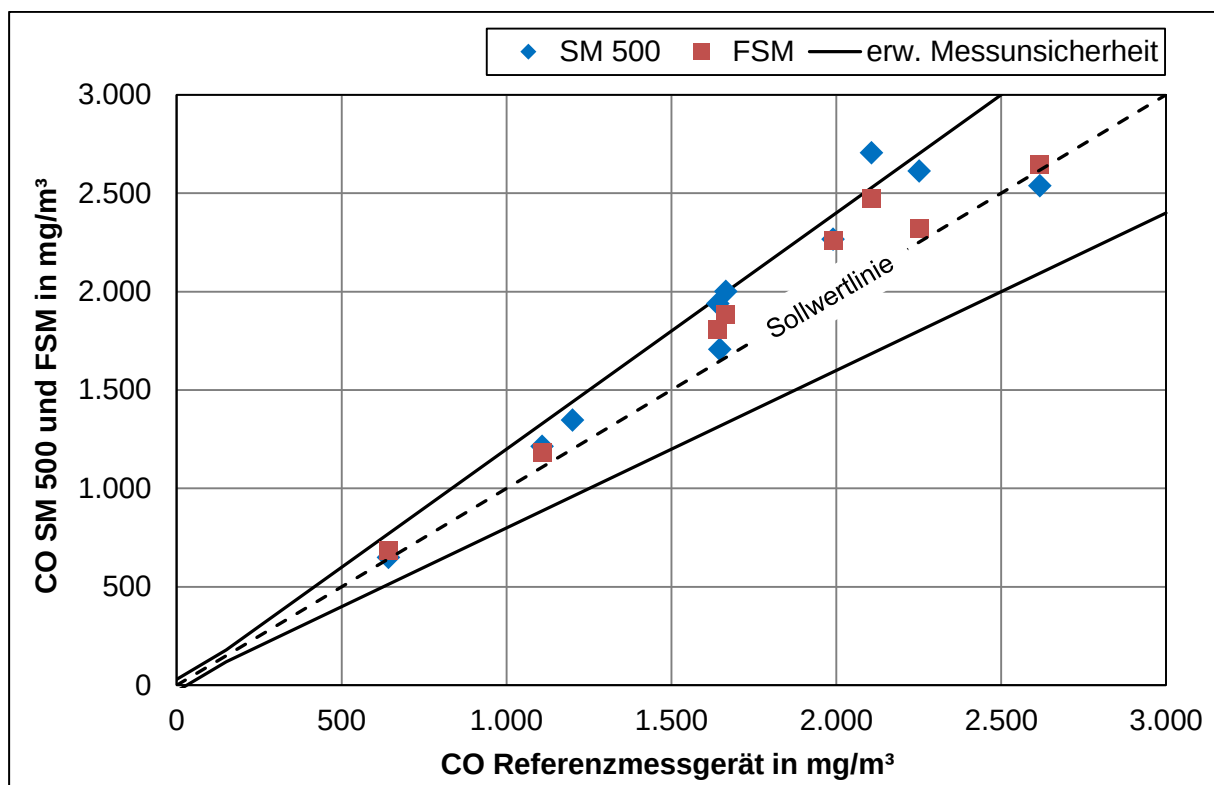
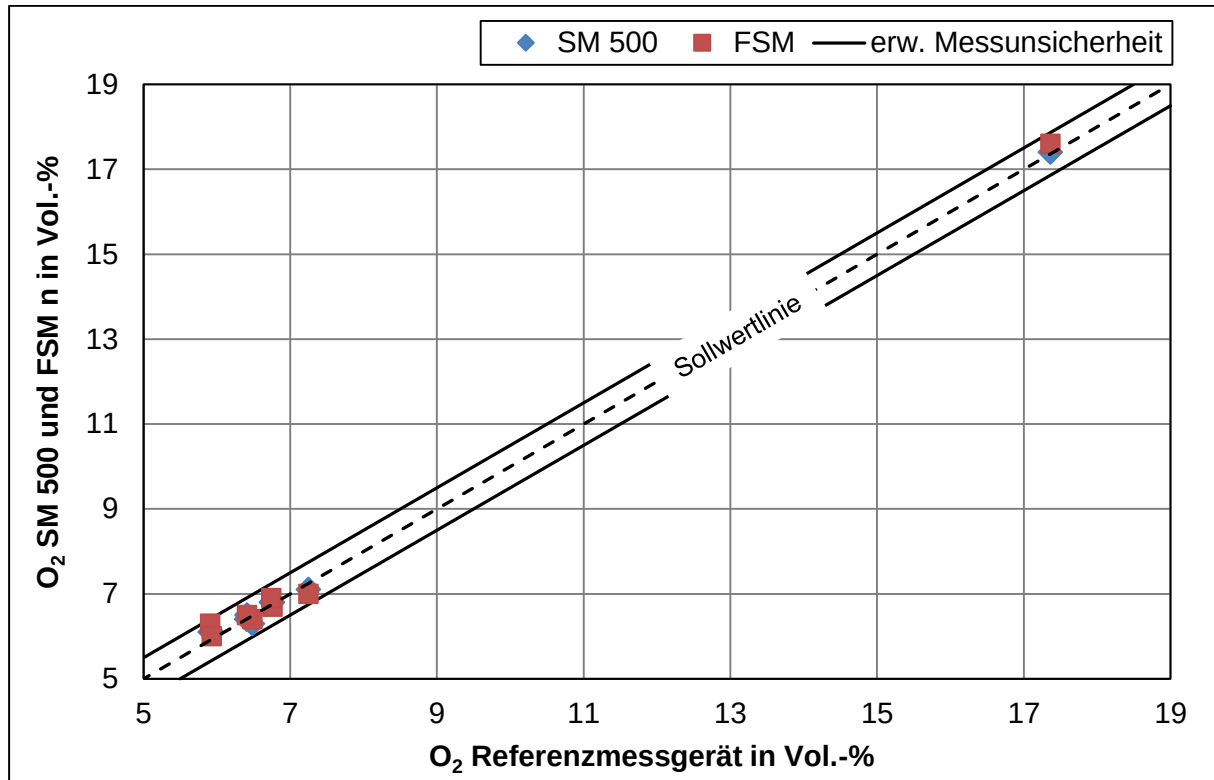


Abbildung 5.19 Feldmessungen Anlage 2 - O₂-Konzentrationen (oben) und unbezogene CO-Konzentrationen (unten) des Referenzmessgerätes jeweils im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit: O₂ ± 0,5 Vol.-% und CO ± 20 %)

In Abbildung 5.19 (unten) sind die mit dem Referenzmessverfahren und mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen CO-Konzentrationen aufgeführt. Mit eingezeichnet sind die Linien der nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) geforderten erweiterten Messunsicherheit von 20 %.

Die bei Anlage 2 gemessenen O₂-Konzentrationen bewegen sich, mit Ausnahme der Messungen mit Kesselabschaltung kurz nach Messbeginn, im Bereich von 5,9 bis 7,2 Vol.-%.

Alle Messwerte der Schornsteinfegermessgeräte liegen innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit und streuen vergleichsweise gering um die Sollwertlinie.

CO-Konzentrationen wurden vom Referenzmessgerät in einem Bereich von ca. 640 bis rund 2.620 mg/m³ (unbezogen) ermittelt und liegen für die Schornsteinfegermessgeräte bis auf eine Ausnahme beim SM 500, innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit, wobei beide Messgeräte in der Tendenz etwas zu hohe CO-Konzentrationen messen.

Ursache für die größeren Abweichungen zwischen Referenzmessgerät und den Schornsteinfegermessgeräten bei höheren CO-Konzentrationen könnte ein unterschiedliches Signalverhalten der CO-Sensoren bei höheren und vor allem stark schwankenden CO-Konzentrationen im Vergleich zu einem weniger stark schwankenden Verlauf sein. Dies ist beispielhaft in Abbildung 5.20 im Vergleich der Verläufe der CO-Konzentrationen von Referenzmessgerät und SM 500 dargestellt.

Bei der 15-Minuten Messung am 4.3.2016 (Messung 1) schwankte die CO-Konzentration weniger stark und der CO-Sensor des SM 500 konnte den Verlauf gut wiedergeben, wodurch sich auch die Mittelwerte von Referenzmessgerät und SM 500 nur wenig unterscheiden. Bei großen und wiederkehrenden Schwankungen der CO-Konzentration (z.B. bei Messung 2 am 10.2.2016) treten größere Abweichungen zwischen Referenzmessgerät und SM 500 auf, da niedrige CO-Konzentrationen im Abgas etwas überhöht gemessen werden.

Inwieweit die Brennstoffqualität eine Rolle spielt, kann nicht genau beurteilt werden. So wurde zwar zwischen den Messtagen 10.2. und 25.2.2016 neuer Brennstoff angeliefert, aber ab wann dieser Brennstoff letztlich in den Kessel gefördert wurde und in welchem Zustand (z.B. hinsichtlich den Feinanteilen) kann nicht beurteilt werden, da die Brennstoffproben nicht direkt aus der Kesselbeschickung entnommen werden konnten. Eindeutige Hinweise auf Unterschiede in der Pelletsqualität ergeben sich anhand der Messergebnisse nicht.

Ein wesentlicher Einfluss auf das Messergebnis hatte der Verbrennungszustand nach der Start- bzw. Stabilisierungsphase beim Übergang in den Heizbetrieb, bei dem dann die Sauerstoffregelung aktiviert war und ab dem dann Messungen durchgeführt wurden. Je nachdem wie lange der Kessel bis zur ersten Messung im Heizbetrieb war (siehe Abbildung 5.21) und wie der Kesselstart verlief (siehe Abbildung 5.22) wurden unterschiedliche Staub- und Gaskonzentrationen bei den jeweiligen Messungen ermittelt.

Insgesamt scheint bei dieser Anlage, neben dem Messtag, die Kesselaufzeit einen Einfluss auf die ermittelten CO- und Staubkonzentrationen zu haben. Sowohl bei den 3 Messungen am 18.2.2016 als auch am 4.3.2016 nehmen die CO-Konzentrationen während des Kesselbetriebs zu. Auf die Staubkonzentrationen ist der Einfluss der Betriebszeit allerdings nicht so eindeutig erkennbar. Am 4.3.2016 bleibt dies auf gleichem konstant niedrigem Niveau, allerdings sind hier auch die CO-Konzentrationen niedrig. Am 4.3.2016 nimmt die Staubkonzentration mit der Kesselaufzeit ab, wobei die CO-Konzentration ansteigt.

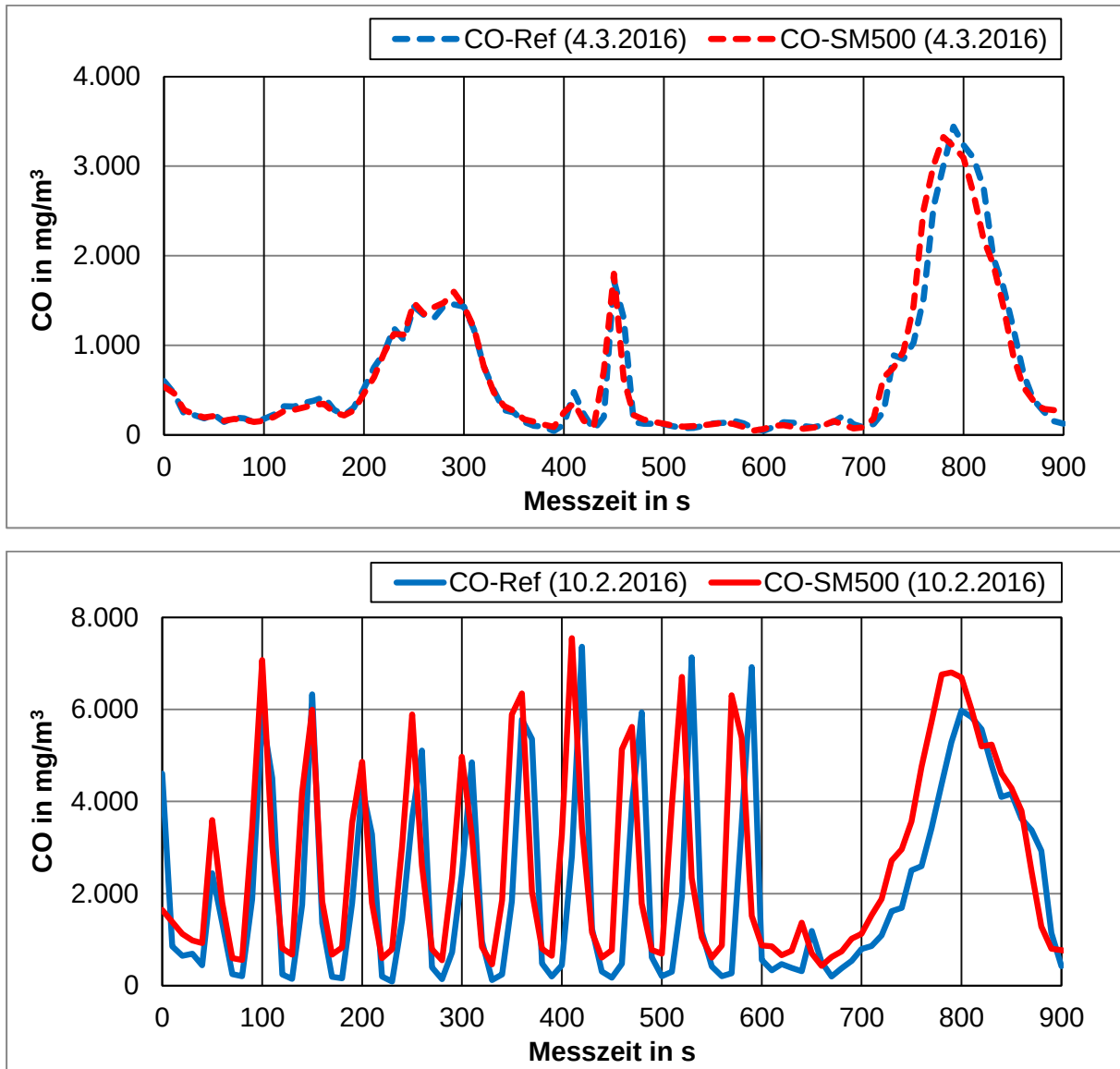


Abbildung 5.20 Verläufe der CO-Konzentrationen im Abgas der Anlage 2 - Referenzmessgerät im Vergleich zum SM 500 während 15-Minuten-Messungen am 4.3.2016 (Messung 1) und am 10.2.2016 (Messung 2)

Nach dem Kesselstart wird nach einiger Zeit eine intensive Verbrennung erreicht und die O_2 -Konzentration sinkt stark auf Werte von < 3 Vol.-% ab, so dass sich ein Luftmangel mit erhöhten CO-Konzentrationen einstellt. Zu dieser Zeit ist die O_2 -Regelung noch nicht aktiv, die Brennstoff- und Luftmengenregelung erfolgt nach fest eingestellten Parametern. Nach dem Wiederanstieg der O_2 -Konzentration geht der Heizkessel in den Heizbetrieb mit Sauerstoffregelung über. Hier dauert es allerdings eine gewisse Zeit, bis die O_2 -Konzentration um den Sollwert schwingt. Bei der Messung am 4.3.2016 (Abbildung 5.22, oben) wurde vergleichsweise schnell eine stabile Verbrennung mit vergleichsweise wenigen CO-Spitzen erreicht, wobei CO-Spitzen nicht nur bei zu geringem Luftüberschuss auftreten.

Am 10.2.2016 (Abbildung 5.22, unten) wurde die Messung während einer Luftmangelsituation im Heizbetrieb bei aktiver λ -Regelung gestartet. Während der Messzeit wurde kein stabiler Verbrennungsprozess mit geringen CO-Konzentrationen erreicht.

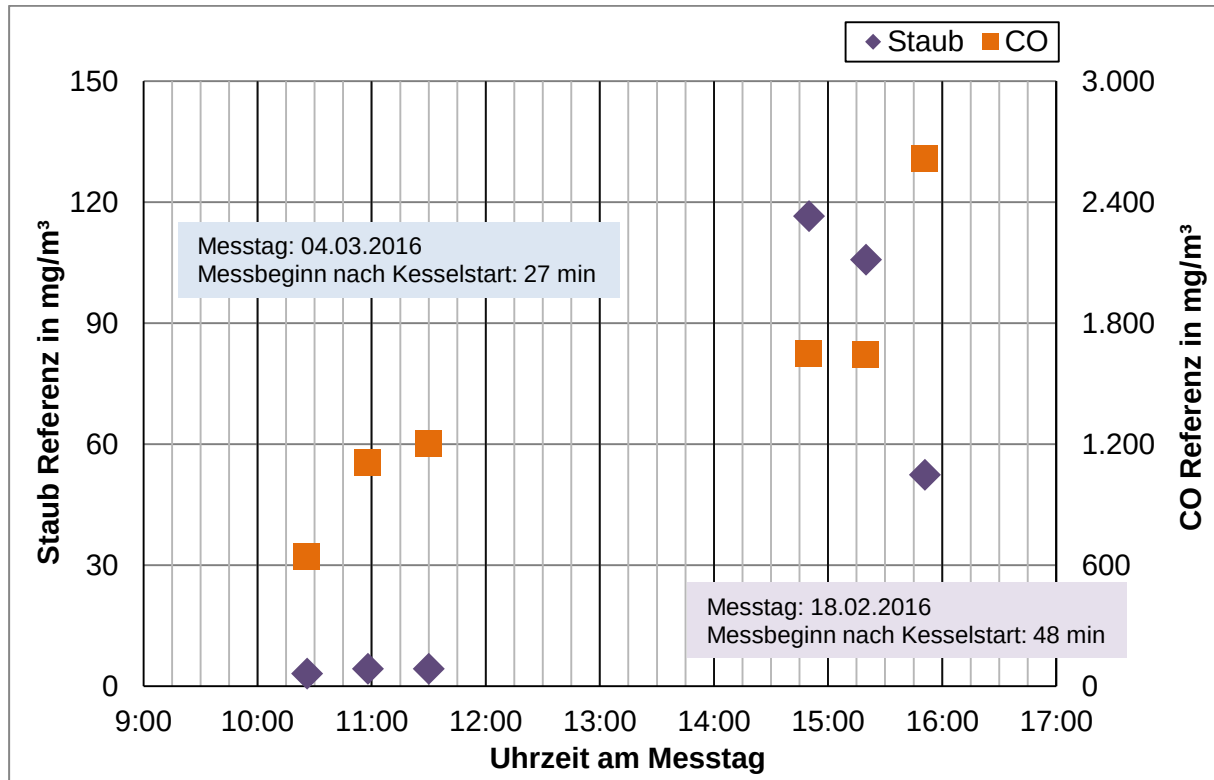


Abbildung 5.21 Staub- und CO-Konzentrationen im Abgas der Anlage 2 für die 3 Messungen am 4.3.2016 und am 18.2.2016 (jeweils Referenzmessgeräte und 15-Minuten Mittelwerte)

Auch bei höherem Luftüberschuss traten stark schwankende und erhöhte CO-Konzentrationen auf, deren Ursache möglicherweise in einer zu hohen Feuerungswärmeleistung zu sehen ist. Anhand der Messdaten kann dies aber nicht abschließend beurteilt werden.

Die auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen Staubkonzentrationen liegen bei der Anlage 2 in einem Bereich von 33 bis 73 mg/m³ (Mittelwert von 9 Messungen: 56 mg/m³, Mittelwert und Bandbreite ohne Messung 3 vom 18.2.2016 mit Kesselabschaltung während der Messung), der Grenzwert der Anlage (0,15 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) wurde bei keiner Messung überschritten.

Die mit dem Referenzmessgerät gemessenen und auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen CO-Konzentrationen liegen bei den Messungen in einem Bereich von ca. 350 bis rund 1.230 mg/m³ (Mittelwert von 9 Messungen: 875 mg/m³, Mittelwert und Bandbreite ohne Messung 3 vom 18.2.2016 mit Kesselabschaltung während der Messung) und damit in drei Fällen über dem CO-Grenzwert von 1,0 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂, Bewertung ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit). Die Ursache für die großen Schwankungen der CO-Konzentrationen (15-Minuten Mittelwerte) mit ca. dem Faktor 3,5 (Verhältnis von Maximal- zu Minimalwert, bei Staub ca. 2,2) ist nicht eindeutig beschreibbar.

In Abbildung 5.23 ist der zeitliche Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas von Anlage 2 während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂) dargestellt.

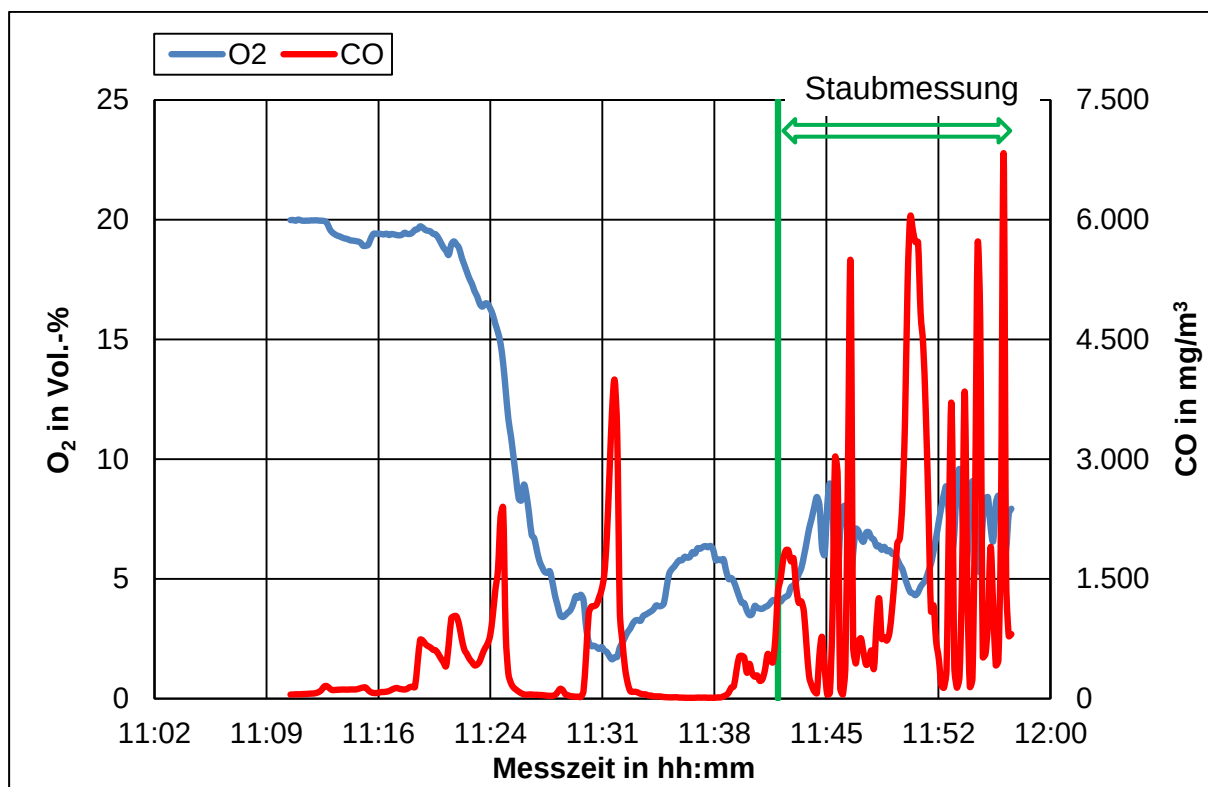
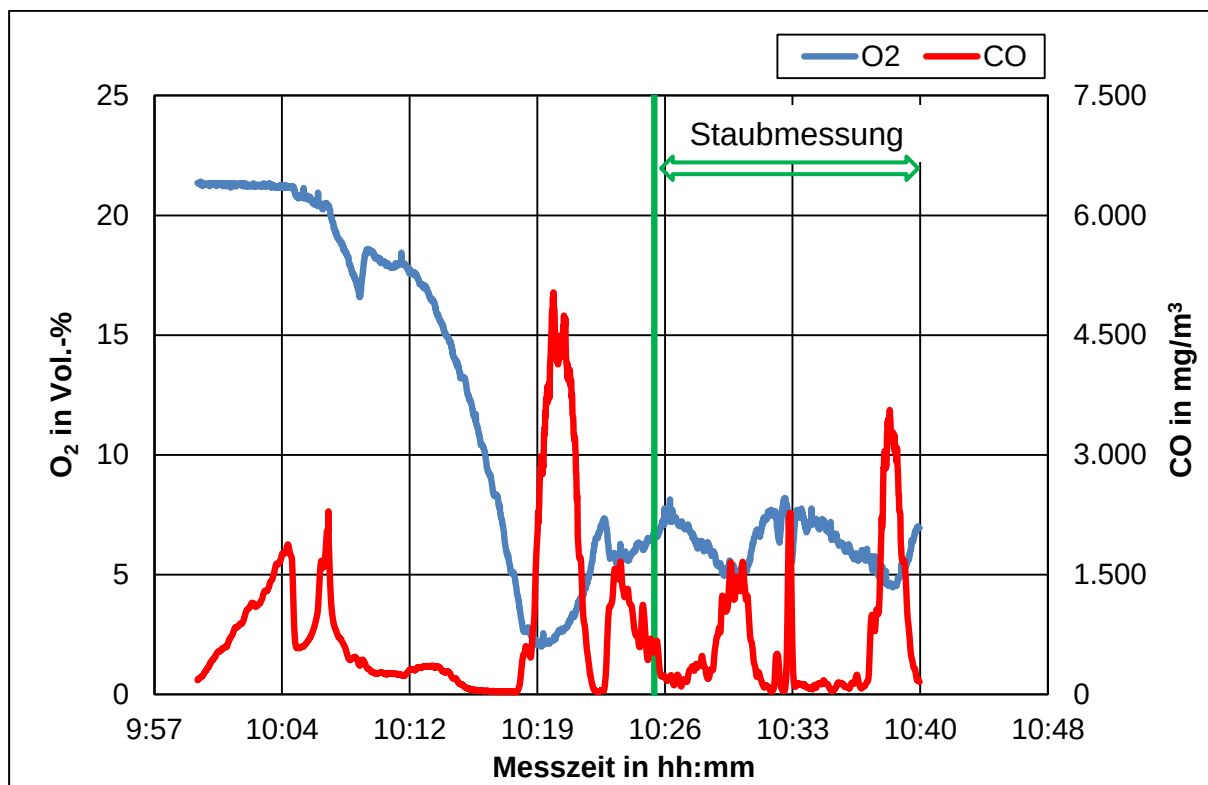


Abbildung 5.22 Verläufe der O₂- und CO-Konzentrationen im Abgas der Anlage 2 vom Kesselstart bis Ende der 1. Staubmessung - Referenzmessgeräte am 4.3.2016 (oben) und am 10.2.2016 (unten)

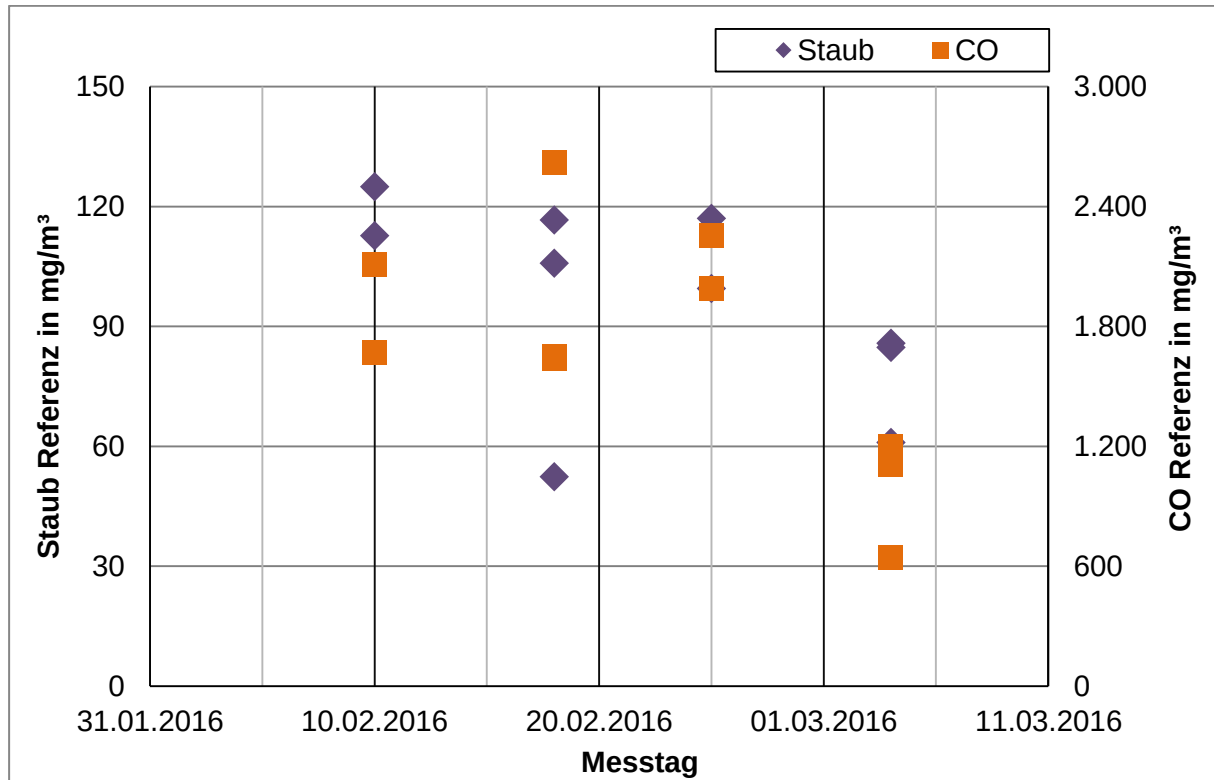


Abbildung 5.23 Feldmessungen Anlage 2 - zeitlicher Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂)

An der Anlage wurden während der Feldmesskampagne keine Wartungs- oder Reinigungsarbeiten (Kesselreinigung) durchgeführt. Die Anlage war immer in einem technisch ordnungsgemäßen Zustand, es waren keine offensichtlichen Mängel erkennbar. Einen Einfluss zunehmender Verschmutzung (z.B. im Wärmeübertrager) auf die Staub- und CO-Konzentrationen ist anhand der Messwerte nicht erkennbar.

Die Schwankungen der CO-Messwerte wurden vor allem durch den aktuellen Verbrennungszustand (z.B. Höhe des Luftüberschusses, momentane Feuerungswärmeleistung) verursacht. Beim Staub ist in der Tendenz ein Rückgang der Konzentrationen erkennbar, ggf. mit hervorgerufen durch eine bessere Pelletsqualität (geringere Feinanteile).

5.2.6 Vergleichsmessungen an Anlage 3 - Pelletkessel 2

In Abbildung 5.24 sind die an der Anlage 3 mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen unbezogenen Staubkonzentrationen in Abhängigkeit der Ergebnisse des Standardreferenzmessverfahrens gezeigt. Mit eingezeichnet sind die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) geforderte erweiterte Messunsicherheit.

Auffällig sind 2 Messwerte des SM 500, welche außerhalb den Anforderungen zur erweiterten Messunsicherheit liegen. Beide Messungen mit den hohen Mehrbefunden wurden an der Messstelle MS 3 (siehe Abbildung 5.3) ermittelt, wobei sich die O₂-Konzentrationen an den drei verschiedenen Messpositionen für die beiden Schornsteinfegermessgeräte und das Referenzmessgerät jeweils nicht wesentlich unterscheiden.

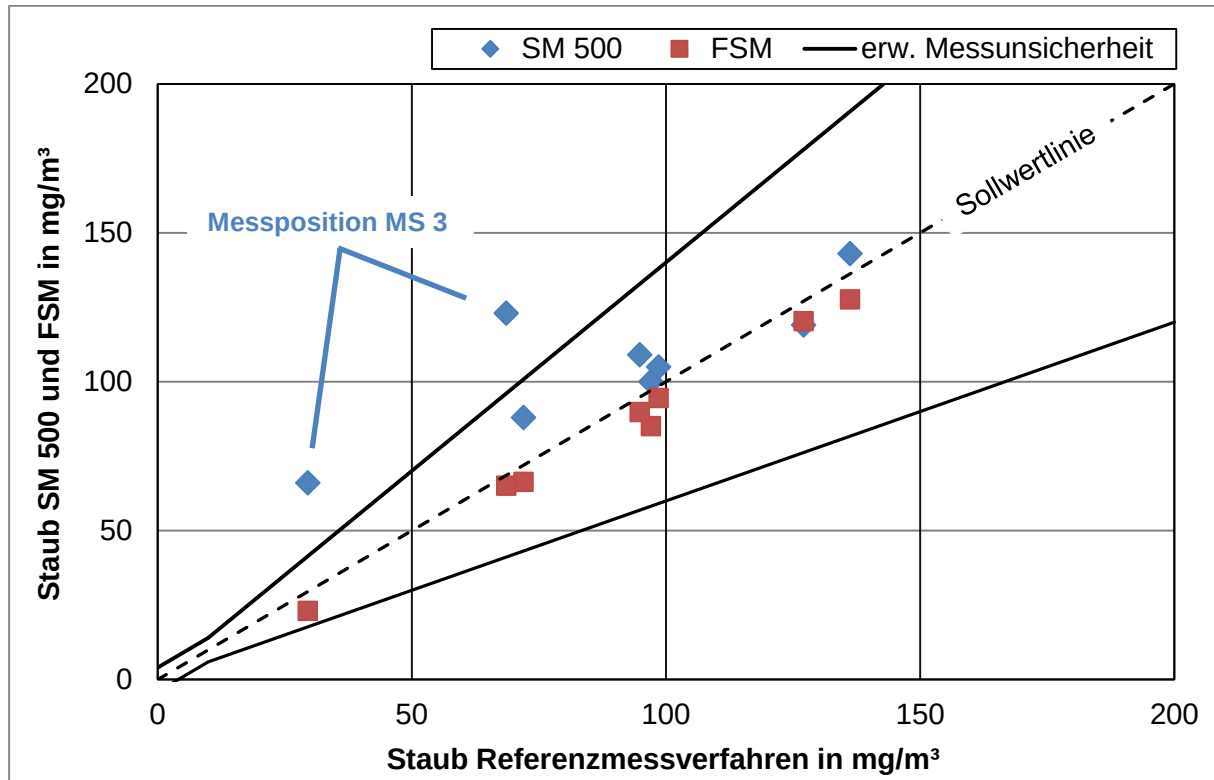


Abbildung 5.24 Feldmessungen Anlage 3 - Staubkonzentrationen (unbezogen) des Referenzmessverfahrens im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaub-Messgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an erweiterte Messunsicherheit $\pm 40\%$)

Das SM 500 konnte an der Messposition MS 3 aufgrund eines zu geringen Ausschnittes in der Rohrisolierung nur schwer fixiert werden. Infolgedessen kippte das schwere Ende der Entnahmesonde mit der Sondenheizung z.T. während der Messung (siehe Abbildung 3.4) nach unten, wodurch die Sondenöffnung sich in Richtung Rohrrinnenwand bewegt. Aufgrund der anderen Messergebnisse beim SM 500 für die Anlage 3 wird davon ausgegangen, dass bei den beiden auffälligen Messungen die Entnahmesonde die Rohrrinnenwand berührt hatte und von dort Staubablegungen aufgenommen wurden. Deshalb sollten diese beiden Messungen nicht zur Qualitätsbewertung des Staubmessgerätes herangezogen werden.

Alle anderen Staubmesswerte des SM 500 und des Feinstaub-Messgerätes FSM liegen, im Vergleich zum Referenzmessverfahren, innerhalb der Anforderungen zur erweiterten Messunsicherheit relativ nahe an der Sollwertlinie, beim FSM in der Tendenz etwas unterhalb und beim SM 500 etwas oberhalb der Sollwerte.

Abbildung 5.25 (oben) zeigt für die Anlage 3 die bei den Feldmessungen mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen O_2 -Konzentrationen in Abhängigkeit der O_2 -Konzentration des Referenzmessgerätes, die durchgezogenen Linien markieren den Bereich der zulässigen erweiterten Messunsicherheit von $\pm 0,5$ Vol.-% nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010). In Abbildung 5.25 (unten) sind die mit dem Referenzverfahren und mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen CO -Konzentrationen aufgeführt. Mit eingezeichnet sind die Linien der nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) geforderten erweiterten Messunsicherheit von 20 %.

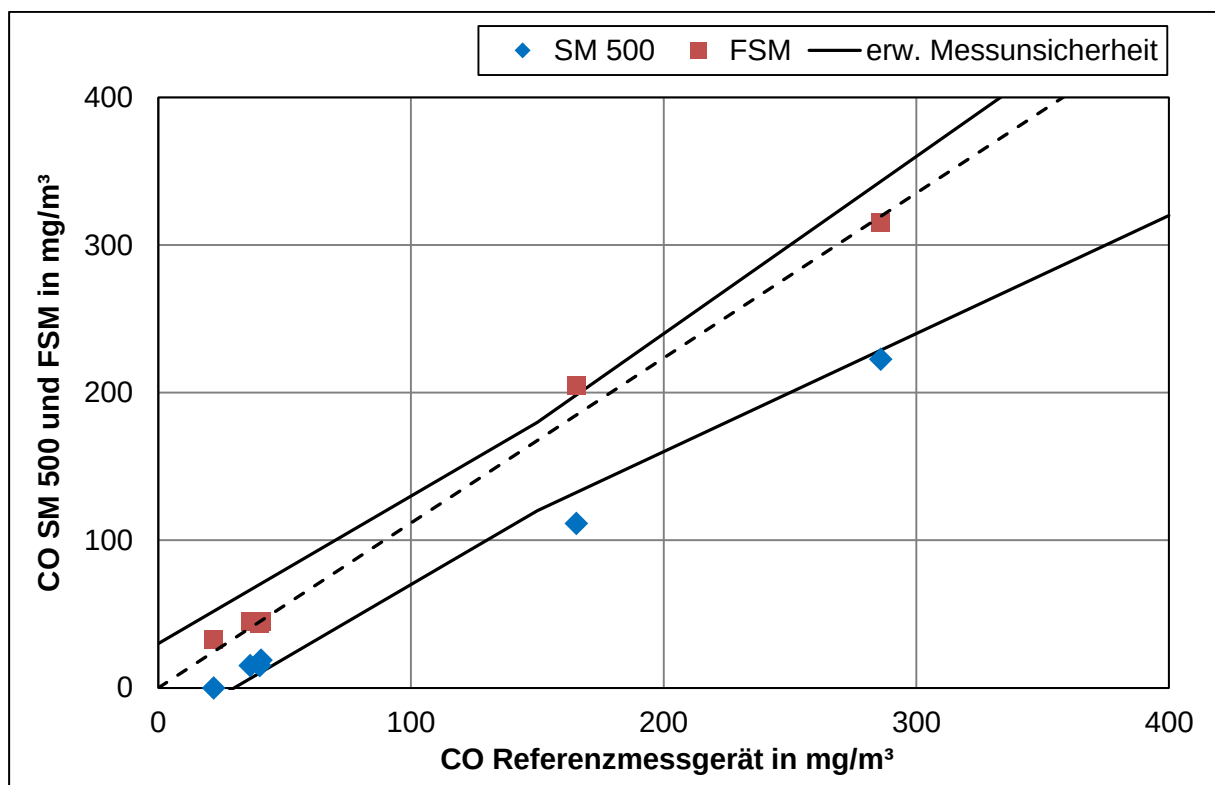
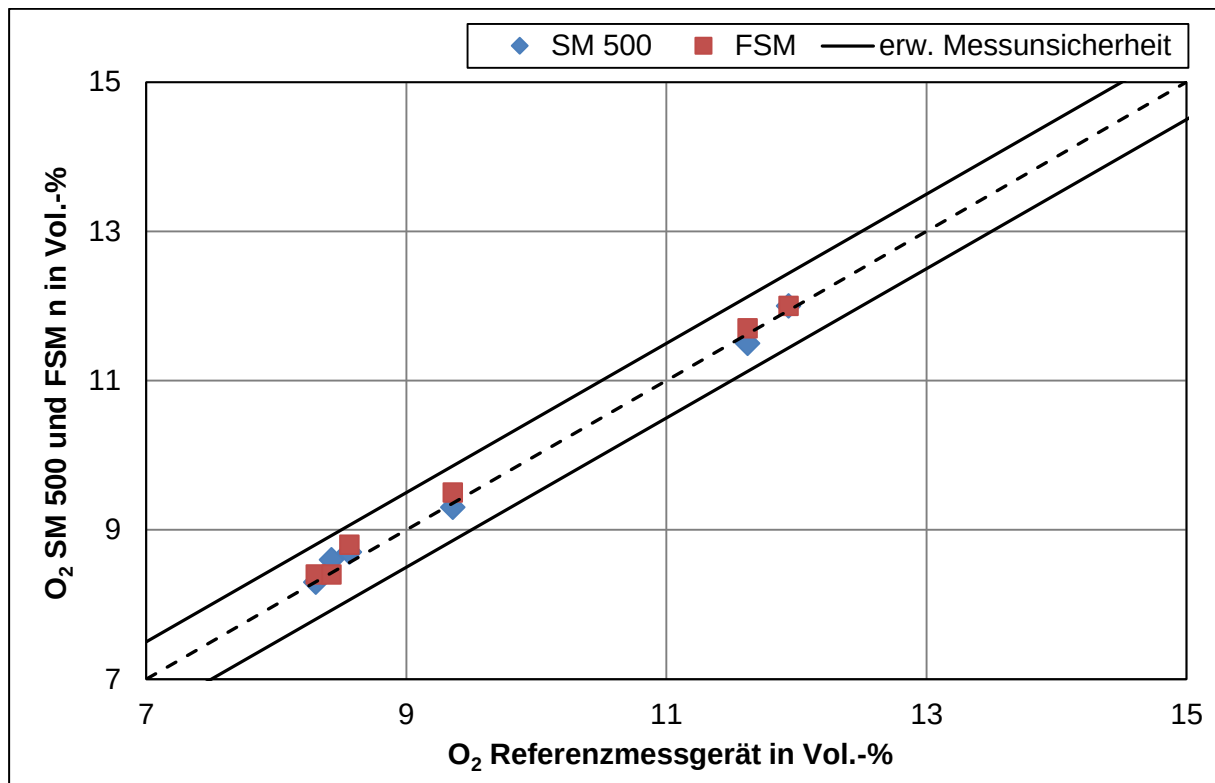


Abbildung 5.25 Feldmessungen Anlage 3 - O₂-Konzentrationen (oben) und unbezogene CO-Konzentrationen (unten) des Referenzmessgerätes jeweils im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit: O₂ $\pm$ 0,5 Vol.-% und CO $\pm$ 20 %)

Bei Anlage 3 bewegen sich die gemessenen O₂-Konzentrationen in einem Bereich von 8,3 bis 11,9 Vol.-% und alle Messwerte der Schornsteinfegermessgeräte liegen innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit und streuen vergleichsweise gering um die Sollwertlinie.

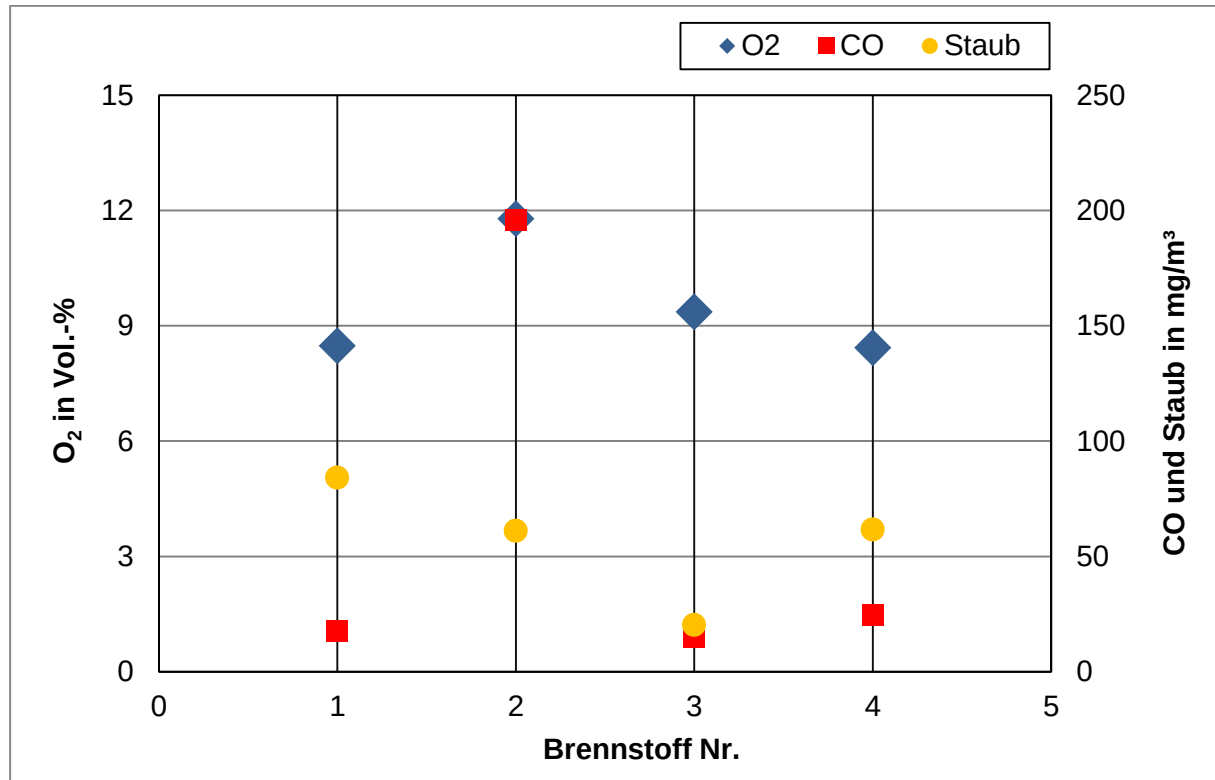
Die CO-Konzentrationen liegen in einem Bereich von ca. 20 bis rund 290 mg/m³ (unbezogen) und liegen nicht vollständig innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit. Beim FSM liegt ein Wert im mittleren Konzentrationsbereich bei dieser Anlage knapp außerhalb der Anforderungen und beim SM 500 liegen zwei Messwerte außerhalb der Anforderungen. Im SM 500 ist nur ein CO-Sensor für hohe Konzentrationen eingebaut, weshalb die geringen CO-Konzentrationen von unter 100 mg/m³ nicht exakt gemessen und deshalb auch nicht bewertet werden können.

Alle CO-Messwerte die außerhalb der Anforderungen liegen wurden am 23.2.2016 ermittelt, bei einer Messung betraf dies sowohl das FSM als auch das SM 500, allerdings wich das FSM nach oben und das SM 500 nach unten ab. Bei der anderen Messung an diesem Tag zeigte auch ein Staubmesswert beim SM 500, der an der Messstelle MS 3 ermittelt wurde, einen deutlichen Mehrbefund.

Die bei dieser Anlage mit dem Referenzmessgerät gemessenen geringen CO-Konzentrationen von unter 100 mg/m³ werden vom FSM mit geringen Abweichungen ebenfalls ermittelt, wobei in der Tendenz etwas zu hohe CO-Konzentrationen angezeigt werden.

Die höchsten O₂- und CO-Konzentrationen wurden bei der Anlage 3 am 23.02.2016 bei der Verbrennung von Säge- und Hobelreste mit hohem Feinanteil gemessen. Die gemessenen Staubkonzentrationen zeigen keine Abhängigkeit zur verfeuerten Brennstoffqualität, auch ist für die anderen drei Brennstoffqualitäten kein Zusammenhang zur CO- und O₂-Konzentration erkennbar, siehe Abbildung 5.26. Allerdings änderte sich nicht nur die Brennstoffqualität, sondern auch die Kesselleistung. So ist anhand der Abgastemperaturen und der O₂-Konzentrationen ersichtlich, dass der Heizkessel während den Messungen mit unterschiedlichen Leistungen betrieben wurde. Am 23.02.2016 war die Wärmeleistung geringer (Abgastemperatur ca. 130 °C, O₂ ca. 11,8 Vol.-%) mit den höchsten unbezogenen CO-Konzentrationen (ca. 170 bis 290 mg/m³). Am 08.03.2016 war die Kesselleistung höher (Abgastemperatur ca. 170 °C, O₂ ca. 8,5 Vol.-%) und die unbezogene CO-Konzentrationen geringer (ca. 40 mg/m³). Dass die Brennstoffqualität doch den entscheidenden Einfluss auf die CO-Konzentration hat ist im Vergleich zur Messung am 01.03.2016 ersichtlich. Hier wurden mit Holzpellets bei ähnlicher Kesselleistung (Abgastemperatur ca. 140 °C) nahezu die Werte der hohen Kesselleistung erreicht (O₂ 9,4 Vol.-%, CO unbezogen 22 mg/m³).

Anlage 3 dient zur Wärmeversorgung (Heizwärme und Warmwasser) eines Gewerbebetriebs. In das Heiznetz ist u.a. ein größerer Pufferspeicher integriert. Sinkt die Temperatur im Pufferspeicher unter den Sollwert wird der Kessel gestartet und heizt den Pufferspeicher wieder auf. Der Heizkessel hat nur eine kurze Start- und Stabilisierungsphase, danach folgt der Heizbetrieb mit Verbrennungsregelung. Wird die Sollwerttemperatur für die Pufferspeicherladung erreicht, erfolgt die Kesselabschaltung.



- | | |
|--|---|
| <p>1 feine Hackschnitzel</p> <p>2 Säge- und Hobelreste (hoher Feinanteil)</p> <p>zu 1 hier liegen keine Messwerte für CO und O₂ der Referenzmessgeräte vor. Für Darstellung wurden stattdessen die Mittelwerte der Schornsteinfegermessgeräte verwendet</p> | <p>3 nahezu reine Holzpellets</p> <p>4 feine Hackschnitzel und Hobelrest, wenig Holzpellets</p> |
|--|---|

Abbildung 5.26 Feldmessungen Anlage 3 - Zusammenhang zwischen gemessenen O₂-, CO- und Staubkonzentrationen im Abgas und verfeuerter Brennstoffqualität (Mittelwerte der vier Messtage für Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂)

Je nach Wärmebedarf waren die Kesselaufzeiten für den Ladevorgang ausreichend für 1 bis 3 Messungen. Nach dem Ladevorgang schloss sich meist eine längere Stillstandszeit an. Aufgrund der hydraulischen Verschaltung des Heizkessels mit dem Pufferspeicher und dem Heiznetz lag die Kesseltemperatur immer oberhalb von 70 °C.

Die auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen Staubkonzentrationen liegen bei der Anlage 3 in einem Bereich von 20 bis 64 mg/m³ (Mittelwert von 6 Messungen: 55 mg/m³). Bei einem Grenzwert für Holzpellets von 0,06 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) liegen alle mit dem Referenzmessverfahren ermittelten Staubkonzentrationen unterhalb des Grenzwertes (ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit).

Die mit dem Referenzmessgerät gemessenen und auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen CO-Konzentrationen liegen bei den Messungen an der Anlage 3 in einem Bereich von ca. 20 bis rund 240 mg/m³ (Mittelwert von 6 Messungen: 80 mg/m³) und damit immer deutlich unterhalb des CO-Grenzwertes von 0,8 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂).

Abbildung 5.27 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas von Anlage 3 während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂) dargestellt. An der Anlage wurden zwischen Feldmesskampagne und

Schornsteinfegermessungen Wartungs- und Reparaturarbeiten an der Brennstoffbeschickung durchgeführt. Reinigungsarbeiten (Kesselreinigung) wurde keine vorgenommen. Die Anlage war, mit Ausnahme einer Störung in der Brennstoffbeschickung (Rückbrand) bei der Messung am 08.03.2016 immer in einem technisch ordnungsgemäßen Zustand, es waren keine offensichtlichen Mängel erkennbar. Der Einfluss einer zunehmenden Verschmutzung (z.B. im Wärmeübertrager) auf die Staub- und CO-Konzentrationen ist anhand der Messwerte nicht erkennbar. Die Schwankungen der Messwerte wurden vor allem durch wechselnde Brennstoffqualitäten verursacht.

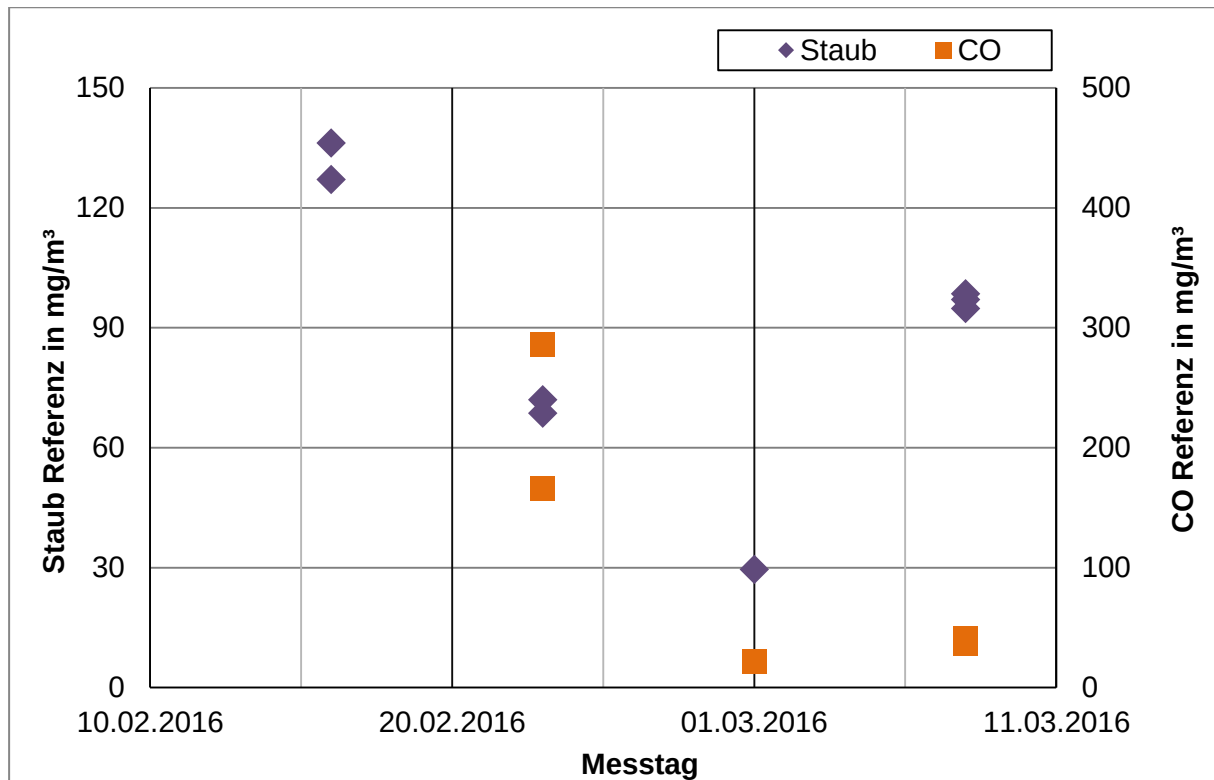


Abbildung 5.27 Feldmessungen Anlage 3 - Zeitlicher Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂)

5.2.7 Vergleichsmessungen an Anlage 4 - Stückholzkessel

In Abbildung 5.28 sind die an der Anlage 3 mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen unbezogenen Staubkonzentrationen in Abhängigkeit der Ergebnisse des Standardreferenzmessverfahrens gezeigt. Mit eingezeichnet sind die beiden Linien für die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) geforderte erweiterte Messunsicherheit.

Staubkonzentrationen von unter 200 mg/m³ (unbezogen) konnten bei diesem Stückholzkessel nur während der Ausbrandphase gemessen werden. Dies war bei den zwei Messungen am 16.02.2016 der Fall. Bei diesen Messungen werden die Anforderungen an die Schornsteinfegermessgeräte bezüglich der erweiterten Messunsicherheit eingehalten, die Messpunkte liegen nahezu auf der Sollwertlinie. Beide Messungen wurden mit Ende der Haupt-

verbrennungsphase und Beginn der Ausbrandphase (Holzkohleabbrand) gestartet. Aufgrund stark schwankender CO- und O₂-Konzentrationen während der Hauptverbrennung (Anzeige Kessel-Display: Voll-Last) war bei dieser Anlage nicht ohne weiteres erkennbar, wann diese Verbrennungsphase beendet war. Auch im Kesseldisplay erfolgte erst vergleichsweise spät der Hinweis, dass sich der Kessel im Zustand „Grundglut“ befindet.

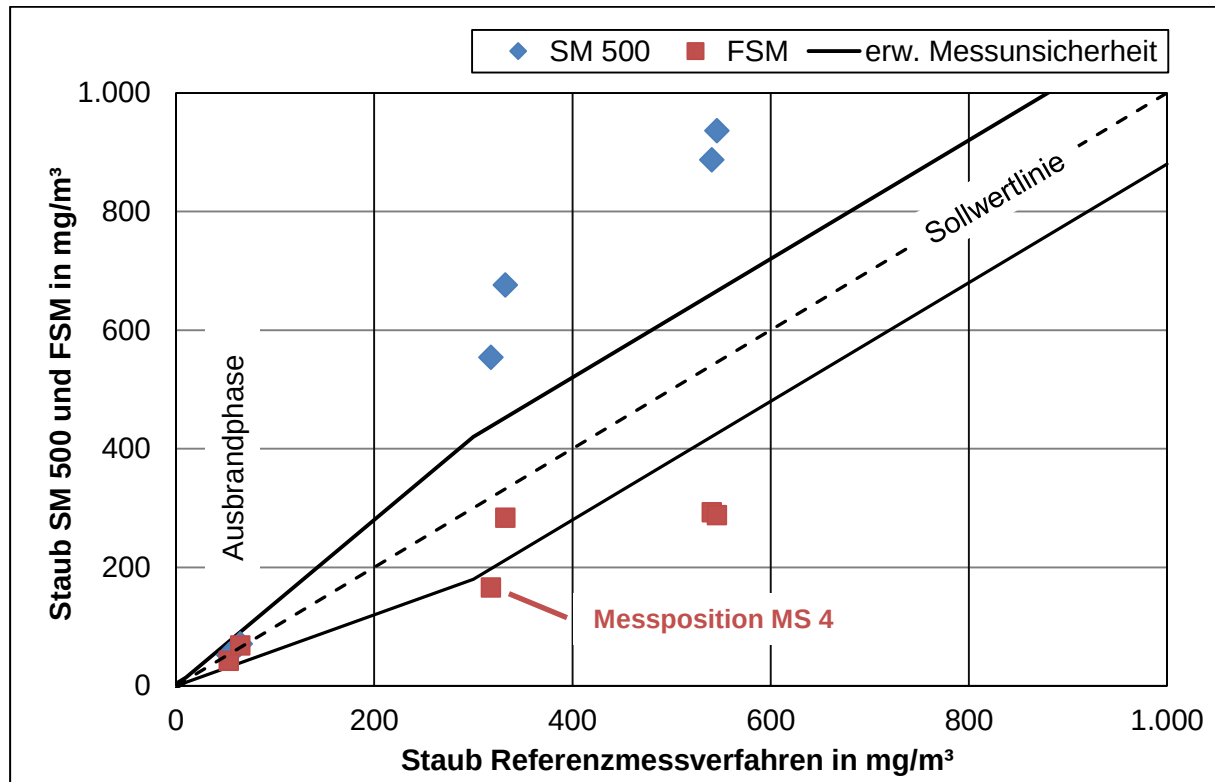


Abbildung 5.28 Feldmessungen Anlage 4 - Staubkonzentrationen (unbezogen) des Referenzmessverfahrens im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM (mit angegeben: Anforderung an erweiterte Messunsicherheit $\pm 40\%$)

Bei allen anderen Messungen wurden mit dem Referenzmessverfahren Staubkonzentrationen (unbezogen) im Bereich von 318 bis 546 mg/m³ ermittelt. Diese liegen alle außerhalb des geprüften und bekanntgegebenen Messbereiches der Schornsteinfegermessgeräte (siehe Tabelle 2.2). Dieser Umstand alleine würde allerdings nicht erklären, weshalb die meisten Messergebnisse bei den hohen Staubkonzentrationen außerhalb der Anforderungen an die erweiterte Messunsicherheit nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 (2015) liegen, da bei einer Eignungsprüfung für die Messgeräte auch Staubkonzentrationen bis 450 mg/m³ zur Bewertung der Schornsteinfegermessgeräte herangezogen werden können.

Die Ursache für die großen Abweichungen der Staubkonzentrationsbestimmungen mit den Schornsteinfegermessgeräten im Vergleich zu Referenzmessverfahren ist bei Anlage 4 vielmehr im extrem hohen Teergehalt im Abgas während der Hauptverbrennungsphase zu sehen. Sind Teere im Abgas in höheren Anteilen vorhanden, erhöht sich im Grundsatz auch die Messunsicherheit beim Referenzmessverfahren, da sich diese nur teilweise und in unterschiedlichen Anteilen durch Spülen aus der Staubsonde entfernen lassen. In der Tendenz wird dann eine zu geringe Staubkonzentration gemessen.

Bei hohen Teerkonzentrationen kommt der Filtrationstemperatur auch eine größere Bedeutung zu, da bei höheren Temperaturen ein Teil der Teere die Filter gasförmig durchströmen können und somit nicht als Partikel erfasst werden. Diese Teere kondensieren dann bei tieferen Temperaturen, z.B. an der Schornsteinmündung.

Beim SM 500 liegt die Filtrationstemperatur bei ca. 70 bis 75 °C, beim Referenzmessverfahren lag diese bei Anlage 4 im Bereich von 91 bis 126 °C. So wurde auch beim Öffnen des Planfilterkopfgerätes bei Probenahmen mit hohen Teergehalten beobachtet, dass etwas Rauch von der Filteroberfläche aufsteigt. Die Minderbefunde beim Referenzmessverfahren durch unvollständig erfasste Teere könnten somit die Ursache für die Unterschiede zu den mit dem SM 500 gemessenen höheren Staubkonzentrationen sein.

Beim FSM wird vermutet, dass sich ein Teil der Teere in der nicht beheizten Entnahmesonde niederschlägt und zu den meist auftretenden Minderbefunden bei Staubkonzentrationen über 200 mg/m³ (unbezogen, Messwert des Referenzverfahrens) führt.

Die auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen und mit dem Referenzmessverfahren ermittelten Staubkonzentrationen bei der Anlage 4 (mit Ausnahme der Messungen in der Ausbrandphase) liegen in einem Bereich von 191 bis 366 mg/m³ (Mittelwert von 4 Messungen: 274 mg/m³). Bei einem Grenzwert von 0,10 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) liegen alle mit dem Referenzmessverfahren ermittelten Staubkonzentrationen deutlich über dem Grenzwert (ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit).

Werden die Messwerte des Feinstaubmessgerätes FSM zur Bewertung herangezogen, gilt dies auch für alle Messungen an den Messstellen MS 2 und MS 3 (siehe Abbildung 5.4). Hier liegen die auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen Staubkonzentrationen zwischen 180 und 195 mg/m³ und mit Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit zwischen 108 und 117 mg/m³ (entsprechend 0,11 bis 0,12 g/m³) und damit knapp über dem Grenzwert für die Anlage von 0,10 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂).

Wird allerdings das Messergebnis des FSM an der Messposition MS 4 (siehe Abbildung 5.4) herangezogen (unbezogene Staubkonzentration: 166 mg/m³; auf 13 Vol.-% O₂ bezogene Staubkonzentration: 102 mg/m³), dann liegt der um die erweiterte Messunsicherheit reduzierte Messwert bei 61 mg/m³ (entsprechend 0,06 g/m³) und damit unterhalb des Grenzwertes. An Messposition MS 4 erfolgte laut Anlagenbetreiber die Abnahmemessung des Heizkessels durch den zuständigen Schornsteinfeger.

Abbildung 5.29 (oben) zeigt für die Anlage 4 die bei den Feldmessungen gemessenen O₂-Konzentrationen der Schornsteinfegermessgeräte in Abhängigkeit des Referenzmessgerätes, die durchgezogenen Linien markieren den Bereich der zulässigen erweiterten Messunsicherheit von ± 0,5 Vol.-% nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010).

Die gemessenen O₂-Konzentrationen bei Anlage 4 liegen im Bereich von 7,7 bis 15,3 Vol.-% und alle Messwerte der Schornsteinfegermessgeräte liegen innerhalb der geforderten erweiterten Messunsicherheit, bei einem vergleichsweise geringem Abstand zur Sollwertlinie.

Die 15-Minuten Mittelwerte über 10 Vol.-% (11,6 bzw. 15,3 Vol.-% beim Referenzmessgerät) wurden während der Ausbrandphase ermittelt. Während des Vollastbetriebes in der Hauptverbrennungsphase des Stückholzkessels werden niedrigere O₂-Konzentrationen im Bereich von 7,7 bis 9,1 Vol.-% (als 15-Minuten Mittelwerte) gemessen.

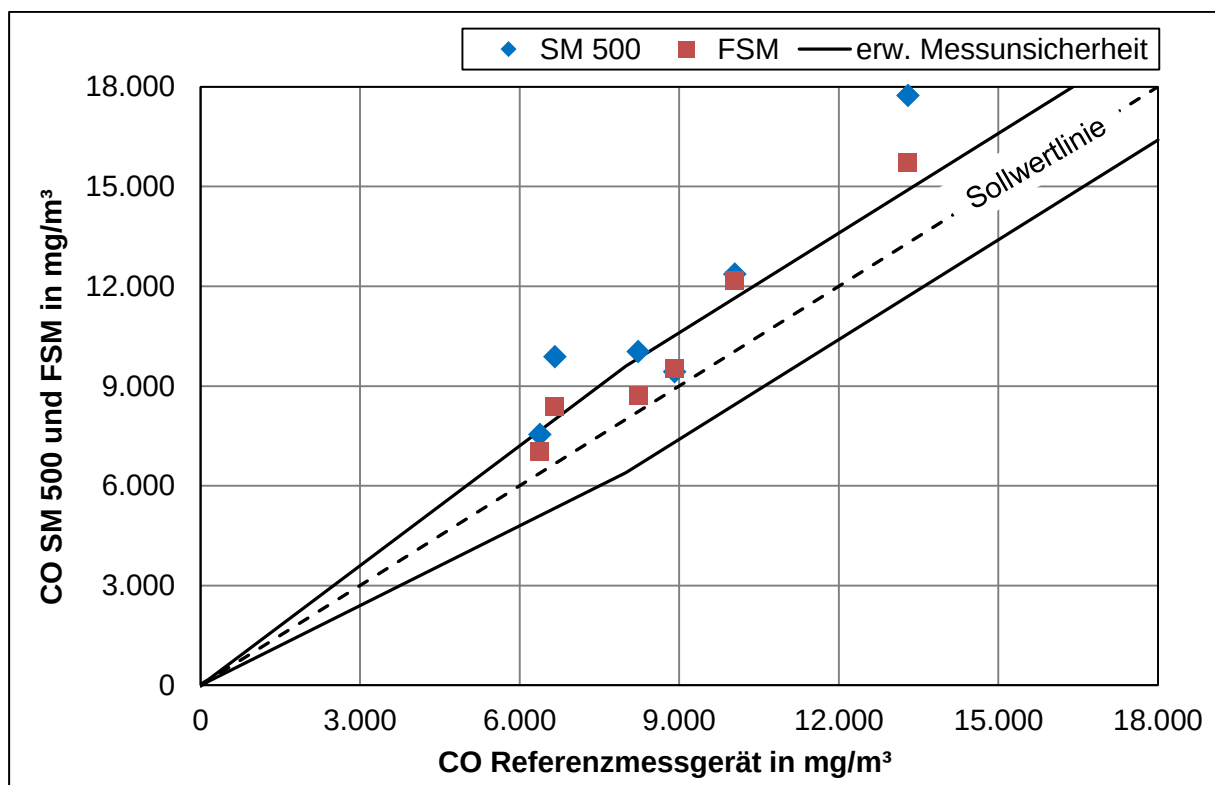
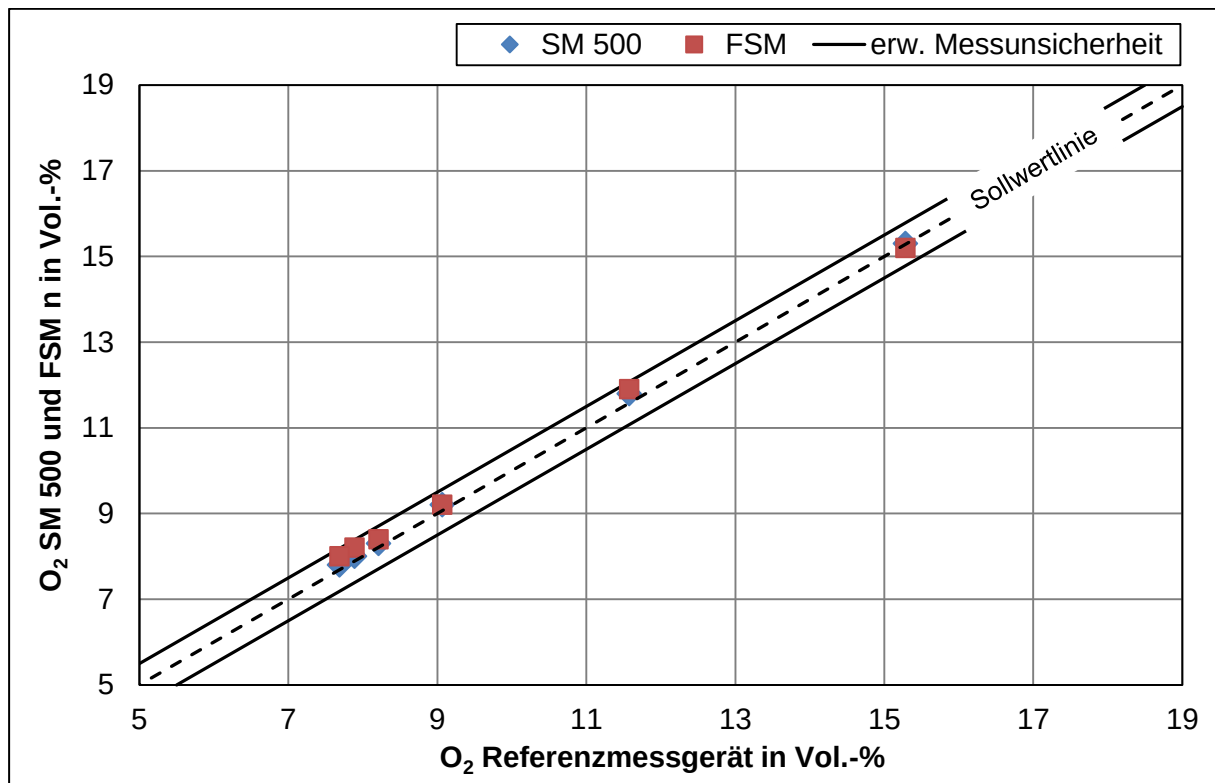


Abbildung 5.29 Feldmessungen Anlage 4 - O₂-Konzentrationen (oben) und unbezogene CO-Konzentrationen (unten) des Referenzmessgerätes jeweils im Vergleich zum Wöhler SM 500 und Feinstaub-Messgerät FSM (Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit: O₂ ± 0,5 Vol.-% und CO ± 20 %)

Der Messwert beim Feinstaub-Messgerät FSM (8,0 Vol.-% O₂) an der Messposition MS 4 ist gegenüber den Messwerten an den anderen Messpositionen (Referenzmessverfahren Messposition MS 1: 7,7 Vol.-% O₂; SM 500 Messposition MS 2: 7,8 Vol.-% O₂) nur geringfügig erhöht und wird in der Abbildung deshalb nicht gekennzeichnet.

In Abbildung 5.29 (unten) sind die mit dem Referenzmessverfahren und mit den Schornsteinfegermessgeräten gemessenen CO-Konzentrationen aufgeführt. Mit eingezeichnet ist die nach VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1 (2010) geforderte erweiterte Messunsicherheit von 20 %.

Unabhängig vom Verbrennungszustand (Hauptverbrennungs- oder Ausbrandphase) liegen die CO-Konzentrationen immer auf einem sehr hohen Niveau in einem Bereich von ca. 6.300 bis 13.300 mg/m³ (unbezogen, Messwerte des Referenzmessgerätes). Die Messwerte des FSM liegen, bis auf zwei Ausnahmen, innerhalb der Grenzen für die erweiterte Messunsicherheit. In der Tendenz werden hierbei etwas zu hohe Werte gemessen.

Die Messung mit dem Feinstaub-Messgerät FSM an der Messposition MS 4 ergab eine CO-Konzentration in Höhe von 8.376 mg/m³ (unbezogen). Mit dem Referenzmessgerät wurde bei dieser Messung zeitgleich an der Messposition MS 1 eine CO-Konzentration in Höhe von 6.662 mg/m³ (unbezogen) ermittelt. Im Vergleich zu den anderen Messungen mit dem FSM an den Messpositionen MS 2 und MS 3 bei der Anlage 4 ist die Messung an MS 4 nicht auffällig, weshalb diese in der Abbildung nicht gekennzeichnet ist.

Beim SM 500 liegen 4 von 6 Messungen außerhalb den Grenzen für die erweiterte Messunsicherheit, hohe CO-Konzentrationen werden gegenüber dem Referenzmessgerät deutlich überhöht erfasst. Ursache könnte eine zu geringe Kompensation der Wasserstoff-Querempfindlichkeit sein, wenn davon ausgegangen wird, dass bei der sehr unvollständigen Verbrennung im Stückholzkessel auch höhere Konzentrationen von H₂ im Abgas vorlagen.

Die mit dem Referenzmessgerät gemessenen und auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen CO-Konzentrationen liegen bei den Messungen an der Anlage 4 in einem Bereich von ca. 4.000 bis rund 8.900 mg/m³ (Mittelwert von 6 Messungen: 6.830 mg/m³) und damit immer deutlich über dem CO-Grenzwert der Anlage von 1,0 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂).

Anlage 4 dient zur Wärmeversorgung (Heizwärme und Warmwasser) eines Gewerbebetriebs. In das Heiznetz ist u.a. ein größerer Pufferspeicher integriert. Der Stückholzkessel wird in der Regel am frühen Morgen jeden Werktags einmal betrieben. Sinkt danach die Temperatur im Pufferspeicher unter den Sollwert wird der Pelletkessel (Anlage 3) gestartet und heizt den Pufferspeicher wieder auf.

Der Anbrennvorgang beim Stückholzkessel wird mit Papier/Kartonagen und feineren Holzstücken vorgenommen. Nach dem Anbrennvorgang erfolgt die Aufgabe der Holzcharge, wobei das Volumen des Füllraumes meist komplett ausgenutzt wird. Der Kesselbetrieb wird von der Kesselregelung gesteuert und läuft automatisch ab. Eingriffe durch den Betreiber erfolgen in der Regel nicht. Der Kessel besitzt eine Sauerstoffregelung mit λ-Sonde. Das typische Regelverhalten des Stückholzkessels ist in Abbildung 5.30 dargestellt.

Die Ergebnisse der an dieser Anlage durchgeführten Messungen deuten darauf hin, dass im Regelverhalten oder in der Grundeinstellung für den Volllastbetrieb des Stückholzkessels die Ursache für die überhöhten Emissionen und das schlechte Abbrandverhalten zu sehen ist.

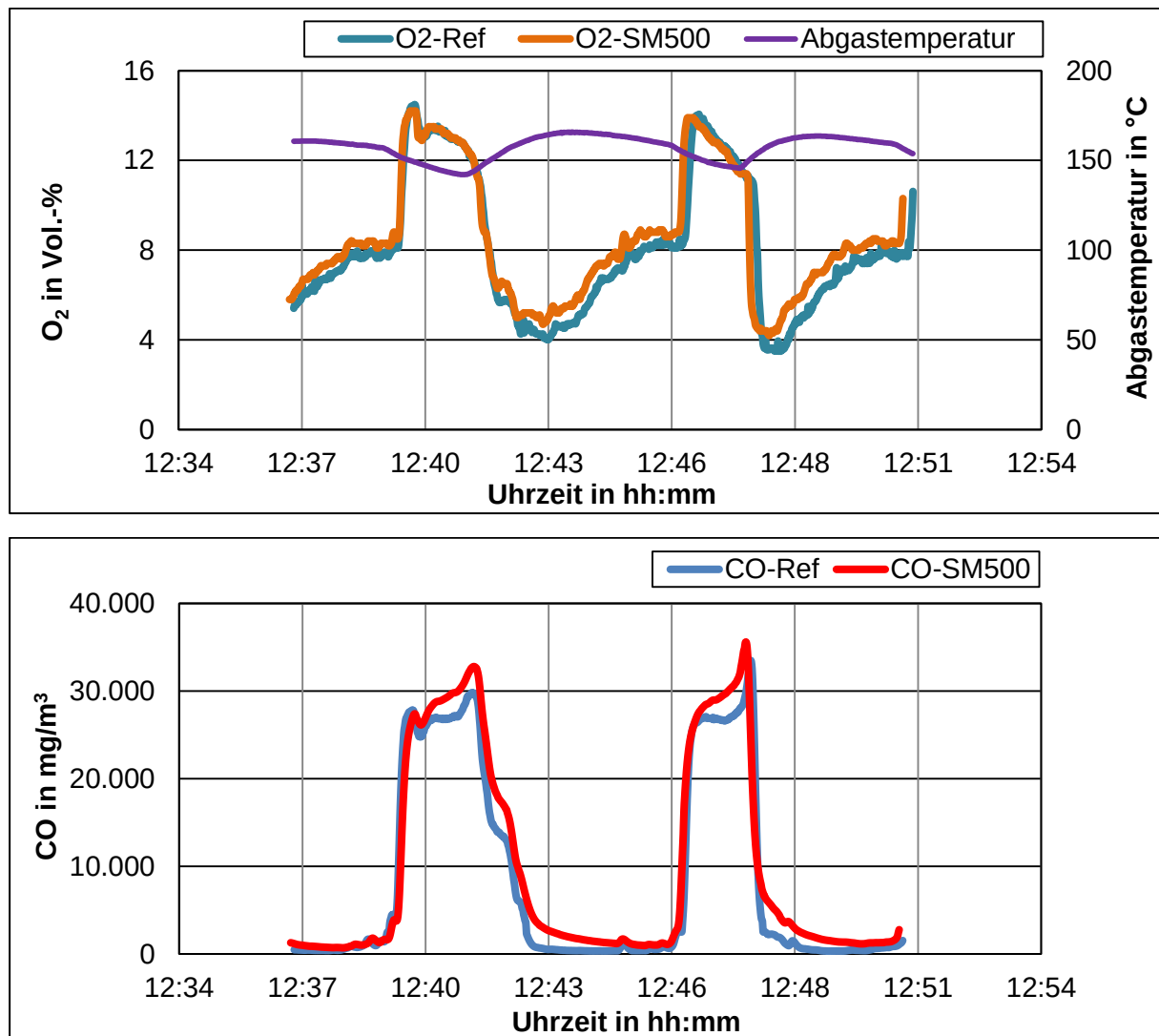


Abbildung 5.30 Verläufe der O₂- (oben) und CO-Konzentrationen (unten) im Abgas der Anlage 4 während der 1. Staubmessung am 23.2.2016 - Referenzmessgeräte im Vergleich zum SM 500

Die Leistungsregelung des Heizkessels (Primärluftregelung) versucht, einen festgelegten Bereich der Abgastemperatur während des Leistungsbrandes (Vollastbetrieb) zu erreichen und zu halten. Das hat zur Folge, dass die Primärluftmengen während der Vollastphase verändert werden, da bei zu hoher Leistung diese gedrosselt und bei zu geringer Leistung diese erhöht wird. Wird die Kesselleistung mittels Primärluftminderung gedrosselt, sinkt die Abgastemperatur kontinuierlich ab und die O₂-Konzentration steigt an. Bei O₂-Konzentrationen im Bereich von 8 Vol.-% ergeben sich geringe CO-Konzentrationen. Bei Erreichen der unteren Temperaturschwelle für den Sollwertbereich der Abgastemperatur wird die Primärluftmenge stark erhöht, damit die Kesselleistung ansteigt. Da die Verbrennung der schnellen Änderung nicht folgen kann, steigen die CO-Konzentrationen überaus stark an, gleichzeitig nimmt auch der Luftüberschuss im Abgas deutlich zu. Möglicherweise liegen hier auch ungünstige Mischungsbedingungen von Verbrennungsluft und Verbrennungsgasen vor.

In Abbildung 5.31 ist der zeitliche Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas von Anlage 4 während der Feldmesskampagne dargestellt.

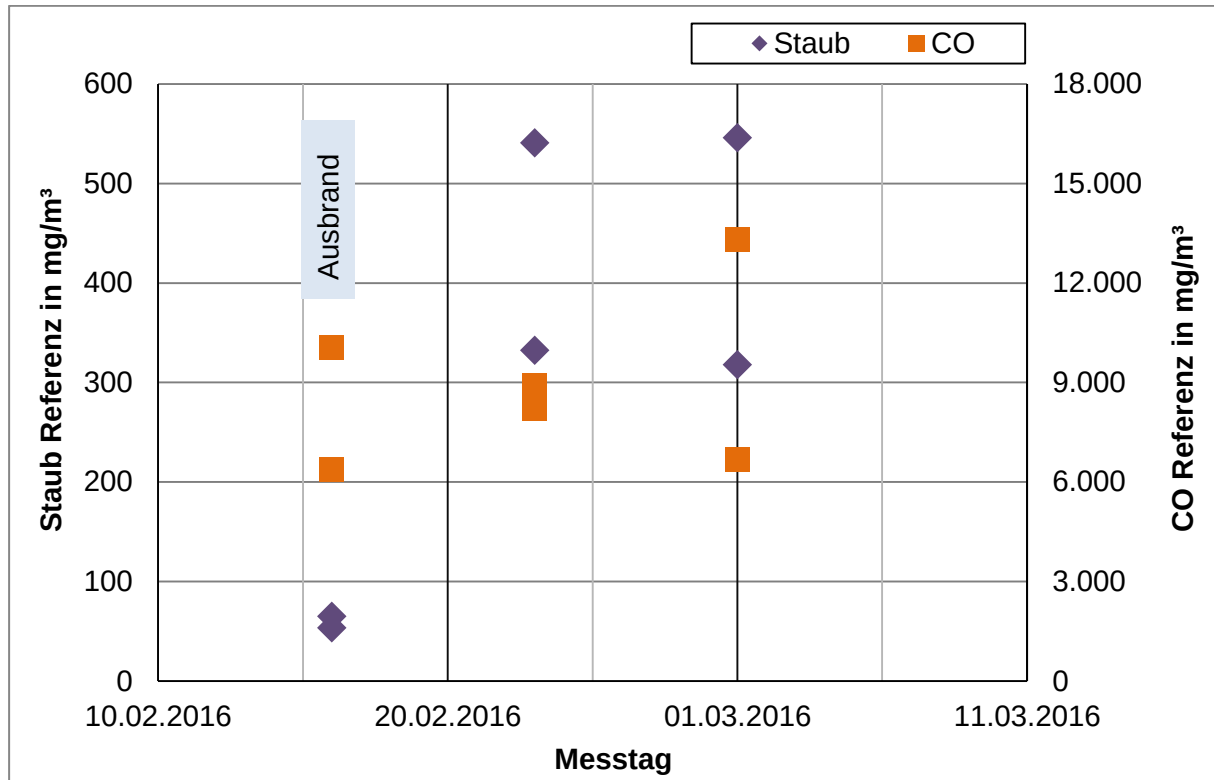


Abbildung 5.31 Feldmessungen Anlage 4 - zeitlicher Verlauf der CO- und Staubkonzentrationen im Abgas während der Feldmesskampagne (Referenzmessgeräte, CO und Staub: bezogen auf 13 Vol.-% O₂)

An der Anlage wurden während den Messungen, mit Ausnahme des Wechsels vom Abgasgebläse des Heizkessels zwischen den Messungen am 23.02. und 01.03.2016, keine Wartungs- oder Reparaturarbeiten durchgeführt. Wöchentlich erfolgte eine Kesselreinigung. Die Anlage war immer in einem technisch ordnungsgemäßen Zustand, es waren keine offensichtlichen Mängel erkennbar. Ein Einfluss des Reinigungszustandes oder der Austausch des Kesselgebläses auf die Staub- und CO-Konzentrationen ist anhand der Messwerte nicht erkennbar. Die Schwankungen und die Höhe der Messwerte wurden bei dieser Anlage durch die momentane Verbrennungsqualität und das Regelverhalten des Kessels bestimmt.

5.3 Messungen der Schornsteinfeger

An den Anlagen 1 bis 3 wurden jeweils gemeinsam Messungen mit den zwei zuständigen Schornsteinfegern und ihren eigenen Messgeräten durchgeführt. Vom IFK wurde hierbei parallel das SM 500 und das FSM eingesetzt, die Referenzmessverfahren konnten u.a. aufgrund der schlechten Zugänglichkeit der Anlagen nicht parallel eingesetzt werden. Die Schornsteinfeger verwendeten beide eigene Messgeräte, in beiden Fällen war dies ein testo 380 von Fa. Testo AG in Lenzkirch. Die Geräte waren unterschiedlich alt. Das Messgerät an der Anlage 1 und 2 wurde kurz vor den Messungen neu gekauft, das Messgerät an der Anlage 3 war älter.

Aufgrund der hohen Teer- und Staubkonzentrationen bei Anlage 4 (Stückholzkessel) wurde vom Schornsteinfeger hier keine Messung durchgeführt. Es sollte der hohe Reinigungsaufwand für das Messgerät vermieden werden.

Die mit den Schornsteinfegern durchgeführten Vergleichsmessungen sind in Tabelle 5.15 aufgeführt. Eigentlich war geplant, dass alle drei Schornsteinfegermessgeräte immer zeitgleich mit den Messungen starten. Dies war aber schwierig zu realisieren, da sowohl das SM 500 als auch das testo 380 eine gewisse, nicht exakt vorhersagbare Vorlaufzeit bis zum Messbeginn benötigen. Deshalb ergaben sich unterschiedliche Startzeitpunkte, dies ist bei der Interpretation der Messergebnisse zu beachten, da bei höheren und stark schwankenden Gas- und Staubkonzentrationen der Feuerungen sich unterschiedliche Startzeiten bei den 15-Minuten Messungen auch stärker bemerkbar machen können. Dies gilt insbesondere für Messung A1-1 am Hackschnitzelkessel. Das FSM benötigt nur wenig Vorlaufzeit vor einer Messung und wurde deshalb immer zeitgleich mit dem testo 380 gestartet.

Diese Vergleichsmessungen wurden im Anschluss an die Feldmesskampagne durchgeführt. Bei den Schornsteinfegermessgeräten SM 500 und FSM traten Probleme mit den CO-Sensoren auf, weshalb bei der Messung A2-1 für das SM 500 und bei der Messung A1-2 beim FSM keine CO-Werte vorliegen.

Tabelle 5.15 Schornsteinfegermessungen - Liste der durchgeführten Messungen

Anlage	Messdatum	Messung	Start der Messungen
1	11.03.2016	A1-1	FSM und testo 380 zeitgleich, SM 500 7 min später *
		A1-2	FSM und testo 380 zeitgleich, SM 500 2,5 min später
2	11.03.2016	A2-1	FSM und testo 380 zeitgleich, SM 500 3 min früher *
		A2-2	FSM und testo 380 zeitgleich, SM 500 3 min später
3	17.03.2016	A3-1	FSM und testo 380 zeitgleich, SM 500 1,2 min früher
		A3-2	FSM und testo 380 zeitgleich, SM 500 1 min früher

* testo 380: Ausdruck der Messwerte kurz vor Messende, siehe hierzu Anhang - Tabelle 8.5

Werden beim FSM Staubkonzentrationen von $< 10 \text{ mg/m}^3$ ermittelt, wird kein Staubmesswert ausgegeben. Deshalb liegen bei den Messungen A1-1 und A1-2 keine Messwerte für das FSM vor. Bei der Messung A2-1 wurde beim testo 380 aufgrund der hohen Staubkonzentration die Messung abgebrochen, hier liegen somit für keine Komponente Messergebnisse vor.

In Abbildung 5.32 sind die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen für jede Messung mit den Schornsteinfegern dargestellt. Die O_2 -Differenzen zwischen den Messgeräten schwanken im Betrag zwischen 0,4 Vol.-% und 1,6 Vol.-%. Diese Abweichungen ergeben sich einerseits durch die unterschiedlichen Startzeitpunkte bei den Messungen und andererseits durch das unterschiedliche Messverhalten der Sauerstoffsensoren. Die größte O_2 -Differenz von 1,6 Vol.-% wird bei Messung A3-1 zwischen SM 500 und FSM (bzw. FSM und testo 380 mit 1,4 Vol.-%) erreicht. Obwohl das SM 500 im Vergleich zum FMS und testo 380 rund 1,2 Minuten früher gestartet wurde, misst das SM 500 eine ähnliche O_2 -Konzentration wie das testo 380, wogegen mit dem FSM eine höhere Konzentration ermittelt wurde. Der Startzeitpunkt ist in diesem Fall nicht die Ursache für den großen Unterschied. Es wird vermutet, dass beim

FSM eine Undichtigkeit vorlag (Verschraubung der beheizten Sonde mit Staubsammelfilter könnte sich nach der Dichtigkeitsprüfung und beim Einbau der Sonde etwas gelöst haben).

Bei den Messungen A1-1, A1-2 A2-2 und A3-2 stimmen die vom SM 500 und FSM gemessenen O₂-Konzentrationen gut überein. Bei der Messung A2-1 ergibt sich ein größerer Unterschied von (1 Vol.-%), Ursache hierfür war wahrscheinlich der unterschiedliche Startzeitpunkt für die Messungen, da die O₂-Konzentration bei dieser Messung stark schwankte. In den ersten Messminuten nahm die O₂-Konzentration von ca. 6 auf ca. 0,7 Vol.-% ab und stieg dann auf ca. 10 Vol.-% an, so dass beim FSM am Messende höhere Konzentrationen vorlagen als beim SM 500 zu Beginn der Messungen.

Obwohl das FSM und das testo 380 immer zeitgleich gestartet wurden, liegen nur bei den Messungen A1-2 und A3-2 die Messwerte dicht beieinander. Bei den Messungen an der Anlage 1 war bei der Messung A1-1 das SM 500 an der Messposition M 5, das FSM an MS Gase und das testo 380 an MS 4 eingebaut (siehe Abbildung 5.1). Bei der Messung A1-2 wurden nur die Messpositionen von SM 500 und FSM getauscht.

Bei den Messungen an der Anlage 2 (A2-1 und A2-2) wurden die Schornsteinfegermessgeräte immer an derselben Messposition eingebaut (SM 500 an MS 3, FSM an MS Gase und das testo 380 an MS 2, siehe Abbildung 5.2).

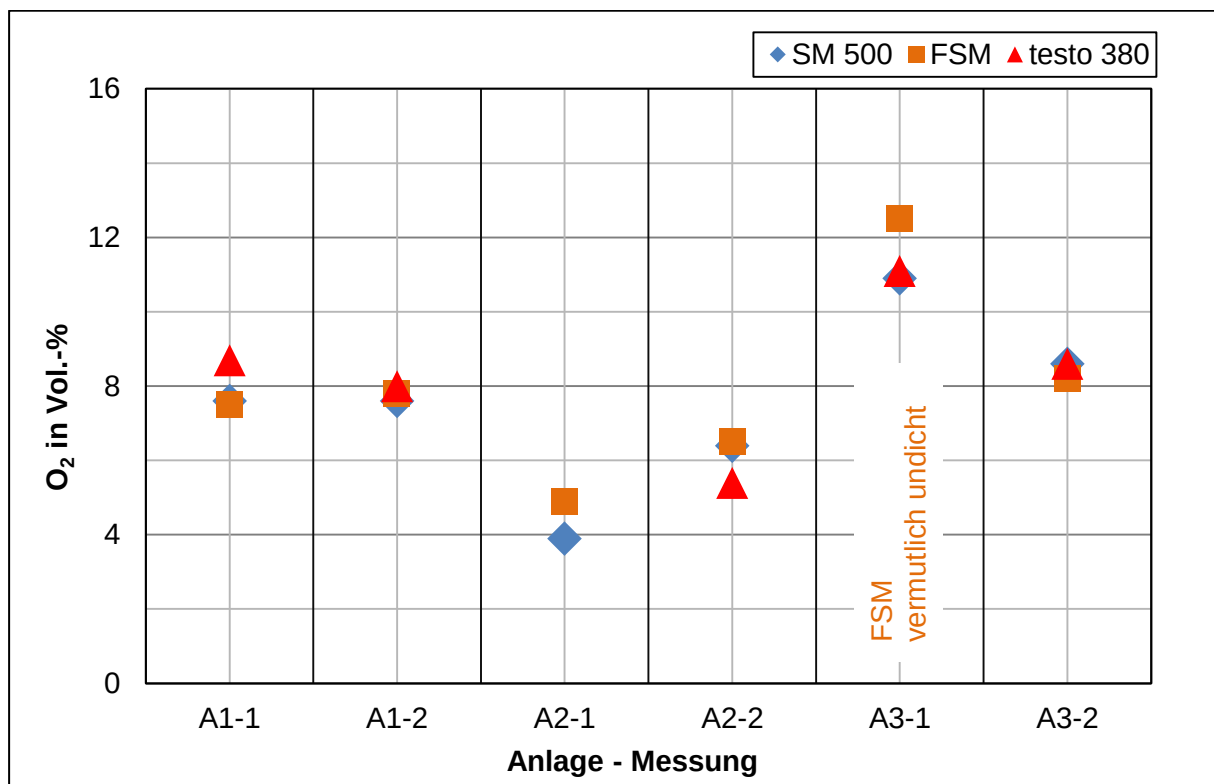


Abbildung 5.32 Schornsteinfegermessungen - O₂-Konzentrationen mit Wöhler SM 500 und Feinstaub-Messgerät FSM im Vergleich zum testo 380

An der Anlage 3 wurden bei den Messungen alle Messpositionen verändert. Bei A3-1 war das SM 500 an der Position MS 2, das FSM an MS Gase und das testo 380 an MS 3 (vor verschlossenem Zugbegrenzer) eingebaut. Bei der Messung A3-2 wurde für das SM 500 die

Messposition MS Gase, für das FSM die Position MS 3 und für das testo 380 die Stelle MS 2 gewählt, siehe Abbildung 5.3).

Die Abbildung 5.33 (oben) zeigt die gemessenen und auf 13 Vol.-% O₂ bezogenen Staubkonzentrationen während der Messungen mit den Schornsteinfegern. Bei den geringen Staubkonzentrationen an der Anlage 1 wurden vom FSM keine Messwerte ausgegeben. Die Messwerte beim SM 500 lagen unbezogen bei 20 bzw. 23 mg/m³ und damit auf vergleichbarem Niveau wie bei der Feldmesskampagne (25 bis 36 mg/m³). Der Messwert beim testo 380 lag im Bereich von 1 mg/m³ (auf 13 Vol.-% O₂ bezogen).

Bei der Messung A2-1 ergibt sich ein besonders großer Unterschied zwischen den Messwerten des SM 500 und des FSM, was durch unterschiedliche Startzeiten und den starken Änderungen der O₂-Konzentration und damit auch der Verbrennungsgüte zu erklären ist. Als mittlere O₂-Konzentrationen wurden 3,9 Vol.-% (SM 500) bzw. 4,9 Vol.-% (FSM) gemessen. Der Kessel befand sich bei dieser Messung nicht in einem normalen Betriebszustand, sondern es lagen Luftmangelsituationen mit unterschiedlicher Ausprägung vor. Aufgrund der hohen Staubkonzentration im Abgas des Pelletkessels wurde beim testo 380 die Messung wegen zu hoher Beladung abgebrochen.

Bei der nachfolgenden Messung A2-2 hatten sich die Verbrennungsbedingungen stabilisiert und die Staubkonzentration im Abgas nahm deutlich ab. Die beiden Schornsteinfegermessgeräte SM 500 und FSM zeigten bei dieser Messung die gleiche Staubkonzentration an, das testo 380 gab einen geringeren Wert aus.

Bei der ersten Messung A3-1 an der Anlage 3 wurden mit dem SM 500 und dem FSM nahezu identische bezogene Staubkonzentrationen ermittelt (Differenz: 3 mg/m³). Die unbezogenen Messwerte unterscheiden sich mit 14 mg/m³ stärker, was auf eine geringe Undichtigkeit des FSM hindeutet. Die Ergebnisse bei der Messung A3-2 unterscheiden sich in den Staubkonzentrationen für die drei Messgeräte stärker, trotz ähnlicher O₂-Konzentrationen.

In Abbildung 5.33 (unten) sind die Staubkonzentrationen unter Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheiten aufgetragen. Die Messwerte liegen deutlich näher beieinander. Ursache hierfür ist die unterschiedliche Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit. Nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) sollte diese beim Staub für alle Messgeräte einheitlich 40 % betragen und vom jeweiligen Messwert abgezogen werden. Der Weißdruck der Richtlinie wurde allerdings erst nach den Feldmessungen veröffentlicht. Damit bereits ab der Heizperiode 2015/2016 entsprechend der im Gründruck vorliegenden VDI-Richtlinie vorgegangen wird und eine einheitliche Auswertung der Messungen unter Berücksichtigung einer geräteunabhängigen erfolgt, hat der Zentralinnungsverband des Schornsteinfegerhandwerks (ZIV) unter Hinweis auf den Gründruck der Richtlinie (Juni 2014) und in Abstimmung mit den zuständigen Behörden eine entsprechende Anleitung herausgegeben (ZIV, 2015).

Diese Anleitung wurde nicht von allen Messgeräteherstellern vor Erscheinen der VDI-Richtlinie in der Auswertesoftware umgesetzt. Beim SM 500 wurde die Software entsprechend angepasst, beim FSM wurden bei der Staubmessung die gerätespezifischen erweiterten Messunsicherheiten für die jeweilige Grenzwertklasse verwendet (siehe Tabelle 2.2).

Beim testo 380 traf dies für das neue Messgerät, welches an der Anlage 1 und 2 zum Einsatz kam auch zu. Beim älteren an Anlage 3 eingesetzten Messgerät konnte nicht nachvollzogen werden, auf welcher Basis die erweiterte Messunsicherheit angesetzt wurde.

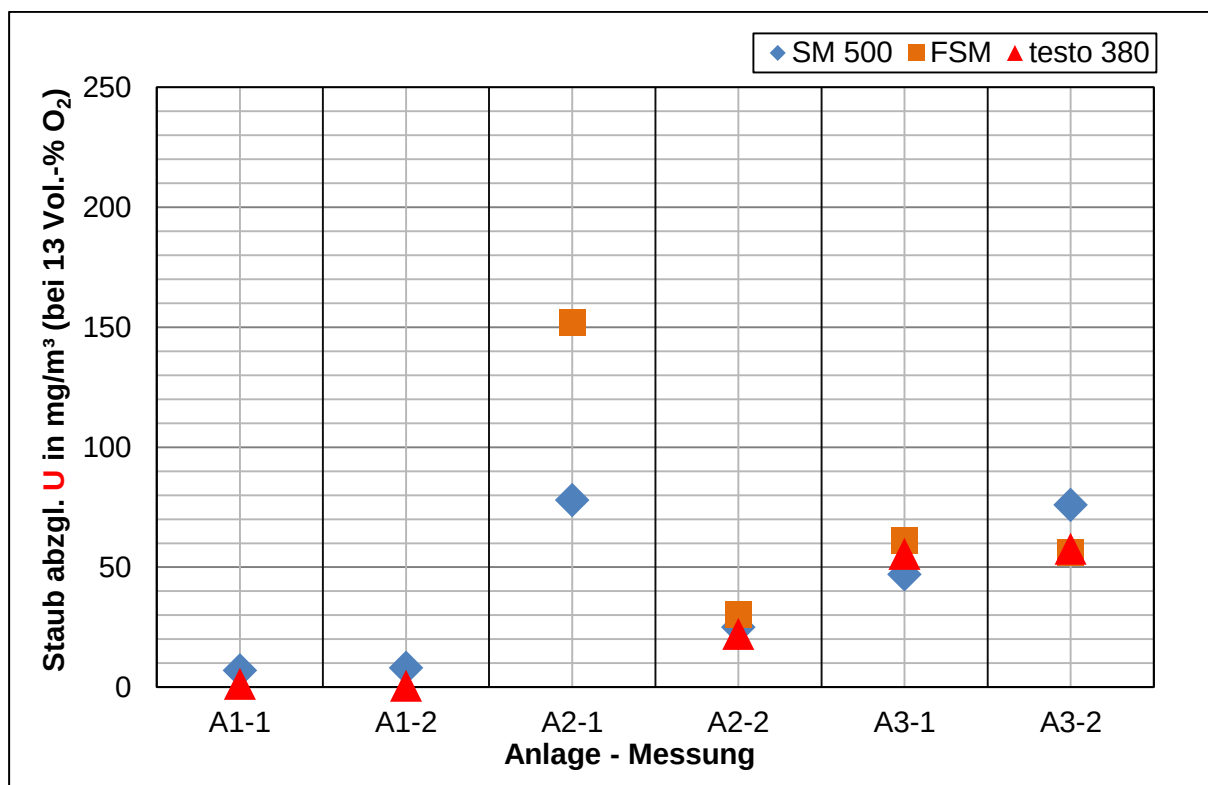
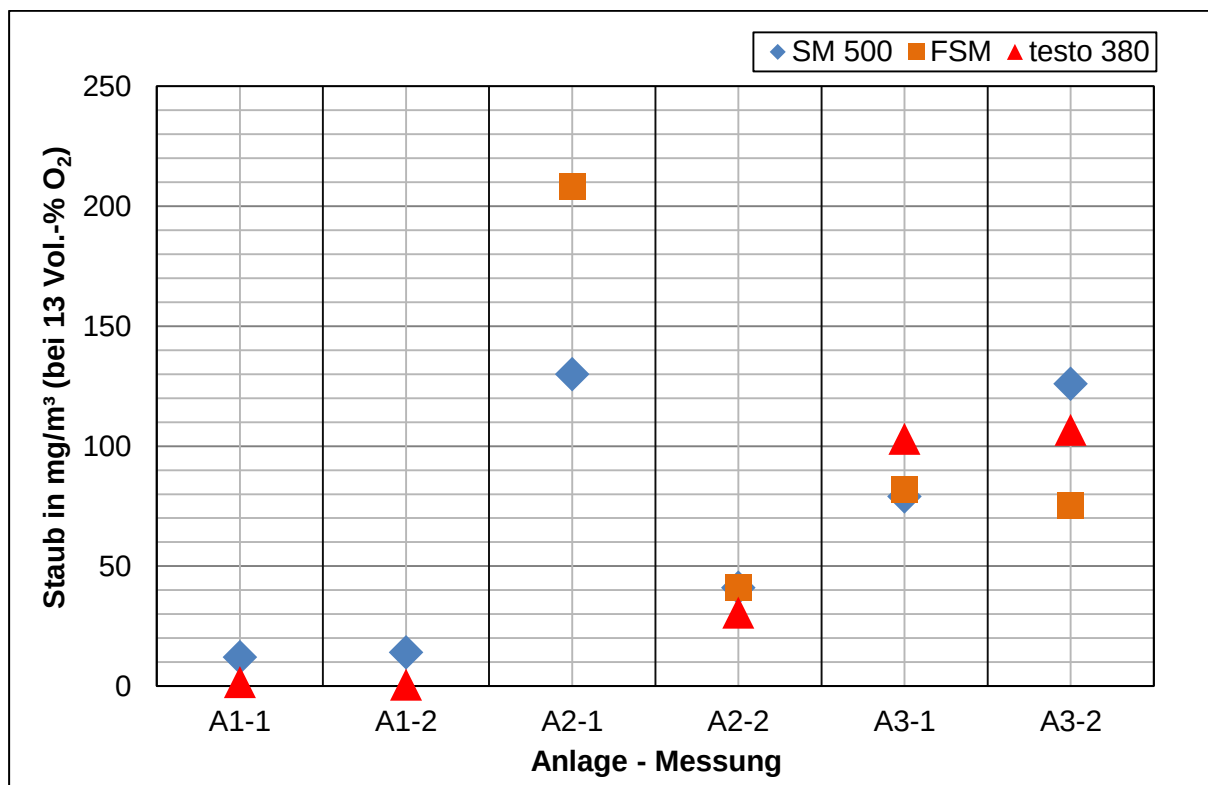


Abbildung 5.33 Schornstiefegermessungen - Staub-Konzentrationen mit Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM im Vergleich zum testo 380
oben: auf 13 Vol.-% bezogen
unten: auf 13 Vol.-% bezogen abzüglich der erweiterten Messunsicherheit U

Bei Verwendung des Zahlenwertes (siehe Tabelle 2.2) für den Grenzwert $0,10 \text{ g/m}^3$ (Grenzwert der Anlage für Hackschnitzel) ergibt sich ein erheblicher Unterschied zum Ausgabewert des Messgerätes (ca. 32 %).

In Abbildung 5.34 sind die Messwerte unter Berücksichtigung einer einheitlichen Messunsicherheit von 40 % dargestellt, wobei sich bei den Werten für das SM 500 nichts geändert hat, hier wird bereits von der Gerätesoftware diese Messunsicherheit berücksichtigt.

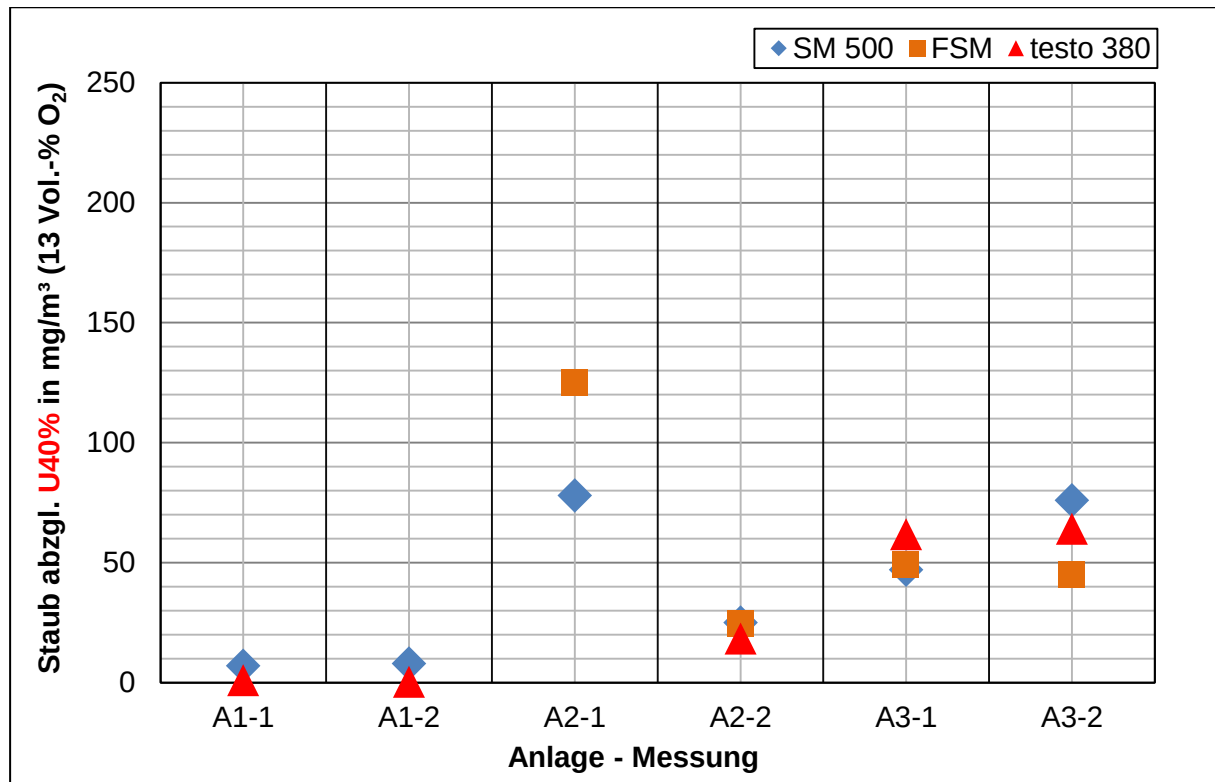


Abbildung 5.34 Schornsteinfegermessungen - Staub-Konzentrationen mit Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM im Vergleich zum testo 380 auf 13 Vol.-% bezogen abzüglich einer erweiterten Messunsicherheit U von 40%

Bei Verwendung einer einheitlichen erweiterten Messunsicherheit rücken die Messwerte bei den einzelnen Messungen z.T. etwa näher zusammen (A2-1, A2-2 und A3-2), die Werte für das FSM nehmen bei allen Messungen ab, was besonders bei den Messungen A2-1, A3-1 und A3-2 ersichtlich ist. Beim testo 380 wird der Beurteilungswert bei Verwendung der einheitlichen erweiterten Messunsicherheit bei der Messung A2-2 kleiner und bei den Messungen A3-1 und A3-2 größer.

In Abbildung 5.35 (oben) sind die gemessenen und auf 13 Vol.-% O_2 bezogenen CO -Konzentrationen während der Messungen mit den Schornsteinfegern gezeigt. Bei der Messung A1-1 an Anlage 1 liegen die Messwerte von SM 500 bzw. FSM zum testo 380 weit auseinander. Trotz des unterschiedlichen Startzeitpunktes von SM 500 und FSM werden von den beiden Messgeräten fast identische CO -Mittelwerte für die 15-Minuten Messung ermittelt. Beim testo 380 liegt der Messwert deutlich höher.

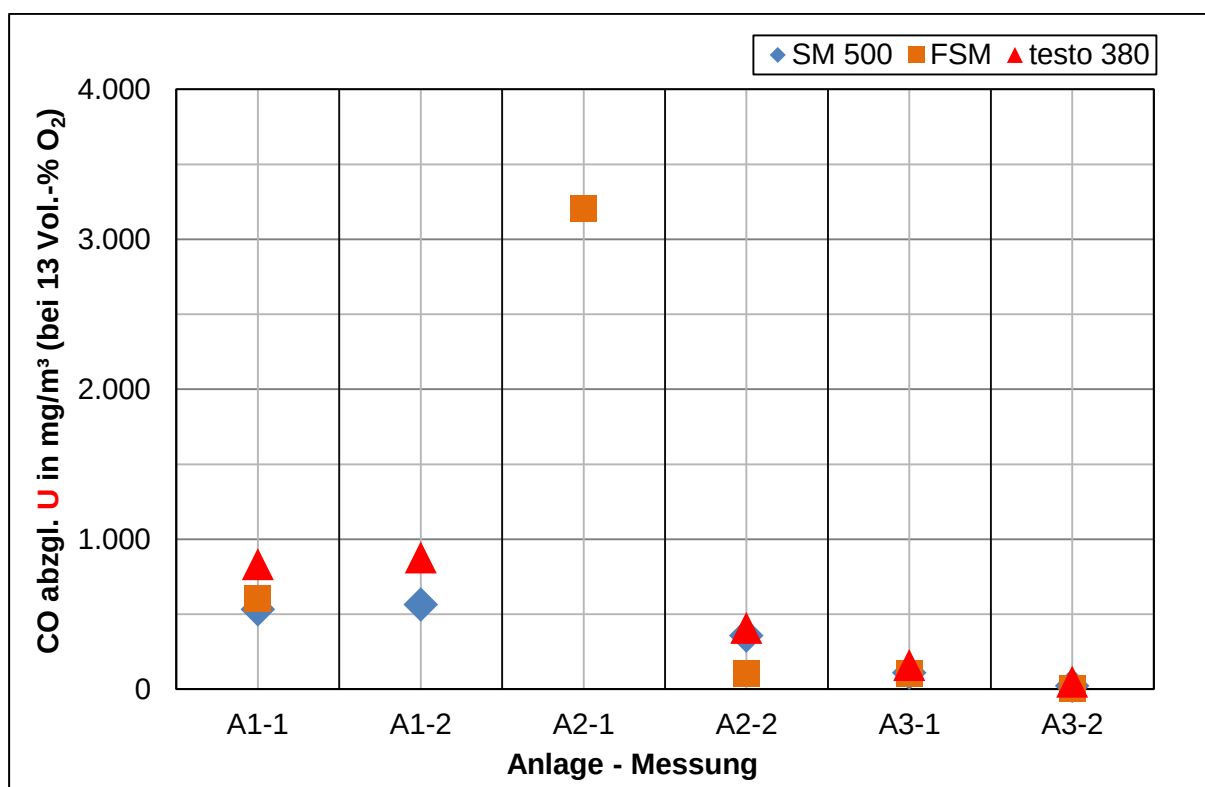
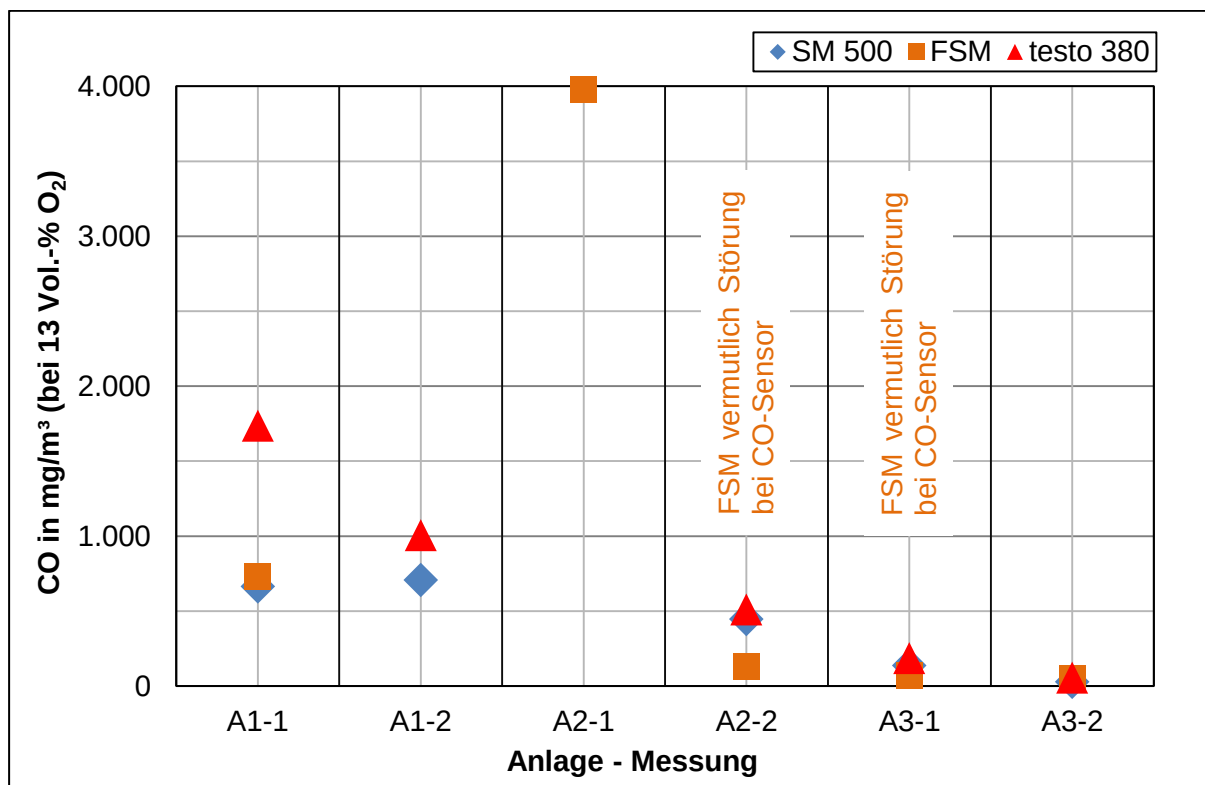


Abbildung 5.35 Schornsteinfegermessungen - CO-Konzentrationen mit Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM im Vergleich zum testo 380
oben: auf 13 Vol.-% bezogen
unten: auf 13 Vol.-% bezogen abzüglich der erweiterten Messunsicherheit U

Bei der zweiten Messung liegt für das FSM kein CO-Messwert vor. Auch hier unterscheiden sich die Messwerte von SM 500 und testo 380, bei einem, im Vergleich zur ersten Messung, geringeren Unterschied in der Startzeit. Das testo 380 zeigt eine um rund 40 % höhere CO-Konzentration bei dieser Messung an.

Bei Messung A2-1 liegt nur ein Messwert vom FSM vor, beim SM 500 erfolgte eine Sensor-Fehlermeldung und das testo 380 hatte die Messung abgebrochen. Bei der Messung A2-2 liegen die Messwerte vom SM 500 und testo 380 relativ dicht beieinander, das FSM zeigte eine deutlich zu niedrige CO-Konzentration an. Da bei dieser Messung stark schwankende CO-Konzentrationen auftraten (Messwerte des SM 500 liegen in einem Bereich von ca. 50 bis 4.800 mg/m³) und bei der Messung A2-1 ein sehr hohe mittlere CO-Konzentration (unbezogen: 8.031 mg/m³) auftrat wird vermutet, dass der CO-Sensor beim FSM für hohe Konzentrationen bei dieser Messung (zeitweise) ausgefallen ist.

Bei der ersten Messung A3-1 an der Anlage 3 lagen die mit den Schornstiefegermessgeräten ermittelten CO-Konzentrationen, im Vergleich zu den Ergebnissen der Anlagen 1 und 2, näher zusammen, aber auch hier waren die relativen Abweichungen hoch, z.B. zwischen SM 500 und testo 380 rund 36 %. Als Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Messzeiträume anzusehen (Start SM 500 war 1,2 min früher als vom testo 380), da am Messende vom SM 500, ausgehende von geringen CO-Konzentrationen, eine steiler CO-Konzentrationsanstieg erfolgte, der vom testo 380 entsprechend länger erfasst wurde.

Vom FSM wurde auch hier eine, im Vergleich zu den beiden anderen Messgeräten, zu geringe CO-Konzentration gemessen. Es wird vermutet, dass der Sensor für hohe CO-Konzentrationen den CO-Anstieg gegen Ende der 15-Minuten Messung nicht oder nur teilweise erfasst hat. Die Ergebnisse bei der Messung A3-2 unterscheiden sich in den CO-Konzentrationen beim FSM und testo 380 nur wenig (rund 12 %). Da bei dieser Messung die CO-Konzentration meistens unter 100 mg/m³ lag, konnten diese vom SM 500 nicht richtig gemessen werden.

In Abbildung 5.35 (unten) sind die CO-Konzentrationen unter Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheiten aufgetragen. Die Messwerte liegen z.T. näher beieinander, was vor allem für die Messung A1-1 gilt. Ursache hierfür ist die unterschiedliche Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit. Nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) sollte diese bei CO für alle Messgeräte einheitlich 20 % betragen und vom jeweiligen Messwert abgezogen werden. Die zitierte Ausgabe der Richtlinie wurde allerdings erst nach den Feldmessungen veröffentlicht. Damit bereits ab der Heizperiode 2015-2016 entsprechend der im Gründruck vorliegenden VDI-Richtlinie vorgegangen wird und eine einheitliche Auswertung der Messungen unter Berücksichtigung einer geräteunabhängigen erfolgt, hat der Zentralinnungsverband des Schornstiefegerhandwerks (ZIV) unter Hinweis auf den Gründruck der Richtlinie (Juni 2014) und in Abstimmung mit den zuständigen Behörden eine entsprechende Anleitung herausgegeben (ZIV, 2015).

Diese Anleitung wurde nicht von allen Messgeräteherstellern vor Erscheinen der VDI-Richtlinie in der Auswertesoftware umgesetzt. Beim SM 500 und beim FSM wurde die Software entsprechend angepasst. Beim FSM werden die CO-Konzentrationen in g/m³ mit 2 Nachkommastellen, beim SM 500 mit drei und beim testo 380 mit 4 Nachkommastellen angegeben, wodurch sich bei niedrigen Konzentrationen Rundungsunterscheide zwischen FSM

und testo 380 ergeben. So werden z.B. beim FSM die Konzentrationen $< 0,01 \text{ g/m}^3$ auf oder abgerundet (Anzeige: $0,0 \text{ g/m}^3$).

Beim testo 380 wurde beim CO für die Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit bei den Messungen A1-2 bis A3-2 ein fester Wert im Bereich von 10,3 bis 11,3 % verwendet. Bei Messung A1-1 wurden rund 51 % als erweiterte Messunsicherheit berücksichtigt. Dies ist nicht nachvollziehbar, was im Grunde auch für den hohen Messwert (bezogene CO-Konzentration) zutrifft. Im Nachgang zu den Messungen konnte diese Auffälligkeit nicht mehr geklärt werden.

Auffällig beim testo 380 waren Abweichungen bei den Differenzen zwischen Beurteilungswert, angezeigter CO-Konzentration (bezogen auf 13 Vol.-% O_2) und angegebene erweiterte Messunsicherheit.

Abbildung 5.36 zeigt die Messwerte unter Berücksichtigung einer einheitlichen Messunsicherheit von 20 %, wobei sich bei den Werten für das SM 500 nichts geändert hat und beim FSM nur die Rundungsabweichungen vermieden wurden. Beim testo 380 ergibt sich für die Messung A1-1 ein deutlich höherer Beurteilungswert und bei Messung A2-2 rückt dieser näher an den Wert des SM 500 heran.

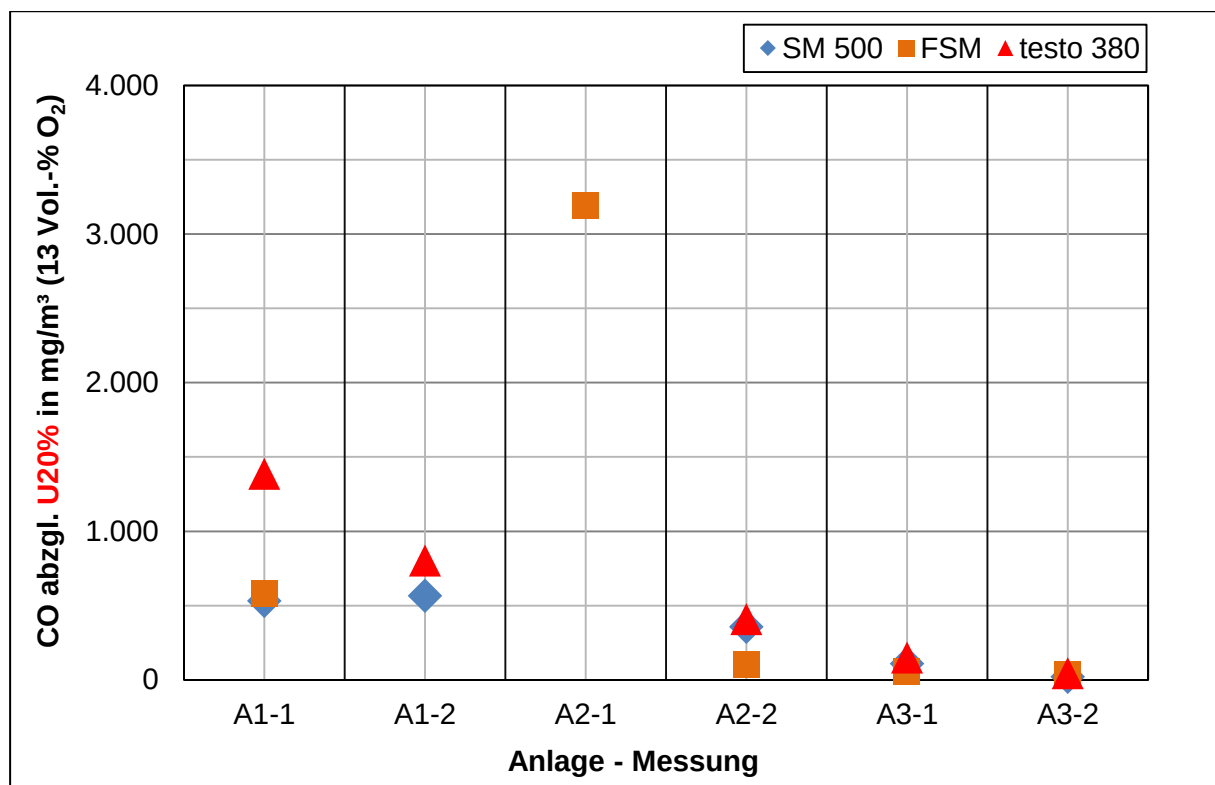


Abbildung 5.36 Schornstiefgermessungen - CO-Konzentrationen mit Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM im Vergleich zum testo 380 auf 13 Vol.-% bezogen abzüglich einer erweiterten Messunsicherheit U von 20%

In Tabelle 5.16 bis Tabelle 5.18 sind die während den Schornsteinfegermessungen ermittelten Ergebnisse für das Wöhler SM 500, das Feinstaubmessgerät FSM und das testo 380 aufgelistet. Ebenfalls mit enthalten sind eigene Berechnungen für die zu berücksichtigende erweiterte Messunsicherheit für Staub und CO nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) sowie die Differenzen der Messgeräteanzeigen zu den eigenen Berechnungen.

Die an den Messungen beteiligten Schornsteinfeger wurden gebeten, für die durchgeführten Messungen auch Messbescheinigungen auszustellen. Hierbei fiel eine unterschiedliche Vorgehensweise der Schornsteinfeger bei der Berücksichtigung der Messunsicherheit auf, was am Beispiel zweier Messbescheinigungen erläutert wird.

Für die Anlagen 1 und 2 wurden keine aktuellen Messbescheinigungen ausgestellt, die Beurteilung erfolgt an einer Messbescheinigung für die letzte durchgeführte Überwachungsmessung im Jahr 2015, siehe Tabelle 5.19. Hierin wurden der Anlage falsche Grenzwerte zugewiesen. Erst ab 2025 muss diese Anlage die Grenzwerte der ersten Stufe der 1. BImSchV von 0,06 g/m³ Staub und 0,8 g/m³ CO einhalten. Bis dahin gilt eine Übergangsregelung mit höheren Grenzwerten.

Des Weiteren wird vom bezogenen CO-Messwert die gerätespezifische Messunsicherheit von 11,4 % des Messwertes abgezogen. Die Messbescheinigung wurde im April 2015 ausgestellt. Zu diesem Zeitpunkt sollte bereits die einheitliche Messunsicherheit von 20 % des CO-Messwertes berücksichtigt werden (ZIV, 2014). Von der Staubkonzentration werden laut der Messbescheinigung 72,5 % des Staubmesswertes als Messunsicherheit abgezogen.

Tabelle 5.16 Schornsteinfegermessungen - Wöhler SM 500: Ergebnisse der Messungen, eigene Berechnungen nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) und Differenzen oben: O₂- und Staub-Konzentrationen unten: CO-Konzentrationen

SM 500	Anzeige Messgerät				Berechnung nach VDI 4207-2			Differenz	
	O ₂	c _{Staub,B}	U _{Staub,B}	B _{Staub}	c _{Staub,B}	U _{Staub,VDI,B}	B _{Staub,VDI}	B _{Staub,VDI} - B _{Staub}	
Messung	in Vol.-%	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in %
A1-1	7,6	12	5	7	12	5	7	0	0
A1-2	7,6	14	6	8	14	6	8	0	0
A2-1	3,9	130	52	78	130	52	78	0	0
A2-2	6,4	41	16	25	41	16	25	0	0
A3-1	10,9	79	32	47	79	32	47	0	0
A3-2	8,6	126	50	76	126	50	76	0	0

SM 500	Anzeige Messgerät			Berechnung nach VDI 4207-2				Differenz	
	c _{CO,B}	U _{CO,B}	B _{CO}	Messwert	c _{CO,B}	U _{CO,VDI,B}	B _{CO,VDI}	B _{CO,VDI} - B _{CO}	
Messung	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in ppm	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in %
A1-1	664	133	531	890	664	133	531	0	0
A1-2	706	141	565	947	707	141	566	1	0
A2-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2-2	446	89	357	652	447	89	358	1	0
A3-1	138	28	110	140	139	28	111	1	1
A3-2	27	5	22	34	27	5	22	0	0

c_{Staub / CO, B} auf Bezugssauerstoffgehalt bezogene Staub- bzw. CO-Konzentration

U_{Staub / CO, B} auf Bezugssauerstoffgehalt bezogene Messunsicherheit der Konzentration

B_{Staub / CO} Beurteilungswert der Staub- bzw. CO-Konzentration für die Grenzwertüberprüfung

Tabelle 5.17 Schornsteinfegermessungen - FSM: Ergebnisse der Messungen, eigene Berechnungen nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) und Differenzen
oben: O₂- und Staub-Konzentrationen unten: CO-Konzentrationen

FSM	Anzeige Messgerät				Berechnung nach VDI 4207-2			Differenz	
	O ₂	c _{Staub,B}	U _{Staub,B}	B _{Staub}	c _{Staub,B}	U _{Staub,VDI,B}	B _{Staub,VDI}	B _{Staub,VDI} - B _{Staub}	
Messung	in Vol.-%	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in %
A1-1	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-
A1-2	7,8	-	-	-	-	-	-	-	-
A2-1	4,9	208	56	152	208	83	125	-27	-22
A2-2	6,5	41	11	30	41	16	25	-5	-20
A3-1	12,5	82	21	61	82	33	49	-12	-24
A3-2	8,2	75	19	56	75	30	45	-11	-24

FSM	Anzeige Messgerät			Berechnung nach VDI 4207-2				Differenz	
	c _{CO,B}	U _{CO,B}	B _{CO}	Messwert	c _{CO,B}	U _{CO,VDI,B}	B _{CO,VDI}	B _{CO,VDI} - B _{CO}	
Messung	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in ppm	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in %
A1-1	730	150	600	980	726	145	581	-19	-3
A1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2-1	3.980	800	3.200	6.425	3.991	798	3.193	0	0
A2-2	130	30	100	184	127	25	102	2	-
A3-1	70	100	100	57	67	13	54	-46	-
A3-2	50	10	0	62	48	10	38	38	-

c_{Staub} / CO, B auf Bezugssauerstoffgehalt bezogene Staub- bzw. CO-Konzentration

U_{Staub} / CO, B auf Bezugssauerstoffgehalt bezogene Messunsicherheit der Konzentration

B_{Staub} / CO Beurteilungswert der Staub- bzw. CO-Konzentration für die Grenzwertüberprüfung

Tabelle 5.18 Schornsteinfegermessungen - testo 380: Ergebnisse der Messungen, eigene Berechnungen nach VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) und Differenzen
oben: O₂- und Staub-Konzentrationen unten: CO-Konzentrationen

testo 380	Anzeige Messgerät				Berechnung nach VDI 4207-2			Differenz	
	O ₂	c _{Staub,B}	U _{Staub,B}	B _{Staub}	c _{Staub,B}	U _{Staub,VDI,B}	B _{Staub,VDI}	B _{Staub,VDI} - B _{Staub}	
Messung	in Vol.-%	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in %
A1-1	8,7	2	0	1	2	1	1	-0,3	-
A1-2	8,0	1	1	1	1	0	1	0,5	-
A2-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2-2	5,4	31	8	22	31	12	19	-3	-17
A3-1	11,1	103	48	56	103	41	62	7	10
A3-2	8,6	107	49	58	107	43	64	6	10

testo 380	Anzeige Messgerät			Berechnung nach VDI 4207-2				Differenzen		
	c _{CO,B}	U _{CO,B}	B _{CO}	Messwert	c _{CO,B}	U _{CO,VDI,B}	B _{CO,VDI}	B _{CO,VDI} - B _{CO}	in %	c _{CO,B} - U _{CO,B}
Messung	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in ppm	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³	in mg/m ³		in mg/m ³
A1-1	1.736	880	832	2.130	1.732	346	1.386	554	40	856
A1-2	1.006	113	877	1.307	1.005	201	804	-73	-9	893
A2-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2-2	510	53	409	797	511	102	409	0	0	457
A3-1	187	21	160	187	189	38	151	-9	-6	166
A3-2	56	6	49	69	56	11	45	-4	-10	50

c_{Staub} / CO, B auf Bezugssauerstoffgehalt bezogene Staub- bzw. CO-Konzentration

U_{Staub} / CO, B auf Bezugssauerstoffgehalt bezogene Messunsicherheit der Konzentration

B_{Staub} / CO Beurteilungswert der Staub- bzw. CO-Konzentration für die Grenzwertüberprüfung

Hier hätte ein Wert von 36 % (beim angesetzten Grenzwert von 0,06 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) in Abzug gebracht werden müssen. Werden allerdings die korrekten Grenzwerte der Anlage und das Inbetriebnahmedatum der Anlage berücksichtigt, hätten gar keine Messunsicherheiten berücksichtigt werden dürfen. Ob bei dieser Messbescheinigung der korrekte Messwert übernommen wurde oder bereits der Beurteilungswert kann nicht bewertet werden.

Des Weiteren erscheinen die Messwerte für CO und Staub nicht ganz schlüssig. Bei der angeführten Messung wurde eine mittlere Sauerstoffkonzentration von 3,5 Vol.-% gemessen. Die Anlage 2 weist im normalen Betrieb aber Sauerstoffkonzentrationen von ca. 7 Vol.-% auf. Die Anlage befand sich also während der Messung im Luftmangel, wobei weitaus höhere CO- und Staubkonzentrationen zu erwarten wären.

Tabelle 5.19 Vorgehensweise Schornsteinfeger 1 bei der Berücksichtigung der Messunsicherheit in den Messbescheinigungen (Anlage 2)

Anlage 2 (Messung vom 10.4.2015)	Messbescheinigung		nach VDI 4207 Blatt 2 (2016)	
	Staub	CO	Staub	CO
Grenzwert in g/m ³ ¹⁾	0,06	0,8	0,15	1,0
Messwert in g/m ³ ¹⁾	0,011	0,15	0,011	0,15
Messunsicherheit in g/m ³ ¹⁾	0,008 ²⁾	0,02 ²⁾	- ³⁾	- ³⁾
Beurteilungswert in g/m ³ ¹⁾	0,00	0,1	0,01	0,15

¹⁾ bezogen auf 13 Vol.-% O₂

²⁾ 72,5 % des Messwertes bei Staub und 11,4 % des Messwertes bei CO

³⁾ bei vor dem 22.03.2010 errichteten Feuerungsanlagen sind keine Messunsicherheiten zu berücksichtigen

Bei der für die Anlage 2 (Messung A3-1) vorliegenden Messbescheinigung wurden vom Messgerät die Beurteilungswerte eingetragen und von diesen nochmals eine Messunsicherheit abgezogen, siehe Tabelle 5.20. Beim Staub wurde hierbei 40 % des Grenzwertes und für CO 20 % des Grenzwertes als Messunsicherheit angesetzt. Hierdurch ergeben sich deutlich zu niedrige Beurteilungswerte.

Tabelle 5.20 Vorgehensweise Schornsteinfeger 2 bei der Berücksichtigung der Messunsicherheit in den Messbescheinigungen (Anlage 3, Messung A3-1)

Anlage 3 (Messung A3-1)	Messbescheinigung		nach VDI 4207 Blatt 2 (2016)	
	Staub	CO	Staub	CO
Grenzwert in g/m ³ ¹⁾	0,10	1,0	0,10	1,0
Messwert in g/m ³ ¹⁾	0,056	0,16	0,103	0,19
Messunsicherheit in g/m ³ ¹⁾	0,040 ²⁾	0,20 ²⁾	0,041 ³⁾	0,04 ³⁾
Beurteilungswert in g/m ³ ¹⁾	0,02	0,0	0,06	0,2

¹⁾ bezogen auf 13 Vol.-% O₂

²⁾ 40 % des Grenzwertes bei Staub und 20 % des Grenzwertes bei CO

³⁾ 40 % des Messwertes bei CO und 20 % des Messwertes bei CO

In Tabelle 5.21 sind für die Messkomponente Staub nochmals die von den verschiedenen Schornsteinfegermessgeräten verwendeten Messunsicherheiten und die Angaben aus den Bekanntgaben im Bundesanzeiger im direkten Vergleich aufgeführt. Beim Wöhler SM 500 wird die in der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 (2016) enthaltene Messunsicherheit von 40 % beim jeweiligen Messwert berücksichtigt.

Das Feinstaubmessgerät FSM verwendet für die Berechnung der Messunsicherheit die in der Bedienungsanleitung angegebenen Werte. Um bis zu 4 %-Punkte abweichende Werte wurden dagegen zuletzt im Bundesanzeiger vom 26.08.2015 veröffentlicht.

Tabelle 5.21 Messkomponente Staub - in den Messgeräten verwendete erweiterte Messunsicherheit beim Wöhler SM 500, Feinstaubmessgerät FSM und testo 380; rot markiert sind die verwendeten Messunsicherheiten beim testo 380

Grenzwert in g/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	VDI 4207 Blatt 2 (2016)	Wöhler SM 500	FSM		testo 380		
			Bedienungsan- leitung	Bundesanzeiger 26.08.2015 B5	Testo AG (April 2016)	Bundesanzeiger 26.08.2015 B5	Bundesanzeiger 23.07.2013 B5
0,02	40 %	40 %	43 %	39 %	37,1 %	24 %	36 %
0,06			13 %	14 %	27,5 %	35 %	36 %
0,09			25 %	27 %	19,8 %	22 %	56 %
0,10			23 %	25 %	17,8 %	16 %	46 %
0,15 *			27 %	27 %	23 %	25 %	43 %

* für vor dem 22.03.2010 errichtete Feuerungsanlagen sind keine Messunsicherheiten zu berücksichtigen

Bei den beiden Schornsteinfegermessgeräten testo 380 mit unterschiedlichen Baujahren werden auch unterschiedliche Werte für die Ermittlung der Messunsicherheit herangezogen. Das neuere Messgerät (Anlagen 1 und 2) verwendet die Angaben aus der Bekanntgabe 2015 (zumindest für den Grenzwert 0,15 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂), beim älteren Messgerät wurde der Wert aus der älteren Bekanntgabe vom Bundesanzeiger 2013 (für Grenzwert 0,10 g/m³ bei 13 Vol.-% O₂) verwendet. Dieses Messgerät war aber Anfang März 2016 in der Reparatur, wo auch ein Softwareupdate hätte erfolgen müssen.

Bei der Messung von CO wird der Abzug einer Messunsicherheit von 20 % von der Richtlinie VDI 4207 Blatt 2 (2016) vorgeschrieben, dies ist auch in den Messgeräten SM 500 und FSM umgesetzt. Das Schornsteinfegermessgerät testo 380 weist jedoch eine individuelle erweiterte Messunsicherheit bei CO-Messungen von 11,4 % auf.

Eine zeitliche Übersicht über Messungen an der Anlage 1 im Vergleich zu den aktuellen Messungen ist in Tabelle 5.22 aufgeführt. Die am 06.11.2015 gemessene O₂-Konzentration von 12,4 Vol.-% ist höher als die aktuellen Messungen. Die gemessenen Staubkonzentrationen von 2015 und 2016 (Referenzmessverfahren) sind identisch, die Messwerte mit dem testo 380 am 11.03.2016 liegen hier im Vergleich zu niedrig. Während den Feldmessungen

und bei den Vergleichsmessungen mit dem Schornsteinfeger wurden sowohl niedrigere als auch höhere CO-Konzentrationen im Vergleich zu der Messung aus 2015 gemessen.

Tabelle 5.22 Schornsteinfegermessungen - Messdaten zu Anlage 1 (Messgerät: testo 380) im Vergleich zu Mittelwerten der Feldmesskampagne (Referenzgeräte)

Anlage 1	06.11.2015 ²⁾	11.03.2016 ³⁾		Referenz ⁴⁾
O ₂ in Vol.-%	12,4	8,7	8,0	7,6
Messwert Staub in g/m ^{3 1)}	0,029	0,002	0,001	0,022
Beurteilungswert Staub in g/m ^{3 1)}	0,02	0,00	0,00	0,02
Messwert CO in g/m ^{3 1)}	0,32	1,74	1,01	0,24
Beurteilungswert CO in g/m ^{3 1)}	0,3	0,8	0,9	0,2

¹⁾ bezogen auf 13 Vol.-% O₂

²⁾ Angaben aus Messbescheinigung

³⁾ Daten aus Messprotokoll testo 380 entnommen

⁴⁾ bei Referenzverfahren erfolgt keine Berücksichtigung der Messunsicherheit

Für Anlage 2 ist die zeitliche Übersicht der Messungen im Vergleich zu den aktuellen Messungen in Tabelle 5.23 aufgeführt. Die am 10.04.2015 gemessene O₂-, Staub- und CO-Konzentration sind auffällig niedrig im Vergleich zu den aktuellen Messungen. Vor allem die geringen Staub- und CO-Konzentrationen im Luftmangelbetrieb der Anlage entsprechend nicht den Erwartungen. Insgesamt wurden im Mittel während der Feldmesskampagne höhere Staub- und CO-Konzentrationen an dieser Anlage ermittelt.

Tabelle 5.23 Schornsteinfegermessungen - Messdaten zu Anlage 2 (Messgerät: testo 380) im Vergleich zu Mittelwerten der Feldmesskampagne (Referenzgeräte)

Anlage 2	10.04.2015 ²⁾	11.03.2016 ³⁾	Referenz ⁴⁾
O ₂ in Vol.-%	3,5	5,4	7,6
Messwert Staub in g/m ^{3 1)}	0,011	0,031	0,062
Beurteilungswert Staub in g/m ^{3 1)}	0,00	0,02	0,06
Messwert CO in g/m ^{3 1)}	0,15	0,51	1,36
Beurteilungswert CO in g/m ^{3 1)}	0,1	0,4	1,4

¹⁾ bezogen auf 13 Vol.-% O₂

²⁾ Angaben aus Messbescheinigung

³⁾ Daten aus Messprotokoll testo 380 entnommen

⁴⁾ bei Referenzverfahren erfolgt keine Berücksichtigung der Messunsicherheit

Eine zeitliche Übersicht über Messungen an der Anlage 3 im Vergleich zu den aktuellen Messungen ist in Tabelle 5.24 aufgeführt. Die gemessenen O₂-Konzentrationen liegen in einem ähnlichen Bereich, dies gilt auch für die aktuell gemessenen Staubkonzentrationen. In 2014 wurde hier der höchste Wert gemessen. Die Messwerte der CO-Konzentrationen liegen im Bereich von 0,06 bis 0,16 g/m³. Allerdings ist im Messprotokoll für 2014 ein nicht nachvollziehbarer CO-Wert enthalten, der ggf. bereits um eine Messunsicherheit vermindert wur-

de. Wird der auf 13 Vol.-% O₂ bezogene Messwert aus der ppm-Angabe (206 ppm) im Messprotokoll berechnet, ergibt sich eine Konzentration von 0,181 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂).

Tabelle 5.24 Schornsteinfegermessungen - Messdaten zu Anlage 3 (Messgerät: testo 380) im Vergleich zu Mittelwerten der Feldmesskampagne (Referenzgeräte)

Anlage 3	18.12.2014 ²⁾	17.03.2016 ³⁾		Referenz ⁴⁾
O ₂ in Vol.-%	9,6	11,1	8,6	9,7
Messwert Staub in g/m ^{3 1)}	0,09	0,056	0,059	0,055
Beurteilungswert Staub in g/m ^{3 1)}		0,02	0,02	0,06
Messwert CO in g/m ^{3 1)}	0,06	0,16	0,16	0,08
Beurteilungswert CO in g/m ^{3 1)}		0,0	0,0	0,08

¹⁾ bezogen auf 13 Vol.-% O₂

²⁾ Angaben aus Messprotokoll, Beurteilungswerte nicht angegeben

³⁾ Daten aus Messbescheinigung entnommen

⁴⁾ bei Referenzverfahren erfolgt keine Berücksichtigung der Messunsicherheit

In Tabelle 5.25 ist die zeitliche Übersicht der Messungen an der Anlage 4 im Vergleich zu den aktuellen Messungen aufgelistet. Alle Messkomponenten streuen in einem weiten Bereich, was den nicht konstanten Betrieb der Anlage zeigt. Bei der Messung im Jahr 2014 wurde die höchste Staubkonzentration gemessen, bei den Messungen in 2015 lagen diese am niedrigsten. In der Feldmesskampagne konnten diese niedrigen Staubkonzentrationen nicht mehr erreicht werden. Auch die CO-Konzentrationen sind bei der Abnahmemessung am 12.11.2015 mit einem Messwert von 0,08 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) sehr gering. Während der Feldmessungen lag die niedrigste CO-Konzentration bei knapp über 4.0 g/m³ (bei 13 Vol.-% O₂). Auch in dem Protokoll zum Stückholzkessel ist die Ermittlung des CO-Messwertes aus der ppm-Angabe des Messwertes nicht nachvollziehbar. Dies gilt auch für die ermittelte geringe Staubkonzentration am 13.1.2015 im Vergleich zur hohen CO-Konzentration.

Tabelle 5.25 Schornsteinfegermessungen - Messdaten zu Anlage 4 (Messgerät: testo 380) im Vergleich zu Mittelwerten der Feldmesskampagne (Referenzgeräte)

Anlage 4	18.12.2014 ²⁾	13.01.2015 ³⁾	12.11.2015	Referenz ⁴⁾
O ₂ in Vol.-%	9,6	9,4	5,8	10,0
Messwert Staub in g/m ^{3 1)}	1,099	0,025	0,005	0,204
Beurteilungswert Staub in g/m ^{3 1)}				0,204
Messwert CO in g/m ^{3 1)}	k. A.	3,65	0,08	6,83
Beurteilungswert CO in g/m ^{3 1)}	k. A.			6,8

¹⁾ bezogen auf 13 Vol.-% O₂

²⁾ Angaben aus Messprotokoll, Beurteilungswerte nicht angegeben (k. A.: keine Angabe)

³⁾ Daten aus Messprotokoll von testo 380 entnommen

⁴⁾ bei Referenzverfahren erfolgt keine Berücksichtigung der Messunsicherheit

6 Zusammenfassung

Mit der Novellierung der 1. BImSchV im Jahr 2010 werden die Emissionsgrenzwerte für genehmigungsfreie kleine und mittlere Feuerungsanlagen in zwei Stufen verschärft. Für die Überwachung der verschärften Staubgrenzwerte mussten neue Messverfahren entwickelt werden. Für deren Einsatz zur Grenzwertüberwachung sind eine bestandene Eignungsprüfung und eine Bekanntgabe durch die zuständigen Behörden notwendig. In der novellierten Fassung der 1. BImSchV wurde außerdem die Regelung aufgenommen, dass die Messunsicherheit nicht zu Lasten des Anlagenbetreibers gehen darf. Zur Verfahrensvereinfachung wurde hierbei festgelegt, dass unabhängig vom jeweils vor Ort eingesetzten eignungsgeprüften Messgerät eine konstante erweiterte Messunsicherheit in Abhängigkeit der Messkomponente verwendet werden soll. Bei den entwickelten Schornsteinfegermessgeräten wurde die Einhaltung der erweiterten Messunsicherheiten unter Prüfstandsbedingungen ermittelt.

In dem Projekt sollte geklärt werden, ob die vorgeschlagene pauschale erweiterte Messunsicherheit bei den Überwachungsmessungen durch die Schornsteinfeger auch die Verhältnisse in der Praxis angemessen wiedergibt und inwieweit eine Kurzzeitmessung das Emissionsverhalten der Feuerungen repräsentativ widerspiegelt.

Hierzu wurden Labor- und Prüfstandsuntersuchungen, Feldmessungen an installierten Feuerungsanlagen und Messungen mit Schornsteinfegern durchgeführt. Es wurden zwei bekanntgegebene Schornsteinfegermessgeräte, das Feinstaubmessgerät FSM des Herstellers MRU GmbH und das SM 500 des Herstellers Wöhler Technik GmbH im Vergleich Referenzmessverfahren eingesetzt. Von den an den Messungen beteiligten Schornsteinfegern wurde jeweils ein testo 380 (Hersteller: Testo SE & Co. KGaA) verwendet.

Die Labor- und Prüfstandsuntersuchungen ergaben, im Vergleich zu den Eignungsbekanntgaben und den betreffenden Anforderungen der VDI-Richtlinien 4206 Blatt 1 und 2, für die erweiterten Messunsicherheiten bei Staub, CO und O₂ nahezu identische Ergebnisse und bestätigte die Einhaltung der festgelegten Anforderungen.

Bei den Feldmessungen wurden über einen Zeitraum von 4 Wochen verteilt im wöchentlichen Rhythmus Messungen an einem Hackschnitzelkessel, zwei Pelletkesseln und einem Stückholzkessel entsprechend der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 durchgeführt. Bei den Messungen wurden Brennstoffproben entnommen und der aktuelle Wartungszustand der Anlage bewertet.

Bei den Feldmessungen stellte sich die Ermittlung der O₂-Konzentration mit den beiden Schornsteinfegermessgeräten als unkritisch heraus, die Anforderung der Richtlinie 4206 Blatt 1 bezüglich der erweiterten Messunsicherheit von $\pm 0,5$ Vol.-% wird eingehalten.

Die während der Feldmessungen ermittelten Staubkonzentrationen an den Anlagen erstrecken sich über einen weiten Bereich. Deshalb konnten nur für die Grenzwertklasse 0,10 g/m³ mit einer ausreichenden Anzahl an Messwerten die erweiterten Messunsicherheiten für Staub berechnet werden. In dieser Grenzwertklasse erfüllen beide Schornsteinfegermessgeräte die Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 in Höhe von 40 %. Allerdings lagen bei den Feldmessungen auch Bedingungen vor, die zu höheren und z.T. auch systematischen Abweichungen zwischen Referenzmessverfahren nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 in Verbindung mit VDI 4206 Blatt 2 und Schornsteinfegermessgeräten führen. So werden z.B. mit dem FSM zu geringe Staubkonzentrationen nach Elektrofilter oder bei stark teerhaltigen

Abgasen ermittelt. Ursache sind wahrscheinlich erhöhte Staubablagerungen in der Probenahmesonde, die dann bei der Staubbestimmung mit der Filterhülse nicht erfasst werden. Beim SM 500 ergeben sich in diesen Fälle stärkere Streuungen, wobei die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit meist noch eingehalten wird, und Mehrbefunde. Die Ursache für Mehrbefunde gegenüber dem Referenzmessverfahren bei teerhaltigen Abgasen könnte auch in einer ungenügenden Erfassung der in der Probenahmesonde des Referenzverfahrens abgeschiedenen Stäube und in den um ca. 30 °C unterschiedlichen Filtrationstemperaturen zu sehen sein.

Bei den Feldmessungen ergaben sich insgesamt bei der CO-Messung die größten Unsicherheiten und Abweichungen zum Referenzmessgerät und zu den Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1. Für die Grenzwertklasse 1 g/m³ konnte die Anforderung an die erweiterte Messunsicherheit von 20 % von beiden Messegeräten nicht eingehalten werden. Größere Abweichungen zwischen Referenzmessgerät und Schornsteinfegermessgeräten traten vor allem bei stark schwankenden und sehr hohen CO-Konzentrationen auf. Gleichmäßige nicht zu hohe CO-Konzentrationen wurden von beiden Schornsteinfegermessgeräten gut erfasst.

Die Ergebnisse der Feldmessungen im Vergleich zu den Prüfstandmessungen geben auch die sehr unterschiedlichen Randbedingungen wieder. Diese unterliegen bei den Feldmessungen wesentlich größeren Schwankungen und Unterschieden. Dies betrifft u.a. die Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, Vibrationen), die Einbaubedingungen der Entnahmesonden (z.B. Strömungsverhältnisse, Zugänglichkeit, Temperatur), die Arbeitsbedingungen (z. B. Temperatur, Lärm, Platzbedarf) und die Betriebsbedingungen der Heizkessel (z.B. Stabilität der Verbrennung, konstantes Emissionsniveau). Dies alles führt dazu, dass bei Feldmessungen grundsätzlich mit höheren Unsicherheiten zu rechnen ist, als bei definierten und kontrollierten Prüfstandsbedingungen. Insofern geben die vorgeschlagenen pauschalen erweiterten Messunsicherheiten bei den Überwachungsmessungen mit Schornsteinfegermessgeräten die Verhältnisse in der Praxis angemessen wieder, wobei für die CO-Messung eine Weiterentwicklung der Messtechnik hinsichtlich den praktischen Gegebenheiten wünschenswert wäre.

Das Emissionsverhalten der in den Feldmessungen untersuchten Feuerungsanlagen unterlag meist einer größeren Schwankungsbreite, die z.T. auch zu Grenzwertüberschreitungen führte. Wesentliche Ursachen waren vor allem die verfeuerte Brennstoffqualität in Verbindung mit der aktuellen Kesselleistung. Wurden bei geringerer Kesselleistung auch schlechtere Brennstoffqualitäten verbrannt, konnte dies zu erhöhten CO- und ggf. Staubkonzentrationen führen. Die Schwankungen der Brennstoffqualitäten lagen hierbei im üblichen Einsatzbereich bei den jeweiligen Anlagen.

Ein weiterer wichtiger Einfluss auf die Konstanz des Emissionsverhaltens der Anlagen war deren Start- und Regelverhalten. Traten während der Startphase des Kessel Störungen im Verbrennungsverhalten auf oder ist eine lange Stabilisierungsphase vom Kesselstart bis zu einem stationären Leistungs- und Verbrennungsverhalten notwendig, ergeben sich auch größere Schwankungen bei den 15-Minuten Messungen nach 1. BImSchV.

Da alle untersuchten Feldanlagen in einem technisch ordnungsgemäßen Zustand waren und auch die Reinigungsintervalle dem Anlagenbetrieb angemessen durchgeführt wurden, konnte keine Einfluss dieser Randbedingungen auf das Emissionsverhalten festgestellt werden.

Die in der VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2 empfohlene praktische Durchführung der Überwachungsmessungen ist praxisnah und gut umsetzbar. Die durchgeführten Messungen ergaben keine Hinweise, inwieweit diese zu ändern oder zu ergänzen wären. Die ermittelten Schwankungen und Abhängigkeiten des Emissionsverhaltens der Anlagen können letztlich während den Überwachungsmessungen nicht verhindert bzw. beeinflusst werden. Damit muss mit einer gewissen Zufälligkeit im Ergebnis der Überwachungsmessung gerechnet werden die auch dazu führt, dass eine Anlage z.T. die Grenzwerte im stationären Heizbetrieb überschreitet, obwohl diese bei der Überwachungsmessung nicht beanstandet wurde.

Der im Feldmessprogramm untersuchte moderne Stückholzkessel nimmt aufgrund des angetroffenen sehr ungünstigen Emissionsverhaltens eine Sonderstellung ein. Hier traten sehr hohe Staub- und CO-Konzentrationen auf, die Grenzwerte konnten in keiner Messung eingehalten werden. Ursache hierfür sind wahrscheinlich Mängel in der Kesseleinstellung, der Kesselkonstruktion und im Regelverhalten. Anhand den Erfahrungen bei den durchgeführten Messungen sollte eigentlich erwartet werden, dass dieses permanent ungünstige Verbrenungsverhalten, welches auch mit Geruchs- und Rußbelästigungen einhergeht, bei den Überwachungsmessungen erkannt wird.

Bei den mit den Schornsteinfegern durchgeführten Messungen am Hackschnitzelkessel und den beiden Pelletkesseln wurde ein unterschiedlicher Umsetzungsgrad der Vorgaben der VDI 4207 Blatt 2 bezüglich der Anwendung der erweiterten Messunsicherheit ersichtlich. Einerseits hängt dies mit dem Erscheinungsdatum (2016) des Weißdruckes der Richtlinie zusammen, andererseits wurde von Seiten des ZIV in den Jahren 2014 (für CO) und 2015 (für CO und Staub) darauf hingewiesen, die Regelungen der VDI-Richtlinie bereits vor dem Erscheinungsdatum anzuwenden.

Sowohl für CO als auch für Staub erfolgt nur vom SM 500 eine Berechnung entsprechend der VDI-Richtlinie. Beim FSM wird bei der Staubmessung die gerätespezifische erweiterte Messunsicherheit für die jeweilige Grenzwertklasse verwendet, dies traf auch beim testo 380 (Neugerät) zu. Bei einem ebenfalls eingesetzten älteren Gerät konnte nicht nachvollzogen werden, auf welcher Basis die erweiterte Messunsicherheit angesetzt wurde. Durch die halbjährlichen vorgeschriebenen Geräteüberprüfungen sollte eigentlich auch sichergestellt werden, dass die Softwareversion der Messgeräte einheitlich und aktuell ist. Die erweiterte Messunsicherheit bei der CO-Messung wird im FSM nach VDI-Richtlinie berechnet. Das testo 380 verwendet hierzu eine gerätespezifische Messunsicherheit mit einem Wert von ca. 11 %, wobei der Rechengang nicht vollumfänglich nachvollzogen werden konnte.

Die Historie zur Anwendung der erweiterten Messunsicherheit mit z.T. unterschiedlichen Vorgehensweisen und das verzögerte Erscheinen der betreffenden VDI-Richtlinie wirken sich möglicherweise auch in der praktischen Umsetzung vor Ort durch die Schornsteinfeger aus. So wurden in den Messbescheinigungen nicht die korrekten Messunsicherheiten berücksichtigt bzw. diese sogar doppelt abgezogen. Dies kann sicher nicht verallgemeinert aber als Hinweis dafür herangezogen werden, dass sich vor einer weiteren Überarbeitung dieser Richtlinien zuerst eine längere Anwendungsphase anschließen sollte, in der die Vorgaben auch einheitlich umgesetzt und angewendet werden. Dies sollte durch Informationen, Schulungen und weitere Maßnahmen zur Qualitätskontrolle und Überprüfung unterstützt werden.

7 Quellenverzeichnis

1. BImSchV, 2010.

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 26. Januar 2010. BGBl I, S. 38., 2010.

Bundesanzeiger, 2016.

Recherche unter www.bundesanzeiger.de mit Suchbegriff Kleinf Feuerungsanlagen im Oktober 2016, Ergebnisse der jeweiligen Ausgaben des Bundesanzeigers als pdf-Dokument.

DIN EN 14961-2, September 2011.

Feste Biobrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 2: Holzpellets für nichtindustrielle Verwendung. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 17225-2, September 2014.

Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets. Beuth Verlag, Berlin.

Ester, Stephan; Stizenberg, Alexander; Struschka, Michael; Schäfer, Christian, 2015.

Weiterentwicklung des Online-Staubmessgerätes SM 500 für Langzeitmessungen und zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung. Abschlussbericht, April 2015.
<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30739.pdf>, Zugriff am 2 Mai 2016.

Fröling, 2011.

Prospekt und Typenschild Hackgutkessel T4. Fröling Heizkessel- und Behälterbau GesmbH, Grieskirchen (A).

MRU, 2015a.

Feinstaub-System FSM. MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH.
<http://www.mru.eu/produkte/mobile-abgasmessgeraete/schornsteinfeger-handwerk/product/feinstaub-system-fsm.html>, Zugriff am 23 November 2015.

MRU, 2015b.

Bedienungsanleitung Feinstaubmessung FSM und SPECTRAplus. MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH. Ausgaben 2015028 bzw. 20150622.

Schäfer, Christian, 2016.

Messgenauigkeit bei der Ermittlung der Staubkonzentration im Abgas von Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 15 Umwelttechnik, Nr. 258.VDI-Verlag Düsseldorf.

Schön, Claudia und Hartmann, Hans, 2014.

Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Berichte aus dem TFZ Band 36. Straubing.

Struschka, M., Emich, O., Baumbach, G., 2004:

Untersuchungen an einem Stückholzkessel mit und ohne Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen. Forschungsbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.

Struschka, M., Heller, H. G., Straub, D., Baumbach G., Hartmann, H., Roßmann, P., Turowski, P., Link, H., Marks, A., 2005:

Vergleichende Untersuchungen zur Aussagefähigkeit der Überwachungsmessungen nach der 1. BImSchV bei Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Endbericht FKZ UFOPLAN 201 44 315 im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin.

Struschka, M., Goy, J., Schäfer, C., Kampffmeyer, T., Jenssen, T., König, A., Uzbasich, M., Eltrop, L., Friedrich, R., 2010:

Beitrag von Pelletsfeuerungen zu den Emissionen von Feinstäuben, CO und VOC in Ballungsräumen. Endbericht zum FKZ A24206 im Auftrag der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg in Karlsruhe, Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik und Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart.

Testo AG, 2016:

Auswertung der Messergebnisse. <https://www.testo.de/trainings/online-trainings/feinstaub-messung/tipps-tricks/messergebnisse.jsp>. Zugriff am 6 April 2016.

VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1, November 2006.

Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Beuth Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 4206 Blatt 1, August 2010.

Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinf Feuerungsanlagen. Messgeräte zur Ermittlung von gasförmigen Emissionen und Abgasparametern. Beuth Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2, Februar 2015.

Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinf Feuerungsanlagen. Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen. Beuth Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2, 2016.

Messen von Emissionen an Kleinf Feuerungsanlagen. Messen an Anlagen für feste Brennstoffe. Beuth Verlag, Berlin.

Wöhler, 2012.

Bedienungsanleitung Feinstaubmessgerät Wöhler SM 500. Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH, Bad Wünnenberg. Ausgabe 24.01.2012.

Wöhler, 2015.

Technische Daten Wöhler SM 500 Staubmessgerät. Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH. http://www.woehler.de/uploads/tx_leonexdownloads/Woehler_SM500_TechnischeDaten.pdf, Zugriff am 23 November 2015.

ZIV, 2015.

Auswertung der Messungen und Angabe der Messergebnisse bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband (ZIV), St. Augustin, Juni 2015.

ZIV, 2014.

Messunsicherheit für die Beurteilung der Messergebnisse bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband (ZIV), St. Augustin, Januar 2014.

8 Anhang

Tabelle 8.1 Feldmessungen - Anlage 1 - Messergebnisse Referenzmessgeräte, Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM

Anlage 1 - Hackschnitzelkessel		O ₂ in Vol.-%			Abgas-temperatur	Kessel-leistung
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	°C	kW
09.02.2016	1	8,4	8,6	8,6	132	700
09.02.2016	2	7,9	8,1	8,1	132	720
09.02.2016	3	8,4	8,6	8,7	131	640
19.02.2016	1	7,7	7,8	7,6	133	940
19.02.2016	2	8,2	8,3	8,2	135	980
19.02.2016	3	7,9	8,1	7,9	134	950
24.02.2016	1	6,7	6,8	6,7	144	990
24.02.2016	2	7,4	7,6	7,5	143	940
24.02.2016	3	7,2	7,4	7,4	144	890
03.03.2016	1	7,3	-	7,4	137	930
03.03.2016	2	6,8	7,1	7,0	136	813
03.03.2016	3	7,3	7,4	7,5	136	825

Anlage 1 - Hackschnitzelkessel		Staub in mg/m ³			CO in mg/m ³		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
09.02.2016	1	29	36	16	1.483	1.645	1.603
09.02.2016	2	29	25	19	968	1.094	1.083
09.02.2016	3	25	26	18	1.004	1.102	1.078
19.02.2016	1	56	33	22	182	176	183
19.02.2016	2	26	31	14	12	0	15
19.02.2016	3	20	22	15	10	0	11
24.02.2016	1	36	23	21	21	0	24
24.02.2016	2	54	36	20	192	173	215
24.02.2016	3	72	46	36	167	153	181
03.03.2016	1	40	-	20	230	-	254
03.03.2016	2	23	25	5	36	20	46
03.03.2016	3	42	59	22	268	255	291

Anlage 1 - Hackschnitzelkessel		Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)			CO in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
09.02.2016	1	19	22	10	945	1.061	1.030
09.02.2016	2	18	15	12	590	678	670
09.02.2016	3	16	16	12	639	710	700
19.02.2016	1	33	19	13	110	106	110
19.02.2016	2	16	19	9	8	0	10
19.02.2016	3	12	13	9	6	0	10
24.02.2016	1	20	12	12	12	0	10
24.02.2016	2	31	21	12	113	102	130
24.02.2016	3	42	27	21	97	89	110
03.03.2016	1	23	-	12	134	-	150
03.03.2016	2	13	14	3	21	11	30
03.03.2016	1	25	34	13	157	150	170

Tabelle 8.2 Feldmessungen - Anlage 2 - Messergebnisse Referenzmessgeräte, Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM

Anlage 2 - Pelletkessel 1		O ₂ in Vol.-%			Abgas-temperatur
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	°C
10.02.2016	1	6,5	6,3	6,4	263
10.02.2016	2	7,2	7,1	7,0	252
18.02.2016	1	6,4	6,4	-	257
18.02.2016	2	6,8	6,8	6,7	238
18.02.2016	3	17,4	17,4	17,6	201
25.02.2016	1	5,9	6,1	6,3	266
25.02.2016	2	6,7	6,8	6,9	255
04.03.2016	1	6,3	6,4	6,4	285
04.03.2016	2	5,9	6,1	6,0	298
04.03.2016	3	6,4	6,5	6,5	271

Anlage 2 - Pelletkessel 1		Staub in mg/m ³			CO in mg/m ³		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
10.02.2016	1	113	89	91	1.665	2.001	1.883
10.02.2016	2	125	111	110	2.107	2.704	2.472
18.02.2016	1	117	94	-	1.647	1.707	-
18.02.2016	2	106	101	89	1.641	1.939	1.805
18.02.2016	3	52	18	33	2.617	2.537	2.646
25.02.2016	1	99	88	72	2.252	2.612	2.321
25.02.2016	2	117	112	86	1.991	2.267	2.258
04.03.2016	1	61	57	38	642	650	683
04.03.2016	2	86	79	68	1.108	1.214	1.185
04.03.2016	3	85	82	69	1.200	1.348	-

Anlage 2 - Pelletkessel 1		Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)			CO in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
10.02.2016	1	62	47	50	918	1.088	1.030
10.02.2016	2	73	64	63	1.226	1.556	1.410
18.02.2016	1	64	51	-	903	934	-
18.02.2016	2	59	57	50	922	1.092	1.010
18.02.2016	3	115	39	77	5.755	5.636	6.290
25.02.2016	1	53	46	39	1.193	1.402	1.260
25.02.2016	2	66	63	49	1.117	1.276	1.280
04.03.2016	1	33	31	21	349	356	370
04.03.2016	2	46	42	36	588	651	630
04.03.2016	3	46	45	38	658	743	-

Tabelle 8.3 Feldmessungen - Anlage 3 - Messergebnisse Referenzmessgeräte, Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM

Anlage 3 - Pelletkessel 2		O ₂ in Vol.-%			Abgas-temperatur
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	°C
16.02.2016	1	-	8,1	8,5	-
16.02.2016	2	-	8,6	8,7	-
23.02.2016	1	11,9	12,0	12,0	135
23.02.2016	2	11,6	11,5	11,7	129
01.03.2016	1	9,4	9,3	9,5	138
08.03.2016	1	8,3	8,3	8,4	169
08.03.2016	2	8,4	8,6	8,4	174
08.03.2016	3	8,6	8,7	8,8	170

Anlage 3 - Pelletkessel 2		Staub in mg/m ³			CO in mg/m ³		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
16.02.2016	1	127	119	120	-	16	38
16.02.2016	2	136	143	128	-	15	41
23.02.2016	1	72	88	66	165	111	205
23.02.2016	2	69	123	65	286	223	315
01.03.2016	1	30	66	23	22	0	33
08.03.2016	1	97	100	85	41	19	45
08.03.2016	2	95	109	90	36	15	45
08.03.2016	3	99	105	95	40	15	44

Anlage 3 - Pelletkessel 2		Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)			CO in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
16.02.2016	1	-	74	77	-	10	20
16.02.2016	2	-	91	83	-	9	30
23.02.2016	1	64	78	59	146	98	180
23.02.2016	2	59	103	56	244	187	270
01.03.2016	1	20	45	16	15	0	20
08.03.2016	1	61	63	54	26	11	30
08.03.2016	2	60	70	57	23	9	30
08.03.2016	3	63	68	62	26	9	30

Tabelle 8.4 Feldmessungen - Anlage 4 - Messergebnisse Referenzmessgeräte, Wöhler SM 500 und Feinstaubmessgerät FSM

Anlage 4 - Stückholzkessel		O ₂ in Vol.-%			Abgas-temperatur
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	°C
16.02.2016	1	15,3	15,3	15,2	167
16.02.2016	3	11,6	11,8	11,9	173
23.02.2016	1	8,2	8,3	8,4	157
23.02.2016	2	7,9	8,0	8,2	148
01.03.2016	1	9,1	9,2	9,2	195
01.03.2016	2	7,7	7,8	8,0	192

Anlage 4 - Stückholzkessel		Staub in mg/m ³			CO in mg/m ³		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
16.02.2016	1	53	52	42	6.381	7.545	7.022
16.02.2016	3	65	71	68	10.047	12.365	12.186
23.02.2016	1	332	676	284	8.915	9.430	9.534
23.02.2016	2	541	887	293	8.226	10.035	8.722
01.03.2016	1	546	936	288	13.304	17.738	15.715
01.03.2016	2	318	554	166	6.662	9.884	8.376

Anlage 4 - Stückholzkessel		Staub in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)			CO in mg/m ³ (bei 13 Vol.-% O ₂)		
Datum	Mess-nummer	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM	Referenz-messgerät	Wöhler SM 500	MRU FSM
16.02.2016	1	75	72	58	8.932	10.585	9.750
16.02.2016	3	55	60	60	8.527	10.748	10.650
23.02.2016	1	208	423	180	5.576	5.938	6.040
23.02.2016	2	330	545	183	5.019	6.173	5.430
01.03.2016	1	366	634	195	8.919	12.022	10.630
01.03.2016	2	191	336	102	4.004	5.988	5.150

Tabelle 8.5 Schornsteinfegermessungen - Hinweis zu CO-Messergebnissen

Vorgehensweise Schornsteinfeger	Für die Auswertung von Messungen wird sowohl ein Ausdruck der Messwerte kurz vor Messende als auch nach Messende (Aufdruck Mittelwert) verwendet, da die jeweils aufgeführten Messwerte identisch seien.
Hinweis	Beim Staub (PM) wird in der Bezeichnung zwischen Momentanwert und Mittelwert (Dauer von Messbeginn bis zum Ausdruck) unterschieden. Bei CO und O ₂ erfolgt in den Bezeichnungen keine Unterscheidung. Für die Auswertung der durchgeführten Messungen lagen sowohl Ausdrücke kurz vor Messende als auch nach Messende mit Aufdruck Mittelwert vor.
persönliche Mitteilung, Andreas Kaufmann, 3.1.2017, Testo SE & Co. KGaA	Eine mögliche Ursache für die hohen Abweichungen bei den CO-Messungen der Anlagen A1-1 und A2-2 könnte darin liegen, dass Daten einer Momentaufnahme, also Aktuellwerte statt Mittelwerte, verwendet wurden. Zum Beispiel über den Ausdruck von Aktuellwerten während der Messung oder kurz vor Messende