

Universität Stuttgart

**Abteilung
Reinhaltung der Luft**

Geruchsbelästigungen durch Holz- feuerungen



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

in Zusammenarbeit mit



**Ingenieurbüro Lohmeyer
GmbH & Co. KG**

Immissionsschutz, Klima,
Aerodynamik, Umweltsoftware

Geruchsbelästigungen durch Holzfeuerungen

Teilprojekt: Feuerungsversuche

Dr.-Ing. Michael Struschka

M.Sc. Patricia Winter

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>

Teilprojekt: Geruchsmessungen

Dr.-Ing. Wolfgang Bächlin

Dr.-Ing. Achim Lohmeyer

Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG

An der Roßweid 3, 76229 Karlsruhe

Tel.: +49 721 625 100

info.ka@lohmeyer.de

www.lohmeyer.de

Messbericht im Auftrag der
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe

November 2013

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Kenntnisstand	3
3	Versuchsaufbau	7
3.1	Feuerstätte.....	7
3.2	Messstrecken und Gasanalytoren	8
3.3	Ablauf der Messungen	13
3.3.1	Betriebsparameter	13
3.3.2	Versuchsdurchführung	14
3.3.3	Probenahmen und Versuchsübersicht	16
3.3.4	Messung organischer Verbindungen mit FID und Sensoren	23
3.3.5	Datenaufbereitung	25
3.3.6	Mittelwertbildung.....	26
4	Ergebnisse der Geruchsmessungen.....	27
4.1	Mittelwerte der untersuchten Betriebszustände	32
4.2	Zusammenhänge für die Verbrennungsphasen.....	36
5	Ergebnisse der Schweizer Anfeuerungsmethode	48
6	Ergebnisse der PAK-Messungen.....	52
7	Ergebnisse der Sensormessungen	57
8	Ergebnisse der Ascheanalysen	64
9	Zusammenfassung	67
10	Quellenverzeichnis	69
11	Anhang.....	70

1 Einleitung

Auf Grund stetig steigender Energiepreise und der Förderung als regenerative Energiequelle werden immer mehr Holzheizungen eingesetzt. So erhöhte sich in den letzten Jahren vor allem der Bestand von Pelletkesseln, aber auch die Anzahl der installierten Stückholzkessel nahm leicht zu. Eine deutliche Zunahme der Bestandszahlen ergab sich in den letzten Jahren bei Einzelraumfeuerstätten, vor allem bei Kaminöfen, die oft nachträglich in Wohnungen und Häuser eingebaut werden. Dieser vermehrte Einsatz von Holzfeuerungen führt häufig zu flächenhaften Geruchsbelästigungen in der Umgebung, wodurch sich Nachbarschaftsbeschwerden ergeben können, die nicht selten vor Gericht enden.

In vielen Kommunen stellt sich z.B. daher die Frage, ob man in bestimmten Quartieren oder bei der Erstellung von Bebauungsplänen Holzfeuerungen zulassen darf oder ob z.B. ein Verbrennungsverbot für feste Brennstoffe ausgesprochen werden soll. Dies kann man bei bestehenden Quartieren oder im Vorfeld von Planungen für neue Wohngebiete anhand von Ausbreitungsrechnungen diskutieren und dann entsprechende Maßnahmen vorsehen. Wichtige Eingangsgröße für die Ausbreitungsrechnungen stellen die Emissionen dar. Für deren Bestimmung benötigt man Emissionsfaktoren, d.h. z.B. Informationen darüber, welcher Geruchsmassenstrom bei bestimmten Randbedingungen aus einer Holzfeuerung in Abhängigkeit unterschiedlicher Abbrandzustände (Anbrennvorgang, Hauptverbrennungsphase, Ausbrand) freigesetzt wird. Solche Emissionsfaktoren, die auch die verschiedenen Lastzustände der Holzfeuerung berücksichtigen, fehlen derzeit. Dies bewirkt, dass auch die darauf aufbauenden Ausbreitungsrechnungen nicht zu realistischen, belastbaren Ergebnissen führen können. Deshalb besteht ein dringender Bedarf, Geruchsemissionsfaktoren für Holzfeuerungen bei unterschiedlichen Lastzuständen zu ermitteln.

Verursacht werden die belästigenden Geruchsemissionen meist durch ungünstige Verbrennungsbedingungen in Kombination mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen. Ungünstige Verbrennungsbedingungen können bauartbedingt unvermeidbar (z.B. bei Kaminöfen, Kamin- und Kachelofeneinsätzen) sein oder durch technische Mängel, nicht dem Stand der Technik entsprechende Anlagen, Bedienungsfehler oder durch die Nutzung ungeeigneter Brennstoffe verursacht werden. Bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen nehmen die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und Partikel) mehr oder weniger stark zu. Da die Geruchsemissionen bei diesen Anlagen von organischen Verbindungen verursacht werden, sollten diese bei schlechten Verbrennungsbedingungen ebenfalls in Abhängigkeit des VOC-Anstiegs zunehmen.

Während man für andere Luftschadstoffe in umfangreichen Messprogrammen Emissionsfaktoren ermittelt hat, liegen für Gerüche bisher keine belastbaren allgemeingültigen Emissionsfaktoren für Holzheizungen vor. Hinzu kommt, dass bei den Geruchsemissionen auf Grund der Betrachtung der Überschreitungshäufigkeiten nicht die jahresmittleren Werte, sondern vor allen Dingen die kurzzeitigen Werte von Interesse sind und deshalb auch bei den Emissionsfaktoren die verschiedenen Abbrandzustände deutlich zu differenzieren sind. Bei mehr als 6 Minuten Geruchswahrnehmung in einer Stunde wird nach Geruchsemissionsrichtlinie (GIRL) die ganze Stunde als Geruchsstunde bewertet. Deshalb ist der zeitliche Verlauf der Emissionen für die Modellierung unverzichtbar. Es besteht daher ein dringender Bedarf, Emissionsfaktoren für den Betrieb von Holzheizungen zu ermitteln.

Aus diesem Grund werden Geruchsmessungen an einem Kaminofen, als wichtigem Vertreter von Einzelraumfeuerstätten, mit unterschiedlichen Qualitäten von stückigen Holzbrennstoffen bei unterschiedlichen Betriebszuständen vorgenommen. Die Probenahme für die Geruchsmessungen erfolgen bei Abgastemperaturen im Bereich von ca. 180 bis 230 °C mit dynamischer Vorverdünnung und Probensammlung in Beuteln.

Geruchsmessungen werden bei den 3 Betriebszuständen guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung vorgenommen. Innerhalb eines Betriebszustands erfolgen Geruchsmessungen jeweils beim Anzündvorgang bei kaltem Kaminofen und feinem Holz sowie bei 3 aufeinander folgenden Abbränden. Innerhalb eines Chargenabbrandes werden die Geruchsstoffkonzentrationen beim Anbrandvorgang, während der Hauptverbrennungsphase und in der Ausbrandphase ermittelt. Eingesetzt wird trockenes und nasses Buchenscheitholz sowie trockenes Tannenholz.

Anhand dieser Untersuchungen werden exemplarisch die Geruchsemissionen für Kaminöfen bei unterschiedlichen Betriebszuständen, Brennstoffen und jeweils differenziert für die verschiedenen Verbrennungsphasen ermittelt. Es ist zu überprüfen, ob und mit welchen Zusammenhängen eine Korrelation zwischen den VOC- und den Geruchsstoffkonzentrationen gegeben ist.

Darüber hinaus ist in dem Projekt zu untersuchen, ob es emissionsseitige Vorteile hat, wenn der erste Chargenabbrand bei kaltem Ofen nicht mit einem kleinen Vorfeuer zur Erzeugung einer Grundglut (Anzündvorgang) und anschließender Holzaufgabe auf diese Grundglut durchgeführt wird, sondern die Holzcharge und etwas feines Holz von oben angezündet wird (Schweizer Anfeuerungsmethode). Bei diesen Versuchen sollen keine Geruchsmessungen durchgeführt werden.

Des Weiteren sind im Rahmen des Projekts die Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei zwei Betriebszuständen (gute und schlechte Verbrennung) in Abhängigkeit der Verbrennungsphase zu untersuchen. Bei diesen Versuchen sollen ebenfalls keine Geruchsmessungen durchgeführt werden. Die PAK-Messungen werden von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) durchgeführt.

Außerdem sollten mit einem neuartigen Sensorelement (LSM-Sensor) sowie herkömmlichen Sensorelementen vom Typ CarboSen 1000 mit Deckschicht, jeweils zur Messung von gasförmigen Produkten unvollständiger Verbrennung (z.B. CO und VOC), orientierende Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Hierbei ist zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Geruchsemission erkennbar ist.

Letztlich ist bei einem Teil der Feuerungsversuche eine Ascheprobe von der Rostasche zu entnehmen und zu analysieren. Es soll geprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffen der Rostasche und Betriebszustand der Feuerung gegeben ist.

2 Kenntnisstand

Bisher wurden nur wenige Geruchsuntersuchungen an Biomassefeuerungen publiziert. Eine ältere Untersuchung, die Ergebnisse aus verschiedenen Messungen an 5 mechanisch beschickten Heizkesseln im Bereich von 60 bis 3.000 kW Nennwärmeleistung mit unterschiedlichen Brennstoffen (Hackschnitzel und Werkstoffreste) enthält, liefert gemessene Geruchsstoffkonzentrationen für unterschiedliche Feuerungsleistungen der Anlagen unter Angabe der gleichzeitig ermittelten Sauerstoff-, CO- oder VOC-Konzentrationen [Richter und Röckle, 2000].

Eigene Auswertungen der Ergebnisse dieser Untersuchung ergeben die in Abbildung 2.1 gezeigten Zusammenhänge zwischen Geruchsstoffkonzentration und CO- bzw. VOC-Konzentration im Abgas der Heizkessel.

Bei den Messungen dieser Untersuchung wurde entweder die VOC- oder die CO-Konzentration parallel zu der Geruchsstoffkonzentration bestimmt. Für die Messungen ist in der Tendenz ein Zusammenhang zwischen Geruchs- und VOC-Konzentrationen gegeben.

In einer aktuellen Untersuchung wurden u.a. die Geruchsemissionen eines modernen Kaminofens beim Betrieb mit 12 unterschiedlichen europäischen Hölzern bestimmt. Hierbei wurde der Kaminofen aus dem kalten Zustand mit einer Holzcharge in Betrieb genommen. Nach dem Abbrand der ersten Charge wurde eine zweite Brennstoffcharge aufgegeben. Die Ergebnisse liegen als Mittelwert der beiden Abbrände vor. Die meisten Abbrandversuche wurden im Bereich der Nennwärmeleistung des Kaminofens durchgeführt [Kistler, 2012].

Eigene Auswertungen der Ergebnisse dieser Untersuchungen ergeben die in Abbildung 2.2 gezeigten Zusammenhänge zwischen den Konzentrationen für Geruch und CO bzw. VOC im Abgas des Kaminofens beim Betrieb mit unterschiedlichen europäischen Hölzern.

Auch für diese Messungen ist in der Tendenz ein Zusammenhang zwischen Geruchsstoffkonzentrationen und VOC-Konzentrationen gegeben. Bei den CO-Konzentrationen ist nur ein schwacher Zusammenhang zu den Geruchsstoffkonzentrationen zu erkennen. Bei der Interpretation dieser Messungen an einem Kaminofen ist allerdings zu beachten, dass hier Mittelwerte über zwei Abbrände vorliegen, die alle Verbrennungsphasen (Anbrand, Hauptverbrennungs- und Ausbrandphase) umfassen.

In einem vom Umweltbundesamt Dessau geförderten Projekt wurde untersucht, welche Zusatzbelastungen durch Holzfeuerungen in Siedlungsgebieten auftreten können [Baumbach et al., 2010]. Hierbei wurden für unterschiedliche Emissionskomponenten wie z.B. CO, VOC und Feinstäube auf Basis eines dort entwickelten Emissionsmodells auch Ausbreitungsrechnungen für unterschiedliche Modellgebiete durchgeführt. Auch für Geruchsemissionen wurden orientierende Berechnungen durchgeführt, ein beispielhaftes Ergebnis dieser Ausbreitungsrechnungen ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Geruchsemissionen wurden damals auf Grundlage der Messergebnisse von Richter und Röckle [2000] (siehe Abbildung 2.1 oben) berechnet.

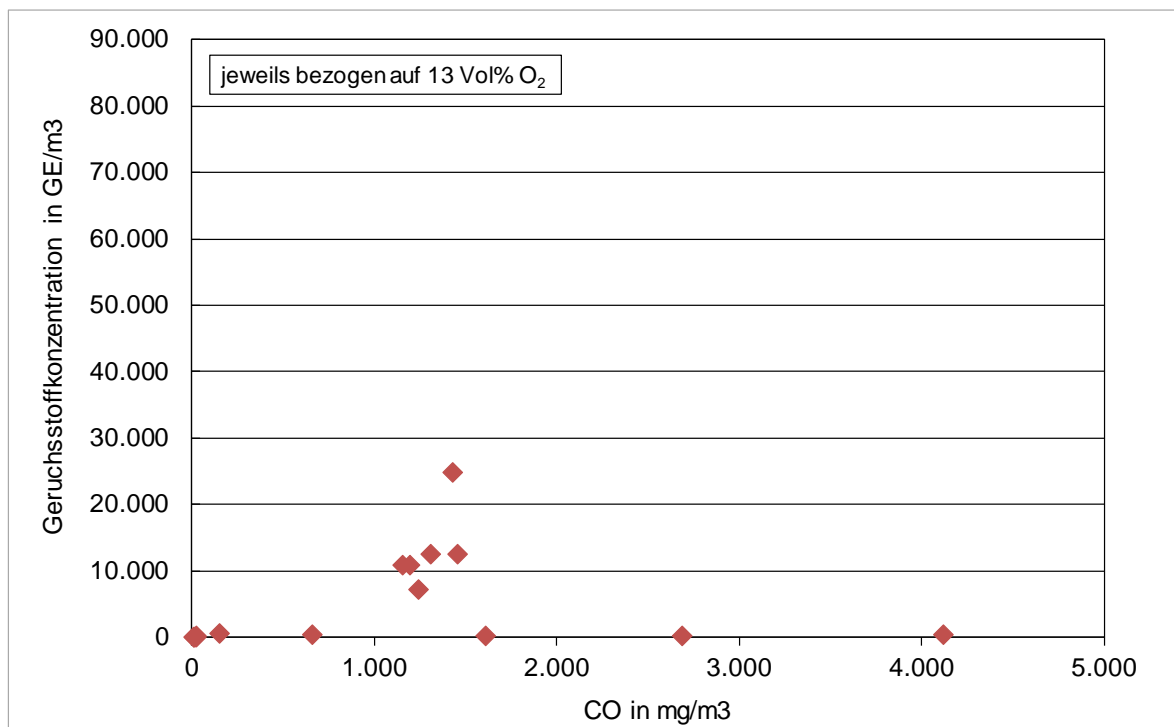
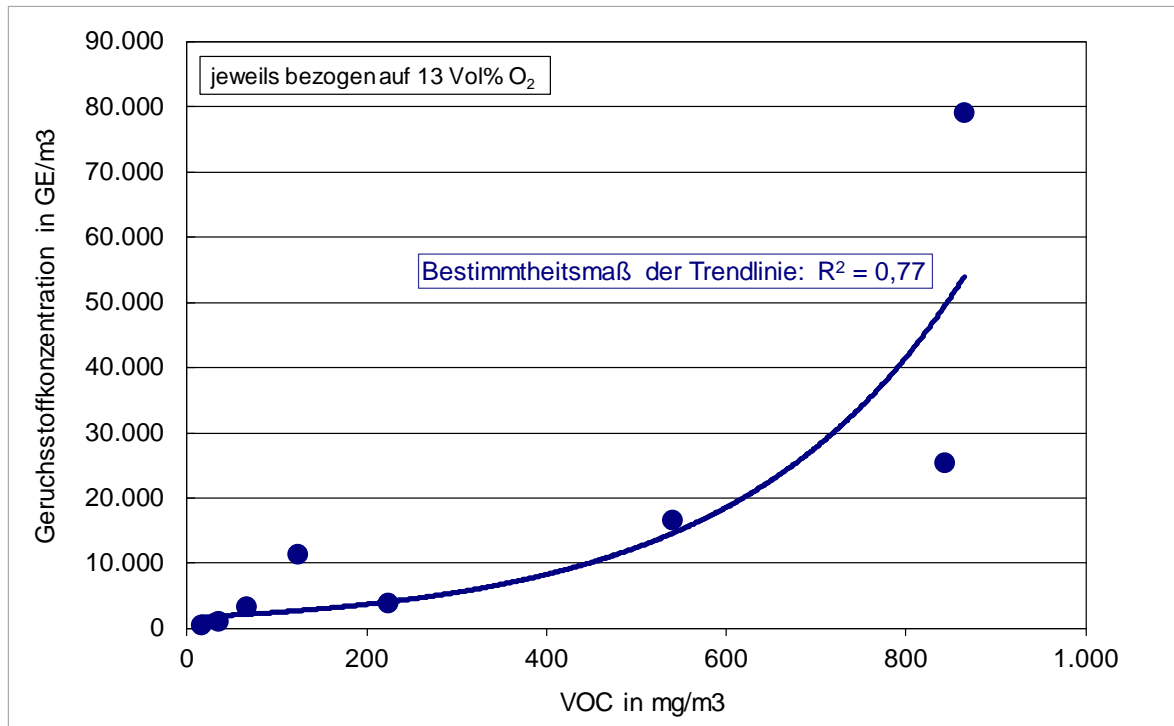


Abbildung 2.1 Korrelation von Geruchsstoffkonzentration und VOC- bzw. CO-Konzentration bei unterschiedlichen mechanisch beschickten Heizkesseln (Brennstoffe Hackschnitzel und Werkstoffreste) [nach Daten aus Richter und Röckle, 2000]

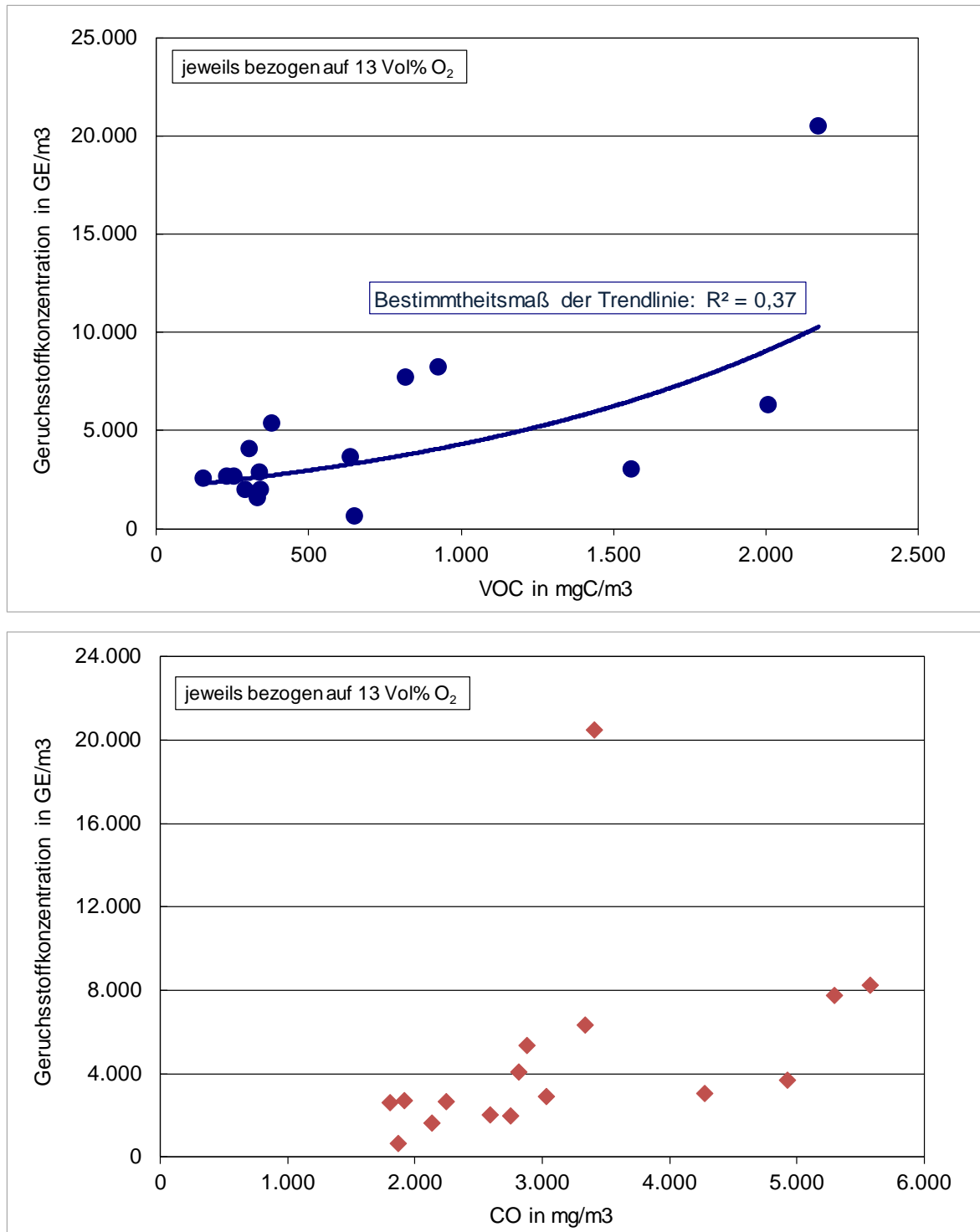


Abbildung 2.2 Korrelation von Geruchsstoffkonzentration und VOC- bzw. CO-Konzentration beim Betrieb eines Kaminofens mit unterschiedlichen europäischen Hölzern [nach Kistler, 2012]

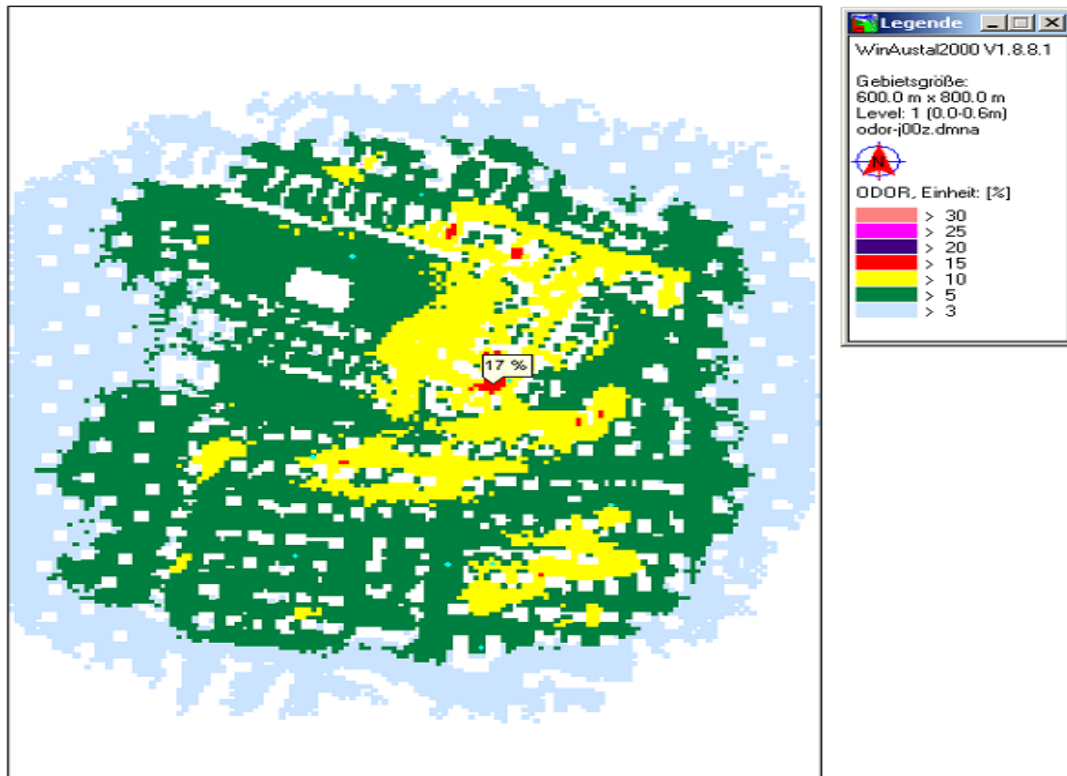


Abbildung 2.3 Geruchswahrnehmungshäufigkeiten in Prozent der Jahresstunden für 1.5 m Höhe, Stückholzkessel mit Pufferspeicher Variante 1 [Baumbach et al., 2010]

Als Ergebnis von Ausbreitungsrechnungen für Geruch erhält man flächenhaft die Überschreitungshäufigkeiten der Geruchsstunden, die exemplarisch in Abbildung 2.3 dargestellt sind. Diese Werte können für eine Bewertung z.B. anhand der Geruchsimmissionsrichtlinie (GIRL) [LAI, 2008] herangezogen werden. Entsprechend der GIRL liegt eine Geruchsstunde vor, wenn es in mindestens 10% der Zeit der Stunde zu Geruchswahrnehmungen kommt. Es werden die Überschreitungshäufigkeiten betrachtet, bei denen es nur auf die Entscheidung ankommt, ob eine Geruchsstunde vorliegt oder nicht (und nicht wie hoch die Geruchsstoffkonzentration in der Geruchsstunde ist).

In obigem Projekt konnte für Gerüche gezeigt werden, dass die berechneten Überschreitungshäufigkeiten z.T. hoch sind und in diesen Fällen schon bei einem geringen Energieanteil von Stückholzkessel die zulässigen Immissionswerte der Geruchsimmissionsrichtlinie flächig deutlich überschritten wären.

3 Versuchsaufbau

Im vorliegenden Projekt wurden in einem gewissen zeitlichen Abstand unterschiedliche Messreihen mit z.T. wechselnden Zielsetzungen durchgeführt. Geruchsmessungen wurden im Oktober und November 2011 mit Buchenholz, im Februar 2012 mit Tannenholz und im November 2012 mit nassem Buchenholz durchgeführt. Eine zusätzliche Messreihe mit Buchenholz wurde im August 2012 vorgenommen.

Das Anbrennverhalten des Kaminofens bei Aufgabe der Holzcharge in den kalten Ofen und Anzünden mit feinem Holz von oben (Schweizer Anfeuerungsmethode) wurde im Januar 2012 untersucht, hierbei wurden die Geruchsemissionen nicht erfasst.

Die Messungen der Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) beim Betrieb des Kaminofens mit Buchenholz wurden im April 2012 durchgeführt.

Das neuartige Sensorelement (LSM-Sensor) zur Messung von gasförmigen Produkten unvollständiger Verbrennung für orientierende Vergleichsmessungen wurde bei den Geruchsmessungen im Oktober und November 2011 eingesetzt.

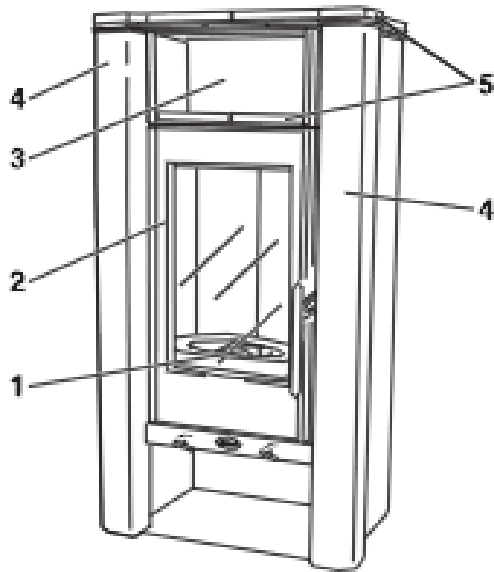
Aufgrund der längeren Projektlaufzeit und der während des Projektes gleichzeitigen Inbetriebnahme des neuen Technikums des IFK konnten die Versuche nicht alle am selben Versuchsstand (Standort des Kaminofens im Technikum) stattfinden. So wurden alle Versuche bis zum Februar 2012 am Versuchsstand I und danach am Versuchsstand II durchgeführt. Ein Einfluss des Versuchsstandes wurde bei den Geruchsmessungen nicht festgestellt.

3.1 Feuerstätte

Für die Untersuchungen wurde als typischer Vertreter des installierten Bestandes an Kaminöfen der Typ blueline 4W vom Hersteller Buderus eingesetzt. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Zeitbrandofen mit selbstschließender Feuerraumtür nach DIN EN 13240 [2005], Kategorie 1a. Der Kaminofen kann raumluftabhängig oder mit einer externen Verbrennungsluftversorgung betrieben werden. Das Raumheizvermögen, bezogen auf die Luftwärmeleistung, beträgt 15 - 35 m³. Der Kaminofen (siehe Abbildung 3.1) wird manuell beschickt und ist über eine Rücklaufanhebung an ein Vor- und Rücklaufsystem mit Wasserkühlung angeschlossen. Der Kaminofen ist, mit geringen konstruktiven Änderungen, derzeit immer noch am Markt erhältlich, er wird mit und ohne integrierten Warmwasser-Wärmeübertrager angeboten.

Da der Kaminofen nur manuell über die Schieberegler für die Primär- und Sekundärluft gesteuert wird, beeinflusst die Rücklauftemperatur des Wasserkreises die Kesselleistung bzw. die Feuerungsleistung nicht. Die Kacheln waren während der Versuche nicht angebracht, wodurch die Verbrennung aber auch nicht beeinflusst wurde.

Am Abgasstutzen des Kaminofens wurde die Messstrecke zur Geruchs- und Gasprobenahme angeschlossen. Im Anschluss der Messstrecke war jeweils ein weiteres senkrechtes Abgasrohrstück montiert, damit sich ein gewisser natürlicher Kaminzug einstellt. Über eine Absaughaube und mit nachfolgendem Saugzuggebläse wurde ein definierter Unterdruck vor der Messstelle eingestellt. Dieser Unterdruck veränderte sich nur leicht während der Abbrandversuche.



- 1 Rost/ Feuerraum
- 2 Feuerraumtür
- 3 Warmhaltefach
- 4 Seitenteile
- 5 Kacheln / Naturstein- Serpentino



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

Abbildung 3.1 Kaminofen vom Typ blueline 4W des Herstellers Buderus [2007]

3.2 Messstrecken und Gasanalysatoren

Für die Geruchsmessungen wurde eine normgerechte Messstrecke nach DIN EN 15259 [2008] bezüglich der Ein- und Auslaufstrecken aufgebaut. Die Messstellen für Gerüche und Gaskonzentrationen befinden sich in gleicher Entfernung vom Ofenauslass, sie werden über zwei separate Messöffnungen erschlossen (bei Versuchsstand I: gegenüberliegende Messöffnungen, Versuchsstand II: Messöffnungen stehen im Winkel von 90° zueinander und sind um ca. 10 cm versetzt angeordnet). Abbildung 3.2 zeigt die Messstellen für den Versuchsstand I schematisch und als Foto, Abbildung 3.3 zeigt die beheizte Probenahmesonde für die Geruchsmessungen.

Die Geruchsprobenahme aus dem Abgasrohr erfolgt mit einem Ø 6 mm Edelstahlrohr. Die Verbindung zwischen beheizter Sonde mit dynamischem Verdünnern und Edelstahlrohr erfolgte mit einem Teflonschlauch, welcher nach den einzelnen Versuchsreihen jeweils ausgetauscht wurde. Kritisch bei den Probenahmen waren Ablagerungen in der Drossel vor der Gasstrahlpumpe, da diese im Laufe eines Messtages nicht gereinigt werden kann, aber zur Veränderung des Volumenstroms führen kann.

Im Projektverlauf bewährte sich eine nach der Gasstrahlpumpe eingebaute Drosselleitung, die bei Bedarf gewechselt bzw. gespült werden kann. Nach jeder Messung wurde die Drosselleitung gespült und der Durchfluss gemessen.

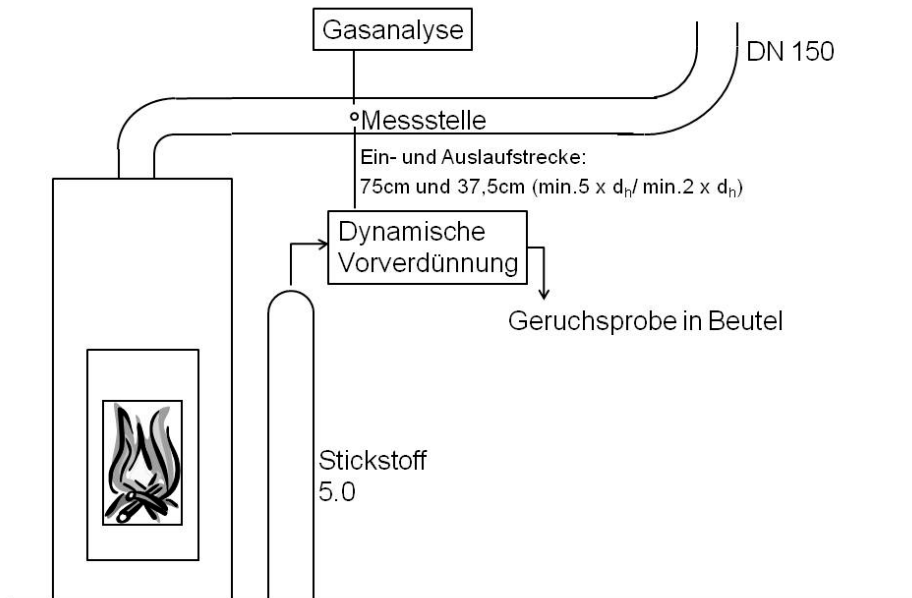


Abbildung 3.2 Schematische Darstellung für Versuchsstand I der Messstellen für Gerüche und Gasanalyse und Foto des Versuchsstandes I (links) und dynamischer Vorverdünner (rechts)

Zur Berechnung des Massenstromes aus den gemessenen Geruchsstoffkonzentrationen ist es notwendig, den Abgasvolumenstrom zeitaufgelöst zu messen. Der Emissionsmassenstrom ergibt sich als Produkt aus der Massenkonzentration und dem zeitgleichen Volumen-

strom. Der Volumenstrom wird anhand einer Kombination von Geschwindigkeitsmessung des Gasstromes und Verbrennungsrechnung berechnet. Beim Versuchsaufbau I wurde der Verbrennungsluftvolumenstrom ermittelt. Hierzu war am Anschluss für die externe Verbrennungsluftversorgung des Kaminofens ein Verlängerungsrohr mit einem Strömungssensor (Hersteller: Schmidt Technology Typ: SS20.250 Messbereich: 0-1m/s) angeschlossen. Beim Versuchsaufbau II wurde die Abgasgeschwindigkeit nach der Messstelle mit einem Flügelradanemometer (Hersteller: Höntzsch GmbH, Typ: Flügelrad FA ZS25/27GE, Messbereich: 0,4 bis 20 m/s) gemessen.

Aufgrund unterschiedlich langer Totzeiten von Geruchsprobe (vergleichsweise kurze Strecke von Messstelle bis Probenbeutel), Gasprobe für die Analysatoren (relativ lange Strecke von Messstelle zu Analysatoren mit Probenfilterung und Messgaskühler) und Sensoren (direkt im Abgasrohr montiert mit sehr kurzer Ansprechzeit unter einer Sekunde) ist ein Abgleich notwendig, dieser wurde bei der Auswertung der Messergebnisse vorgenommen. Hierzu wurde die Totzeit für die Gasprobenahme in Abhängigkeit des Analysators bestimmt. Damit eine exakte Zuordnung der Probenahmezeit für die Geruchsprobe erfolgen konnte, wurde während der Geruchsprobenahme ein konstantes Signal auf die Messwerterfassung per manuell bedientem Schalter gegeben.



Abbildung 3.3 Geruchsprobenahme mit beheizter Sonde und Anordnung der Messstelle für Versuchsstand I

Die PAK-Messungen wurden am Versuchsaufbau II durchgeführt. Die zeitgleich durchgeführte Gasprobenahme für die Bestimmung anderer gasförmiger Komponenten erfolgte etwas unterhalb der Messstelle für die PAK. Abbildung 3.4 zeigt schematisch die Probenahme für die Bestimmung von PAK und ein Foto des Versuchstandes II.

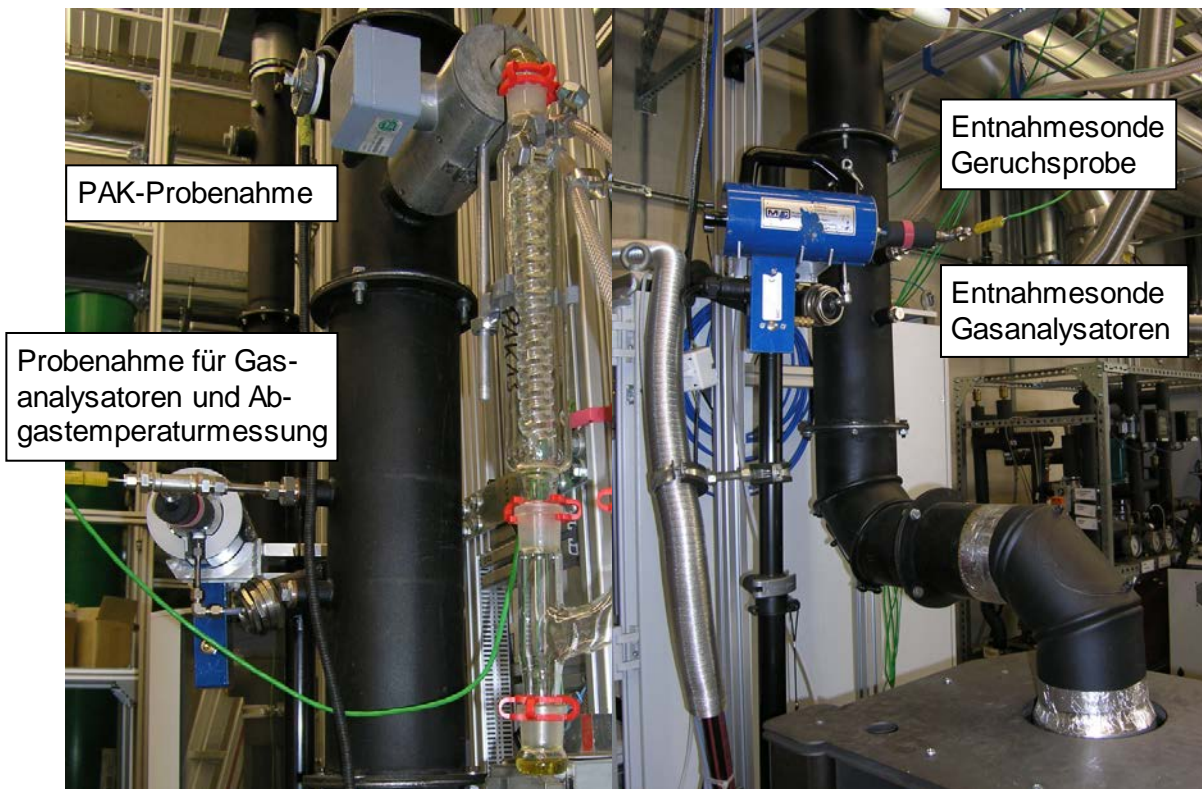
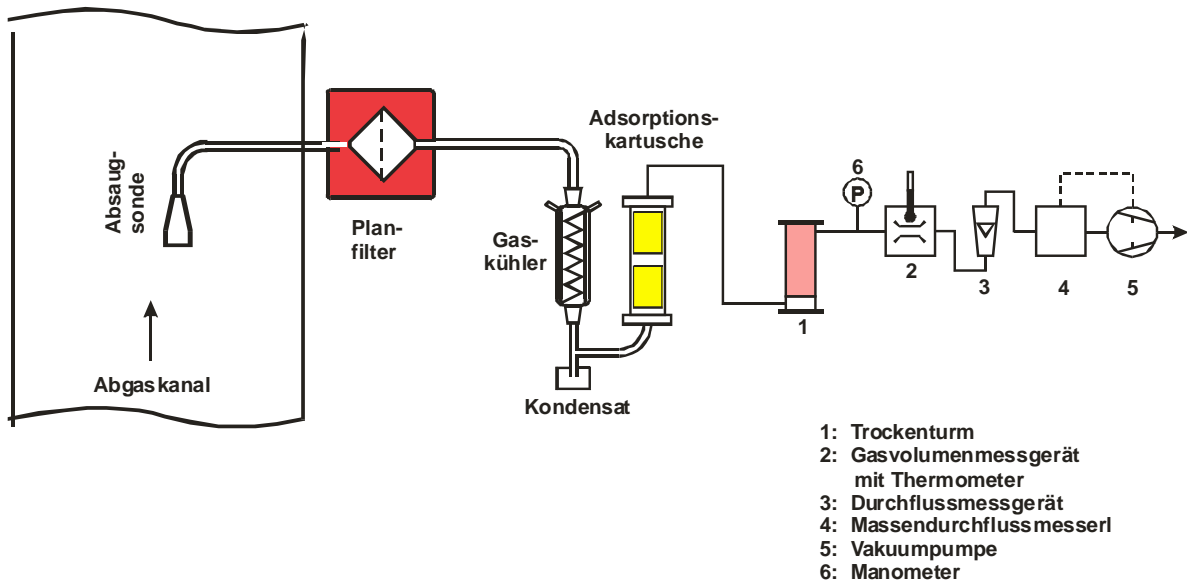


Abbildung 3.4 Schematischer Aufbau für PAK-Messungen (Bild oben) [Schlindwein, 2012] und Messstellen bei den Abbrandversuchen für die PAK-Bestimmung und die Geruchssprobe bei Messaufbau II (Bild unten)

Bei allen Messreihen wurden, neben der Abgastemperatur, dem Unterdruck im Abgasrohr unmittelbar nach dem Abgasstutzen des Kaminofens und der Geschwindigkeit von Verbrennungsluft bzw. Abgas, auch die Konzentrationen von CO_2 , O_2 , CO und VOC im Abgas gemessen. Darüber hinaus wurde nach den Geruchsmessungen die CO_2 -Konzentration der verdünnten Geruchssprobe in den Gassammelbeuteln für die Olfaktometrie zur Berechnung des Verdünnungsverhältnisses bestimmt.

In Tabelle 3.1 sind Angaben zu den verwendeten Gasanalytoren aufgelistet. Die Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Gaskonzentrationen im Abgas dürften im Bereich von 5 % liegen und sind damit deutlich niedriger als die Messunsicherheiten bei den Geruchsmessungen. Die Messunsicherheiten der Gaskonzentrationsmessungen werden deshalb in der Ergebnisdarstellung nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 3.1 Gemessene Gaskonzentrationen, Messprinzipien der Gasanalytoren und verwendete Prüfgaskonzentrationen

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Prüfgas	Messbereich
CO ₂ [Vol%]	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	12,1 Vol%	0-20 Vol%
CO [ppm]	EL3020 / ABB	nicht dispersive Infrarotabsorption	798 ppm	0-3.000 ppm
CO [Vol%]	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	0,706 Vol%	0-3 Vol%
O ₂ [Vol%]	EL3020 / ABB	Paramagnetismus	8,1 Vol%	0-25 Vol%
VOC [ppm]	FID 1230 PV / Testa	Flammenionisation	799 ppm	0-1.000 bzw. 0-10.000 ppm

Die Einbausituation der beiden neuartigen LSM-Sensorelemente und zweier herkömmlichen Sensorelemente vom Typ CarboSen 1000 mit Deckschicht (CS1000DS) ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Eine Beschreibung zur Funktionsweise der Sensoren und weiterer Untersuchungsziele mit den Sensoren findet sich in Struschka et al. [2012].

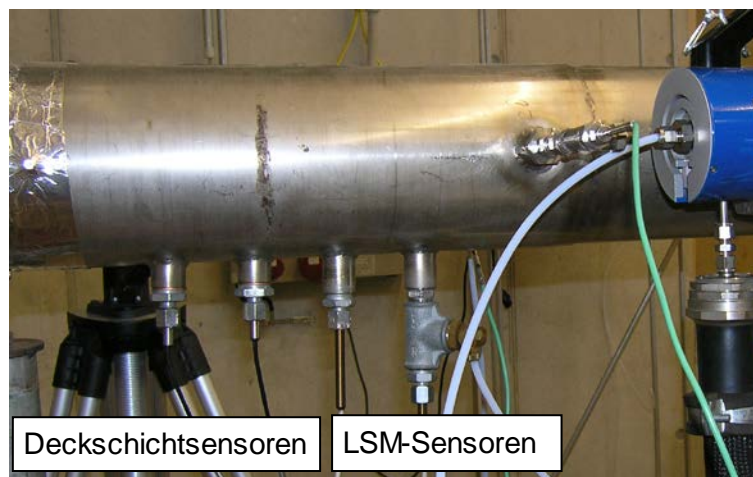


Abbildung 3.5 Einbausituation der eingesetzten Gassensoren (Deckschichtsensoren auf Basis des Typs CS1000, LSM-Sensoren) für gasförmige Produkte unvollständiger Verbrennung

3.3 Ablauf der Messungen

In Abhängigkeit von der Verweilzeit, der Verbrennungstemperatur und den Mischungsbedingungen in der Brennkammer werden die brennbaren Bestandteile des Holzbrennstoffs unter Abgabe von Wärme unterschiedlich vollständig in chemische Reaktionsprodukte umgewandelt. Liegen lokale oder deutlich ausgeprägte Luftmangelsituationen vor, ist die Verbrennung weniger oder mehr unvollständig und brennbare Bestandteile (CO und VOC) werden emittiert, was auch zu Wirkungsgradverlusten führt. Die gasförmigen organischen Verbindungen (VOC) können geruchsrelevante (z.B. Formaldehyd und Naphthalin) aber auch geruchsneutrale Komponenten (z.B. CH₄) enthalten, CO ist geruchsneutral.

Um verschiedene Betriebszustände einzustellen, wurde beim Kaminofen jeweils die Primär- und Sekundärluftzufuhr verändert. Betrachtet wurden 3 Betriebszustände - gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung. Der Betriebszustand gute Verbrennung wurde erreicht, wenn der Kaminofen in etwa entsprechend den Herstellerangaben (bezüglich Schornsteinzug und Einstellung der Verbrennungsluft, bei reduzierter Holzbeladung) betrieben wurde. Hierbei ergaben sich gut reproduzierbare und vergleichsweise geringe CO- und VOC-Konzentrationen im Abgas. Unter den gewählten Randbedingungen (z.B. Nachlegezeitpunkte für die nächste Holzaufgabe, Anzahl, Lage und Größe der Holzstücke) war dies in etwa der bestmögliche Betriebszustand für diesen Kaminofen. Es ist zu erwarten, dass bei der Bedienung des Kaminofens durch erfahrene Betreiber und wenn ähnliche gute Randbedingungen vorliegen, dieses Emissionsniveau auch in der Praxis erreichbar ist.

Beim Betriebszustand schlechte Verbrennung wurde durch eine Reduzierung der Sekundärluft der Luftüberschuss gemindert, weshalb vermehrt örtliche Luftmangelsituationen im Feuerraum auftraten. Hierdurch stiegen in der Hauptverbrennungsphase im Mittel die CO-Konzentration des Kaminofens um rund den Faktor 3 und die VOC-Konzentration um rund den Faktor 4,5 an. Durch die weitere Reduzierung der Sekundärluft wurde die sehr schlechte Verbrennung mit einem deutlich ausgeprägteren Luftmangel eingestellt, wodurch in der Hauptverbrennungsphase die CO-Konzentration gegenüber der guten Verbrennung um ca. den Faktor 10 und die VOC-Konzentration um ca. den Faktor 13 anstiegen. Die Bewertung der Zunahme der CO- und VOC-Konzentrationen bei den verschlechterten Betriebszuständen erfolgte auf Basis der Konzentrationsauswertung für die Dauer der Geruchsmessungen. Wird der gesamte Abbrand betrachtet, können sich andere Verhältnisse ergeben.

3.3.1 Betriebsparameter

Zur Ermittlung der standardisierten Betriebsbedingungen für unterschiedliche Betriebszustände wurden in Vorversuchen folgende Parameter ermittelt:

- Stellung Primär- und Sekundärluftregler in Abhängigkeit des Betriebszustandes
- Lage und Menge des Anzündholzes zur ersten Grundgluterzeugung, Zündung an zwei Stellen
- Masse (Form und Größe - Oberfläche) und Lage der Holzaufgabe
- Unterdruck im Abgasrohr bei ca. 12 Pa (Einstellung durch Gebläse)
- Nachlegezeitpunkt (3 Vol% CO₂).

Durch die strikte Standardisierung der Abbrandversuche sollte der üblicherweise relativ hohen Streuung der Messergebnisse bei scheitholzbefeuerten Kaminöfen entgegengewirkt und eine bestmögliche Reproduzierbarkeit der Abbrände bei eindeutig unterscheidbaren Verbrennungsqualitäten erreicht werden. Die Standardeinstellungen der Betriebsparameter für die verschiedenen Verbrennungszustände sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2 **Parameter Gebläse- und Reglereinstellungen**

Parameter	Betriebszustand - Verbrennungsqualität		
	gut	schlecht	sehr schlecht
Einstellung Gebläse (Versuchsstand I)	4,5 Hz	4,5 Hz	4,5 Hz
Stellung Regler für Primärluft 0-1	2/3	2/3	1
Stellung Regler für Sekundärluft 0-1	1	1/3	0

Beim Versuchsstand II wurde die Drehzahl des gemeinsamen Saugzuggebläses für alle vorhandenen Versuchsstände so gewählt, dass der gewünschte Schornsteinzug jeweils mittels Abstand der Absaughaube zur Schornsteinmündung eingestellt werden konnte.

Innerhalb der drei aufeinander folgenden Abbrände einer Versuchsreihe für den Betriebszustand gute Verbrennung wurde die Primärluft beim 3. Abbrand reduziert, um weiterhin eine gute Verbrennung ohne vermehrte Rußbildung aufrecht zu erhalten und einen zu hohen Brennstoffumsatz durch die ansteigende Feuerraumtemperatur zu vermeiden.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Zur Verdeutlichung der Holzanordnung für den ersten Abbrand und der Verbrennungsphasen sind diese beispielhaft in Abbildung 3.6 gezeigt.

Beim Anzünden wurde dünnes feines Weichholz (Länge ca. 20 cm, Kantenlänge im Mittel 2 x 2 cm; bei Buchenholzabbränden: ca. 0,25 kg bei guter Verbrennung, ca. 0,60 kg bei schlechter und sehr schlechter Verbrennung und ca. 0,70 kg bei nassem Holz, bei Tannenholzabbränden: ca. 0,40 kg) verwendet. Die Auflagemenge des Buchen- bzw. Tannenholzes, ca. 1.250 g, wurde bei kaltem Ofen durch drei 25 cm lange Scheite und bei den darauf folgenden Abbränden durch zwei 25 cm lange Scheite realisiert. Wie in der oberen Bildreihe zu erkennen, wurden zusätzlich noch kleine Weichholzstücke auf das Glutbett des herabgebrannten Anzündholzes gelegt, um den ersten Anbrand bei niedriger Feuerraumtemperatur zu begünstigen.

Bei den nächsten beiden Abbränden wurden die zwei Holzscheite dann immer parallel zur Rückwand angeordnet, sodass sie mittig über dem Rost und in derselben Flucht wie die Sekundärluftführung durch die seitlichen Bohrungen in den seitlichen Schamotteplatten (siehe rote runde Markierung im rechten Bild in oberer Bildreihe von Abbildung 3.6) lagen.



beispielhafte Holzanordnung auf Anzündholzglut (gezeigt bei kaltem Ofen)



Anzündvorgang



Anbrand



Hauptverbrennung



Ausbrand

Abbildung 3.6 Beispiele für Anordnung der Holzcharge auf Anfeuerholz sowie Anzündvorgang für die einzelnen Verbrennungsphasen

3.3.3 Probenahmen und Versuchsübersicht

Geruchsmessungen

Die Geruchsmessungen wurden durch das Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, vom Umweltministerium Baden-Württemberg nach § 26 Bundesimmissionsschutzgesetz bekannt gegebene Messstelle für Emissionen und Immissionen Geruch, durchgeführt.

Geruchsproben (Abgasproben zur Bestimmung der Geruchstoffkonzentration am Olfaktometer) wurden innerhalb eines Betriebszustands jeweils beim Anzündvorgang bei kaltem Ofen mit feinem Nadelholz und bei 3 aufeinander folgenden Chargenabbränden gezogen. Innerhalb eines Chargenabbrandes wurde jeweils in der Anbrandphase, während der Hauptverbrennung und in der Ausbrandphase eine Geruchsprobe entnommen. Somit liegen je Versuchstag und Betriebszustand 10 Geruchsproben vor, siehe Tabelle 3.3.

Diese 10 Messungen wurden, außer beim trockenen Tannenholz, mindestens ein zweites Mal unter denselben Bedingungen wiederholt, damit für die drei Betriebszustände gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung jeweils mindestens 20 Geruchsproben vorliegen. Gemessen bzw. berechnet wurden dann die Konzentrationen für Gerüche sowie VOC, CO, O₂ und CO₂, neben Temperaturen und Volumenströmen, als Mittelwerte der Probenahmedauer.

Die Probenahmen in den verschiedenen Verbrennungsphasen wurden nach Richtwerten, die in Vorversuchen ermittelt wurden, gestartet. Abbildung 3.7 zeigt beispielhaft einen CO₂- und CO-Verlauf für einen Versuchstag und die zeitliche Lage der Verbrennungsphasen.

Tabelle 3.3 Schema der Geruchsprobenahmen für einen Betriebszustand an einem Messtag

Chargen-abbrand	Geruchs-probe Nr.	Verbrennungs-phase	Probenahme-dauer in min
Grundgluterzeugung	1	Anzünden	6
1	2	Anbrand	3
	3	Hauptverbrennung	6
	4	Ausbrand	6
2	5	Anbrand	3
	6	Hauptverbrennung	6
	7	Ausbrand	6
3	8	Anbrand	3
	9	Hauptverbrennung	6
	10	Ausbrand	6

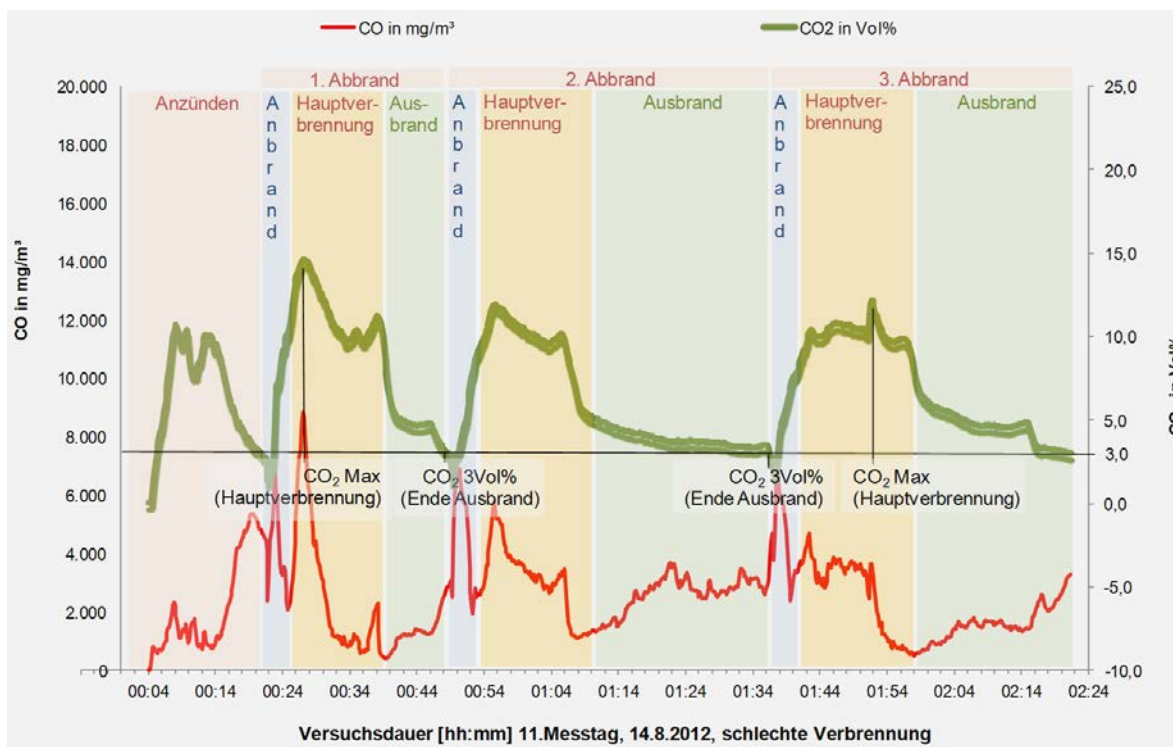


Abbildung 3.7 Beispiel für den Abbrandverlauf für einen Versuchstag und Lage der Verbrennungsphasen

Für die Dauer der Geruchsprobenahme musste ein gewisser Abstand zum Phasenanstang und zum Phasenende gewahrt werden, damit bei der üblicherweise auftretenden Streuung im Chargenabbrand die Probenahme auf jeden Fall innerhalb der gewünschten Verbrennungsphase erfolgen konnte. Für den jeweiligen Betriebszustand und die Abbrandfolge ergaben sich aufgrund der umfangreichen Vorversuche die in Tabelle 3.4 genannten Richtwerte für den Start der Probenahme. Kriterien hierfür waren bei den Abbränden der CO_2 -Verlauf und die Abbrandzeit.

Zur Vermeidung von Kondensatbildung ist eine dynamische Vorverdünnung der Geruchsproben notwendig, bevor sich die in Nalophanbeutel gezogenen Abgasproben auf Zimmertemperatur abkühlen. Deshalb wird die Probe vor dem Abkühlen so verdünnt, dass der Wasserdampftaupunkt unterschritten werden kann und geruchsintensive Stoffe, z.B. durch Lösen im Kondensat bei Zimmertemperatur, nicht verloren gehen und damit die Probe geruchlich verändert wird. Über die in Abbildung 3.8 aufgetragenen Taupunktkurven für verschiedene Verdünnungsraten lässt sich die erforderliche Verdünnung in Abhängigkeit des Wassergehaltes im Brennstoff (im Beispiel 15 und 36 %) festlegen. Die jeweils festgelegte Verdünnungsrate wurde für die verschiedenen Geruchsproben einheitlich beibehalten und nicht etwa einer niedrigeren Taupunkttemperatur im Ausbrand angepasst. Die Verdünnungsrate, der Volumenstrom des Verdünnungsgases, die Drücke und die Verschmutzung der in die dynamische Verdünnungseinrichtung eingesetzten Blenden wurden bei bzw. zwischen den Probenahmen kontrolliert, sodass die Verdünnungsraten der Geruchsproben weitgehend konstant blieben, vor allem innerhalb eines Messtages.

Bei einer Verdünnung von ca. 1:6 verbleibt also ein gewisser Abstand zur Taupunktkurve, wenn die Raumtemperatur mit 20 °C angenommen wird und die CO_2 -Konzentration im Abgas nicht über 14 Vol% ansteigt.

Tabelle 3.4 Richtwerte für Start der Geruchsprobenahme (Basis Vorversuche)

Richtwerte für Start Probenahme	CO ₂ -Konzentration in Vol% bei Phasenbeginn			Start Geruchsprobe bei CO ₂ -Konzentration in Vol%		Startzeit nach Phasenbeginn in min		Dauer der Phase in min	max. CO ₂ in Vol%
	gut	schlecht	sehr schlecht	gut	schlecht	schlecht	sehr schlecht		
Verbr. phase\ Betriebszustand									
1. Geruchsprobe Anzünden	<3	<3	<3	<3	<3	sofort/ Zündung	sofort/ Zündung	9	16,0
2. Geruchsprobe Anbrand	2,3	2,5	2,5	2,3	2,5	sofort/ Zündung	sofort/ Zündung	6	
3. Geruchsprobe Hauptverbrennung	6,6	14,8	12,8	8,5 *	13,2-15,2 *	7	bis max. CO ₂	7	13,7
4. Geruchsprobe Ausbrand	6,6	14,8	12,8	4,5-5	5,1	3	bis max. CO ₂	28	
5. Geruchsprobe Anbrand	<3	<3	<3	<3	<3	sofort/ Zündung	sofort/ Zündung	4	
6. Geruchsprobe Hauptverbrennung	8,4	14,8	14	12,7-13,0 *	15,2	3	bis max. CO ₂	9	15,9-16,5
7. Geruchsprobe Ausbrand	8,4	14,8	<11	5,5	5	5	bis max. CO ₂	31	
8. Geruchsprobe Anbrand	<3	<3	<3	<3	<3	sofort/ Zündung	sofort/ Zündung	4	
9. Geruchsprobe Hauptverbrennung	9,3	11,9	11	12,6 *	12,4	1,5-2,5	bis max. CO ₂	6	13,8
10. Geruchsprobe Ausbrand	9,3	10,5	11	4,5-4,8	5,6	8-10	bis max. CO ₂	33	

* Start der Probenahme im Bereich der maximalen CO₂-Konzentration des Abbrandes

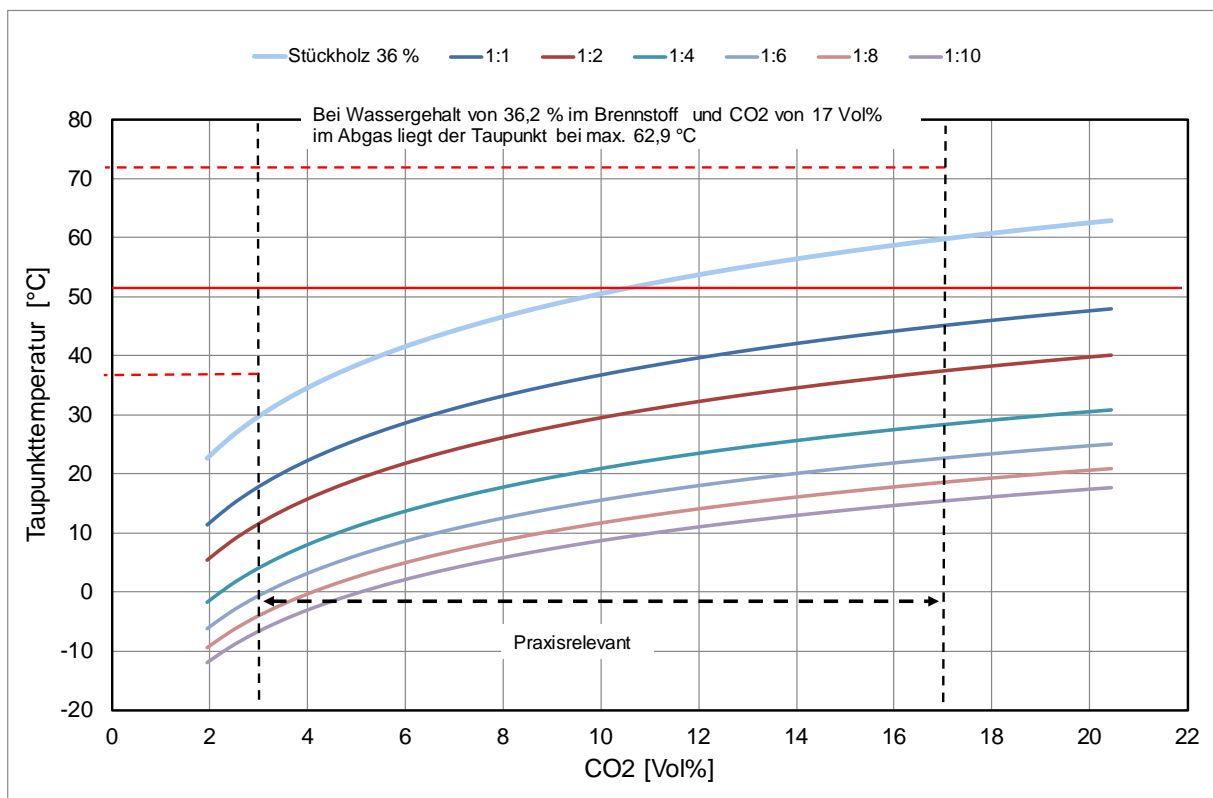
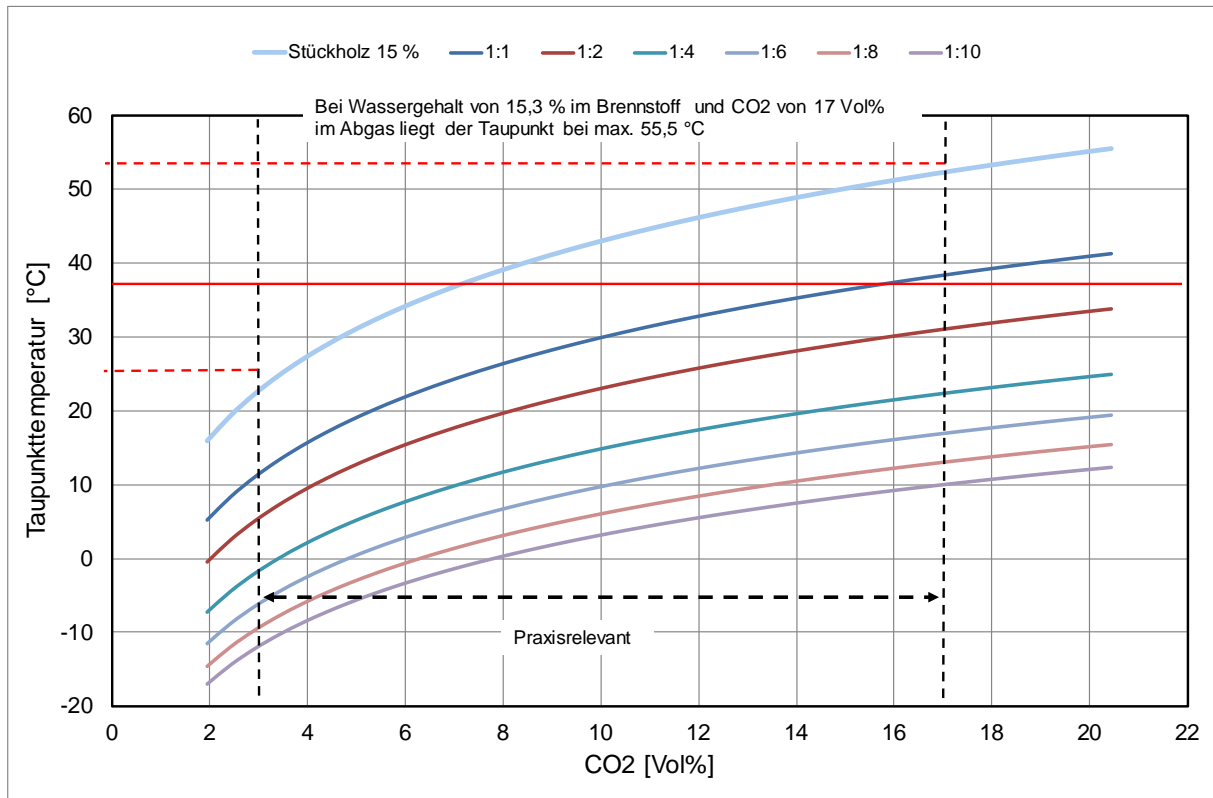


Abbildung 3.8 Taupunktkurven für Abgas aus der Stückholzverbrennung mit Wassergehalten von ca. 15 bzw. 36 % bei unterschiedlichen Verdünnungsraten

Auf Grund der hohen Geruchsstoffkonzentrationen in den Proben war vor Aufgabe auf das Olfaktometer eine weitere, statische Verdünnung notwendig. Aus den Messdaten am Olfaktometer und den beiden Verdünnungen wurden die Geruchsstoffkonzentrationen berechnet.

In Abbildung 3.9 ist die Vorgehensweise zur Geruchsstoffkonzentrationsbestimmung schematisch dargestellt.

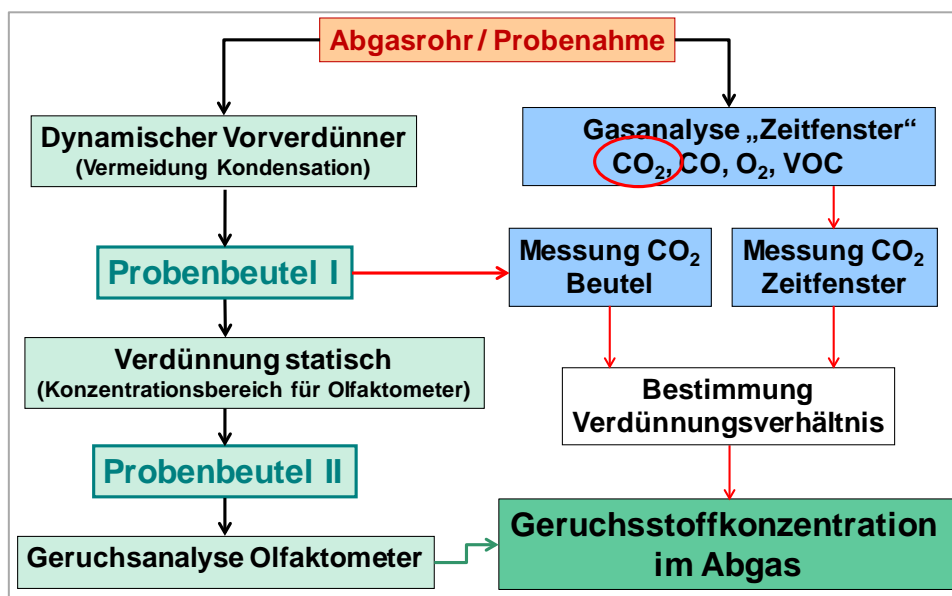


Abbildung 3.9 Schematischer Ablauf der Bestimmung der Geruchsstoffkonzentrationen im Abgas

Das verdünnte Probengas wird in Beuteln (Probenbeutel I in Abbildung 3.9) gesammelt. Dieser Beutelinhalt wird zusätzlich in einem Zwischenschritt weiter statisch verdünnt, indem aus dem Probenbeutel I ein definiertes Volumen entzogen und in einen Probenbeutel II mit bekanntem Volumen gegeben wird. Für das Zeitfenster der Geruchsprobenahme wurden die gemessenen CO₂-Konzentrationen mit den CO₂-Konzentrationen in den Probebeuteln I verglichen und daraus das Verdünnungsverhältnis des dynamischen Vorverdünners bestimmt. Aus den Geruchsanalysen am Olfaktometer wurden dann unter Berücksichtigung der dynamischen und der statischen Verdünnung die Geruchsstoffkonzentrationen ermittelt.

Die Geruchsstoffkonzentrationen in den Probebeuteln wurden am Olfaktometer nach DIN EN 13725 bestimmt. Detailinformationen zur Probenauswertung finden sich im Anhang in Tabelle 11.2.

Das Olfaktometer war in der Regel während der Zeit der Geruchsmessungen in der Warte des neuen Technikums des IFK aufgebaut, so dass die Geruchsanalysen mit kurzem Zeitversatz erfolgen konnten. In der Warte gibt es eine Tür nach außen, die Tür zum Versuchstrakt wurde weitestgehend geschlossen gehalten. Bei den Versuchen am 9.11.2011 (gute Verbrennung), 10.11.2011 und 16.11.2011 (jeweils schlechte Verbrennung) war das Olfaktometer in Karlsruhe im Ingenieurbüro Lohmeyer aufgestellt. Die Geruchsproben wurden innerhalb von 6 Stunden nach der Probenahme analysiert. Abbildung 3.10 zeigt das Olfaktometer mit den Prüfern im neuen Technikum.



Abbildung 3.10 Prüfer bei Probenanalyse am Olfaktometer im neuen Technikum des IFK

PAK-Messungen

Die Probenahmedauer bei den PAK-Messungen wurde entsprechend den Gegebenheiten bei den Geruchsmessungen gewählt. Untersucht wurden die Verbrennungsphasen Anbrand (ca. 3 min Probenahmedauer) und Hauptverbrennung (ca. 6 min Probenahmedauer). In der Ausbrandphase wurden keine PAK-Messungen vorgenommen, da in dieser Verbrennungsphase die Konzentrationen sehr gering sein dürften. Untersucht wurden die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung mit Buchenholz.

Um aufgrund der kurzen Probenahmedauer eine ausreichende Anreicherung der PAK zu gewährleisten, wurden die Probenahmen kumulierend (eine Gesamtprobe bestehend aus drei Einzelmessungen) durchgeführt. Bei jedem Betriebszustand wurden jeweils vier Messungen bei Anbrand und Hauptverbrennung durchgeführt. Aufgrund der kumulierenden Probenahmen (eine Messung bestehend aus drei Einzelmessungen) ergab sich eine Gesamtzahl von 48 Einzel- bzw. 16 kumulierten Gesamtproben.

Die PAK-Messungen wurden unter Beachtung der VDI-Richtlinie 2066, Blatt 1 [2006] und der Norm ISO 11338-1 [2003] durchgeführt.

Aus den Abgasrandbedingungen und dem Wirkdurchmesser der verwendeten Entnahmesonde wurde der abzusaugende Teilgasvolumenstrom errechnet (isokinetische Probenahme). Aufgrund der kurzen Probenahmedauern konnten die isokinetischen Bedingungen nur näherungsweise eingeregelt werden.

Der abgesaugte Teilgasstrom wurde über einen Sondenkrümmer der Abscheideeinrichtung für partikelförmige Stoffe zugeführt (out-stack-Anordnung). Als Abscheideeinrichtung wurde ein Planfilter eingesetzt. Das Filtergehäuse wurde beheizt. Nach dem Filter wurde das abgesaugte Teilgasvolumen durch einen Intensivgaskühler geleitet und gekühlt. Anfallendes Kon-

densat wurde in einer Glasflasche aufgefangen. Danach wurde der Teilgasstrom durch eine mit vorbehandeltem PU-Schaum gefüllte Kartusche geführt. Das Gasvolumen wurde über einen Trockenturm durch ein Gasvolumenmessgerät gesaugt (Auflistung der verwendeten Geräte siehe Tabelle 11.5 im Anhang). Unterdruck und Temperatur an dem Gasvolumenmessgerät wurden aufgenommen und zu Mittelwerten verarbeitet.

Alle wiederverwendeten Teile der Probenahmeapparatur wurden nach jeder Messserie mit Toluol ausgespült. Zur Auswertung der Staubmasse wurden die Filter im unbeladenen und im beladenen Zustand nach Äquilibrieren im klimatisierten Wägeraum gewogen. Die derart ermittelten und im Bericht angegebenen Staubkonzentrationen sind als Orientierungswerte zu sehen, da aufgrund des Versuchsablaufs die Staubablagerungen in der Probenahmeeinrichtung vor dem Staubfilter nicht erfasst werden konnten.

Intensivgaskühler, Adsorptionskartusche, Glasverbindungsrohr und Filter wurden im Labor extrahiert und zusammen mit der Toluol-Spüllösung der Probenahme auf PAK analysiert.

Nach jeder Gesamtprobe (je 3 kumulierte Einzelprobenahmen) wurden die Absaugsonde und das Planfilterkopfgerät mit Toluol gespült und anschließend getrocknet. Die Toluolspüllösung wurde der analytischen Bestimmung zugeführt. Angaben zur Behandlung des Abscheidemediums und der Ablagerungen siehe in Tabelle 11.5 im Anhang. Eine Beschreibung der analytischen Bestimmung bei den PAK-Messungen und Angaben zur Messunsicherheit sind im Anhang in Tabelle 11.6 enthalten.

Messungen nach der Schweizer Anfeuerungmethode

Außerdem wurde untersucht, ob es emissionsseitige Vorteile hat, wenn der erste Chargenabbrand bei kaltem Ofen nicht mit einem kleinen Vorfeuer zur Erzeugung einer Grundglut (Anzündvorgang) und anschließender Holzaufgabe auf diese Grundglut durchgeführt, sondern die Holzcharge (gleiche Holzmasse wie bei anderen Versuchen) und etwas feines Holz von oben angezündet wird (Schweizer Anfeuerungmethode). Bei diesen Versuchen wurden keine Geruchsmessungen durchgeführt.

Messungen mit Sensoren

Mit einem neuartigen Sensorelement (LSM-Sensor) zur Messung von gasförmigen Produkten unvollständiger Verbrennung (z.B. CO und VOC) wurden orientierende Vergleichsmessungen durchgeführt um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Geruchsemission erkennbar ist.

Analyse von Ascheproben

Bei einigen Feuerungsversuchen (entweder nach den Geruchsmessungen oder nach Vorversuchen) wurden nach jedem Messtag (d.h. nach einem Anzündvorgang und drei aufeinanderfolgenden Holzaufgaben) eine Ascheprobe der Rostasche entnommen und analysiert.

Versuchsübersicht

In Tabelle 3.5 ist eine Übersicht aller in diesem Projekt durchgeführten Versuche enthalten.

Tabelle 3.5 Übersicht der im Projekt Geruchsbelästigungen durchgeführten Versuche

Messtag	Datum	Betriebszustand	Brennstoff (Wassergehalt)	Anzahl Proben	LSM-Sensor	
Geruch	1.	25.10.2011	gute Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	10 x Geruch	ja
	2.	09.11.2011	gute Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	10 x Geruch / 1 x Asche	ja
	3.	10.11.2011	schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	10 x Geruch / 1 x Asche	ja
	4.	16.11.2011	schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	10 x Geruch / 1 x Asche	ja
	5.	22.11.2011	sehr schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	10 x Geruch / 1 x Asche	ja
	6.	23.11.2011	sehr schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	10 x Geruch	ja
	7.	16.02.2012	gute Verbrennung	Tannenholz (17,3 %)	10 x Geruch	-
	8.	14.08.2012	schlechte Verbrennung	Buchenholz (11,5 %)	10 x Geruch	-
	9.	08.11.2012	gute Verbrennung *	nasses Buchenholz (36,2%)	10 x Geruch	-
	10.	13.11.2012	gute Verbrennung *	nasses Buchenholz (36,2%)	10 x Geruch	-
	11.	15.11.2012	gute Verbrennung *	nasses Buchenholz (36,2%)	10 x Geruch	-
PAK	1.	11.04.2012	gute Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	2 x PAK	-
	2.	12.04.2012	gute Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	2 x PAK	-
	3.	16.04.2012	schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	2 x PAK	-
	4.	17.04.2012	schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	2 x PAK	-
Schweizer Methode	1.	09.01.2012	Schweizer Anfeuerungsmethode	Buchenholz (15,3 %)	-	-
	2.	16.01.2012	Schweizer Anfeuerungsmethode	Buchenholz (15,3 %)	-	-
Ascheproben	1.	04.11.2011	sehr schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	1 x Asche	-
	2.	07.11.2011	schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	1 x Asche	-
	3.	08.11.2011	schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	2 x Asche	-
	4.	14.11.2011	sehr schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	2 x Asche	-
	5.	18.11.2011	sehr schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	1 x Asche	-
	6.	21.11.2011	sehr schlechte Verbrennung	Buchenholz (15,3 %)	1 x Asche	-

* Einstellung der Verbrennungsluft wie bei trockenem Buchenholz und gute Verbrennung

3.3.4 Messung organischer Verbindungen mit FID und Sensoren

Mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) kann die Summe der organisch gebundenen Kohlenstoffatome in den Kohlenwasserstoffverbindungen gemessen werden. Der FID reagiert somit quantitativ selektiv auf die Anzahl der C-Atome in organischen Verbindungen. Mit zunehmendem Kohlenstoffanteil in einem Molekül oder einem Molekülgemisch nimmt auch der am FID angezeigte Messwert zu. Wird der FID mit Propan kalibriert, erfolgt die Anzeige als Propanäquivalent (ppm Propan). Allerdings ist das Messsignal des FID nur in erster Näherung proportional der Anzahl der Kohlenstoffatome im Messgas. In Abhängigkeit von der Molekülstruktur der organischen Verbindungen zeigt der FID ein unterschiedliches Ansprechverhalten. Dieses stoffspezifische Ansprechverhalten wird durch Responsefaktoren beschrieben, was eine Gewichtung zwischen den jeweiligen organischen Verbindungen bzw. zu einer Referenzgröße (z.B. ppm Propan) ermöglicht.

Das Ansprechverhalten auf die unterschiedlichen organischen Verbindungen der eingesetzten Sensoren entspricht dabei nicht dem des verwendeten FID. Auch sind für Sensoren bisher keine Responsefaktoren für die unterschiedlichen Verbindungen ermittelt worden. Der Sensor reagiert allerdings ebenfalls mit unterschiedlicher Sensitivität auf die verschiedenen organischen Verbindungen, siehe Abbildung 3.11.

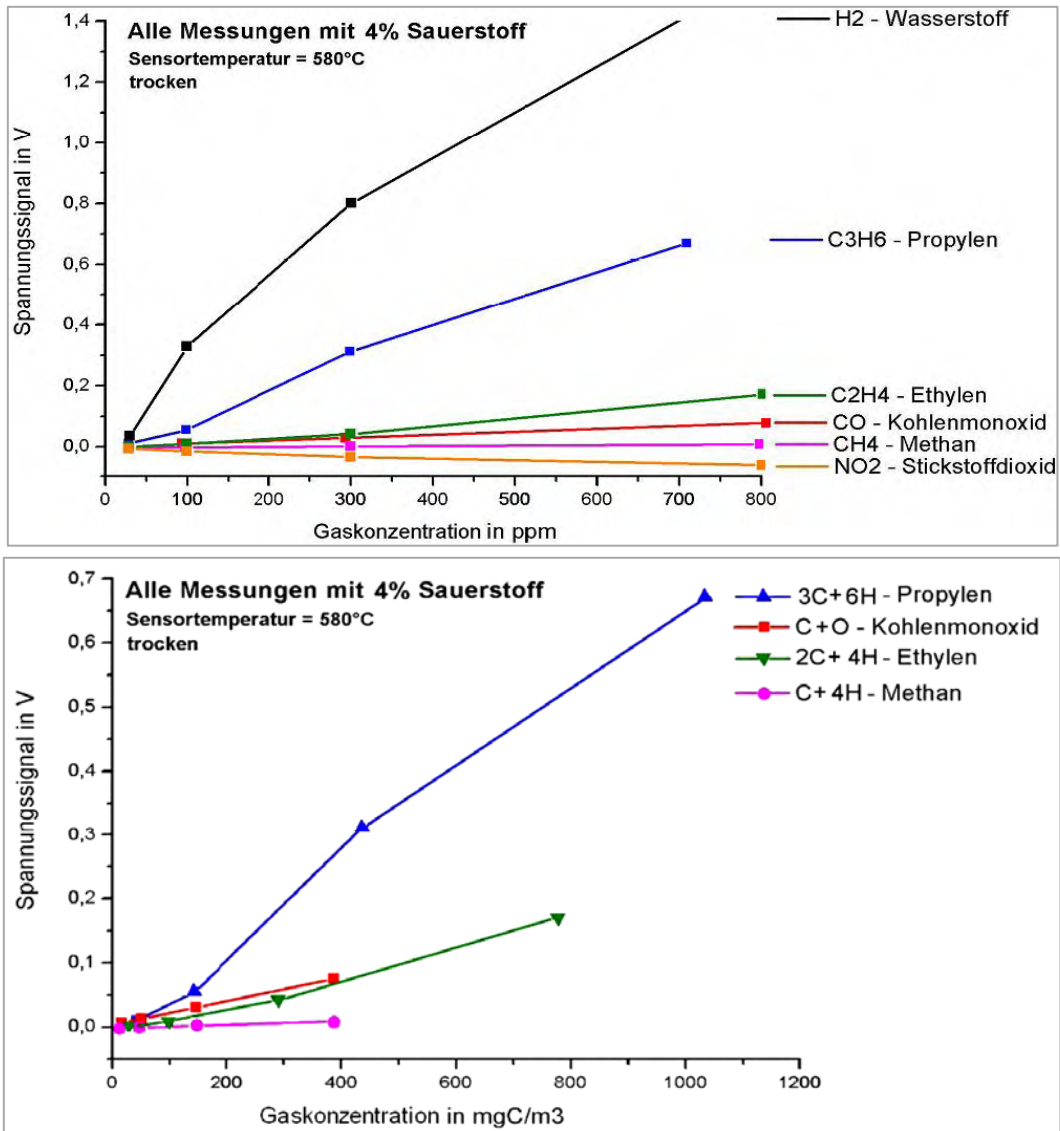


Abbildung 3.11 Abhängigkeit des CarboSen CS1000-Sensorsignals von der detektierbaren Verbindung und deren Gaskonzentration im Labor [Teichler, 2008]

Bei diesen Untersuchungen des Sensorsystems CarboSen im Labor mit reinen, synthetischen Verbindungen ist ein mathematisch eindeutiger Anstieg des Sensorsignals weder infolge der Erhöhung des C-Anteils noch des H-Anteils im Molekül abzuleiten. Gegenüber Methan (CH₄) verhält sich der Sensor ähnlich wie gegenüber CO, bei z.B. 500 ppm CH₄ bzw. CO ergibt sich fast dasselbe Sensorsignal.

Dies gilt aber vielleicht nur bei der Aufgabe von nur einer detektierbaren Komponente. Bei binärer Beaufschlagung von z.B. 100 ppm CH₄ und 100 ppm CO wurde das Sensorsignal bisher noch nicht untersucht. Ob das ausgegebene Sensorsignal eine Summe der Signalspannungen der Einzelbeaufschlagung ergeben würde, kann angezweifelt werden. Bei einer binären Beaufschlagung mit H₂ und CO kommt der Selektivitätsunterschied des Sensors zum Tragen, da Wasserstoff ein wesentlich höheres Messsignal hervorruft als CO.

In einer Holzfeuerung hängt die CO-Konzentration und die Konzentration und Zusammensetzung der organischen Verbindungen von der Feuerungseinstellung und von der Verbrennungsphase (z.B. Anbrandphase, Hauptverbrennungsphase, Ausbrandphase) ab. So bilden

sich beispielsweise bei den vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen in der Anbrandphase neben Methan auch viele komplexere organische Verbindungen. Während stationärer Verbrennungsphasen mit hohen Verbrennungstemperaturen und ausreichend hohem Luftüberschuss wird der Anteil des thermisch recht stabilen Methans relativ hoch bei insgesamt niedrigen VOC-Konzentrationen sein. In der Ausbrandphase wird im Wesentlichen nur noch CO im Abgas vorhanden sein.

Ob und in welchen Konzentrationen H_2 im Abgas der Feuerungen vorliegt, kann nicht bewertet werden. Die H_2 -Konzentration wurde während den Versuchen nicht erfasst. Erfahrungsgemäß folgen die Sensorwerte des CarboSen dem mit einem FID gemessenen VOC-Verlauf und auch VOC-Spitzenkonzentrationen werden entsprechend abgebildet.

3.3.5 Datenaufbereitung

Für die weitere Verwendung der Rohdaten ist zuvor eine Totzeitanpassung der verschiedenen Messgrößen vorzunehmen, damit sich die ermittelten Daten auf denselben Gaszustand im Abgasrohr am Einbauort der Sensoren und damit auch in der Geruchprobe beziehen.

Die Anzeigeverzögerungen (Totzeiten) der Sensoren und Gasmessgeräte sind sehr unterschiedlich und hängen vom Messaufbau und den eingesetzten Messgeräten ab. Da die Sensoren direkt im Abgas installiert sind, weisen diese nur sehr geringe Anzeigeverzögerungen auf. Bei den parallel eingesetzten Gasanalysatoren wird die Anzeigeverzögerung im Wesentlichen von der Länge des Gasweges, den Volumina der Probengasfilter, des Messgaskühlers (nicht beim FID) und der Fließgeschwindigkeit beeinflusst. Diese kann während der Messdauer z.B. durch Ablagerungen in den Probengasschläuchen und durch eine zunehmende Verstopfung der Staubfilter abnehmen, wodurch sich die Totzeit entsprechend verlängert. Anhand eines Vergleichs von O_2 - mit CO_2 - Peaks bzw. CO- und VOC-Peaks der Gasanalysatoren mit den Sensorsignalen können die Totzeitverschiebungen zwischen den Messgrößen grafisch ermittelt werden. Gegenüber den gewählten, relativ großen Probenahmedauern fallen die vorliegenden Totzeitverschiebungen bei der Mittelwertbetrachtung aber kaum ins Gewicht.

Die Totzeitverschiebung zwischen FID (VOC-Messung) und Geruchprobe (nach dem dynamischen Vorverdünner) wurde für einen optimalen Volumenstrom von $430 \text{ cm}^3/\text{min}$ ermittelt. Sie beträgt beim unveränderten Versuchsaufbau und der gegebenen Verdünnungsrate durchschnittlich ca. 20 Sekunden für synthetisches Prüfgas. Die aktuelle VOC-Konzentration wird ebenfalls 20 Sekunden nach Absaugung aus dem Abgasrohr angezeigt.

Beim Sensorsystem und den Analysegeräten für die Referenzmessung kann es innerhalb einer Versuchsreihe oder eines Feuerungsversuchs zu Driften kommen. Über eine Nullpunkt- und eine Prüfgasmessung wird deshalb zu Beginn und am Ende eines Messtages eine Zwei-Punkt-Kalibrierung der Gasanalysatoren vorgenommen. Bei den Sensoren wird lediglich der Nullpunkt überprüft. Die Drift wird linear über den Versuchszeitraum berücksichtigt.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt. Zuerst werden die Ergebnisse der Geruchsmessungen ausführlich gezeigt und erläutert,

dann werden die Ergebnisse der PAK-Messungen und anschließend die der Schweizer Anfeuerungsmethode gezeigt. Abschließend sind die Ergebnisse der Ascheanalysen aufgeführt.

3.3.6 Mittelwertbildung

Aus den Ergebnissen der einzelnen Messungen für Geruch und z.B. VOC und CO wurden Mittelwerte für die Betriebszustände, einzelne Verbrennungsphasen oder Massenströme für die Probenahmeintervalle gebildet. Entgegen der üblichen Vorgehensweise bei Geruchsmessungen wurden hier ausschließlich arithmetische Mittelwerte berechnet, da die Messungen vor allem zum Ziel hatten, die Korrelation von VOC- und Geruchsemissionen zu untersuchen. Die Verwendung des geometrischen Mittelwertes für die Ergebnisse der Geruchsmessungen wäre für die aktuelle Fragestellung weniger zielführend.

4 Ergebnisse der Geruchsmessungen

Der Zusammenhang zwischen Geruchs- und VOC-Konzentrationen für die verschiedenen Verbrennungsphasen in Abhängigkeit des Betriebszustandes ist für die Messungen mit Buchenholz ($w = 15,3\%$) in Abbildung 4.1 als Übersicht dargestellt. In Tabelle 11.1 im Anhang sind die entsprechenden Mittelwerte über die Probenahmezeit für Geruch und VOC sowie CO, CO₂ und O₂ aufgelistet. Mit angegeben sind dort jeweils auch die auf 13 Vol% O₂ bezogene Mittelwerte für die Geruchs-, VOC und CO-Konzentration sowie die anhand des gemessenen Volumenstroms berechneten Massenströme der genannten Komponenten.

Grundsätzlich ist ein Zusammenhang zwischen der Konzentration von gasförmigen organischen Verbindungen und Geruch gegeben. Mit steigender VOC-Konzentration nimmt auch in der Tendenz die Geruchsstoffkonzentration zu. Allerdings ist der Zusammenhang auch abhängig von der Verbrennungsphase. So liegen die höchsten Geruchs-Konzentrationen eines Abbrandes immer während dem Anbrandvorgang vor. Meistens werden während dem Anbrandvorgang auch die höchsten VOC-Konzentrationen des Abbrandes erreicht, beim Betriebszustand sehr schlechte Verbrennung treten die höchsten VOC-Konzentrationen aber z.T. auch während der Hauptverbrennungsphase auf.

In Abbildung 4.2 ist der Zusammenhang zwischen Geruchs- und VOC-Konzentrationen für die verschiedenen Verbrennungsphasen in Abhängigkeit des Betriebszustandes für die Messungen mit Tannenholz ($w = 17,3\%$) und nasses Buchenholz ($w = 36,2\%$) gezeigt. In Tabelle 11.3 im Anhang sind wiederum die entsprechenden Mittelwerte über die Probenahmezeit für Geruch und VOC sowie CO, CO₂ und O₂ aufgelistet. Für diese beiden untersuchten Brennstoffe gelten im Grundsatz dieselben Zusammenhänge wie für trockenes Buchenholz, welches bei unterschiedlichen Betriebszuständen verfeuert wurde. Allerdings wurden z.T. beim nassen Buchenholz und auch beim Tannenholz im Ausbrand ähnlich hohe Geruchsemissionen gemessen wie beim Anbrand, wobei dann auch meist die VOC-Konzentration in derselben Größenordnung lag wie beim Anbrand.

Bei den Versuchen mit Tannenholz wurden dieselben Betriebsparameter wie beim Versuch gute Verbrennung mit Buchenholz eingestellt, wobei Tannenholz eine geringere Dichte aufweist. Deswegen ergab sich für dieselbe Auflagemenge wie bei Buchenholz ein größeres Volumen, was die Strömungsverhältnisse in der Brennkammer beeinflusst hat. Der CO₂-Verlauf gestaltete sich wesentlich niedriger als bei Buche, wodurch es etwas schwieriger wurde, die Proben jeweils rechtzeitig in den einzelnen Phasen zu nehmen.

Beide Darstellungen zeigen, dass für die verschiedenen Verbrennungsphasen in der Tendenz die Geruchsstoffkonzentration mit zunehmender VOC-Konzentration ebenfalls ansteigt, allerdings gibt es in allen Verbrennungsphasen bei den untersuchten Brennstoffen und Betriebszuständen auch gegenläufige Zusammenhänge.

Bei guter Verbrennung mit trockenem Buchenholz liegen in der Anbrandphase stets die höchsten und im Ausbrand liegen stets die niedrigsten Geruchsstoffkonzentrationen des Abbrandes vor. Die VOC-Konzentrationen zwischen der Hauptverbrennungs- und Ausbrandprobe lassen in einigen Fällen einen signifikanten Unterschied der Steigungsrichtung erkennen: während die VOC-Konzentration bei der guten Verbrennung bis auf den zweiten Abbrand am 2. Messtag zum Ausbrand hin anstieg, sinken hier bei allen sechs Phasenwechseln die Geruchsstoffkonzentrationen.

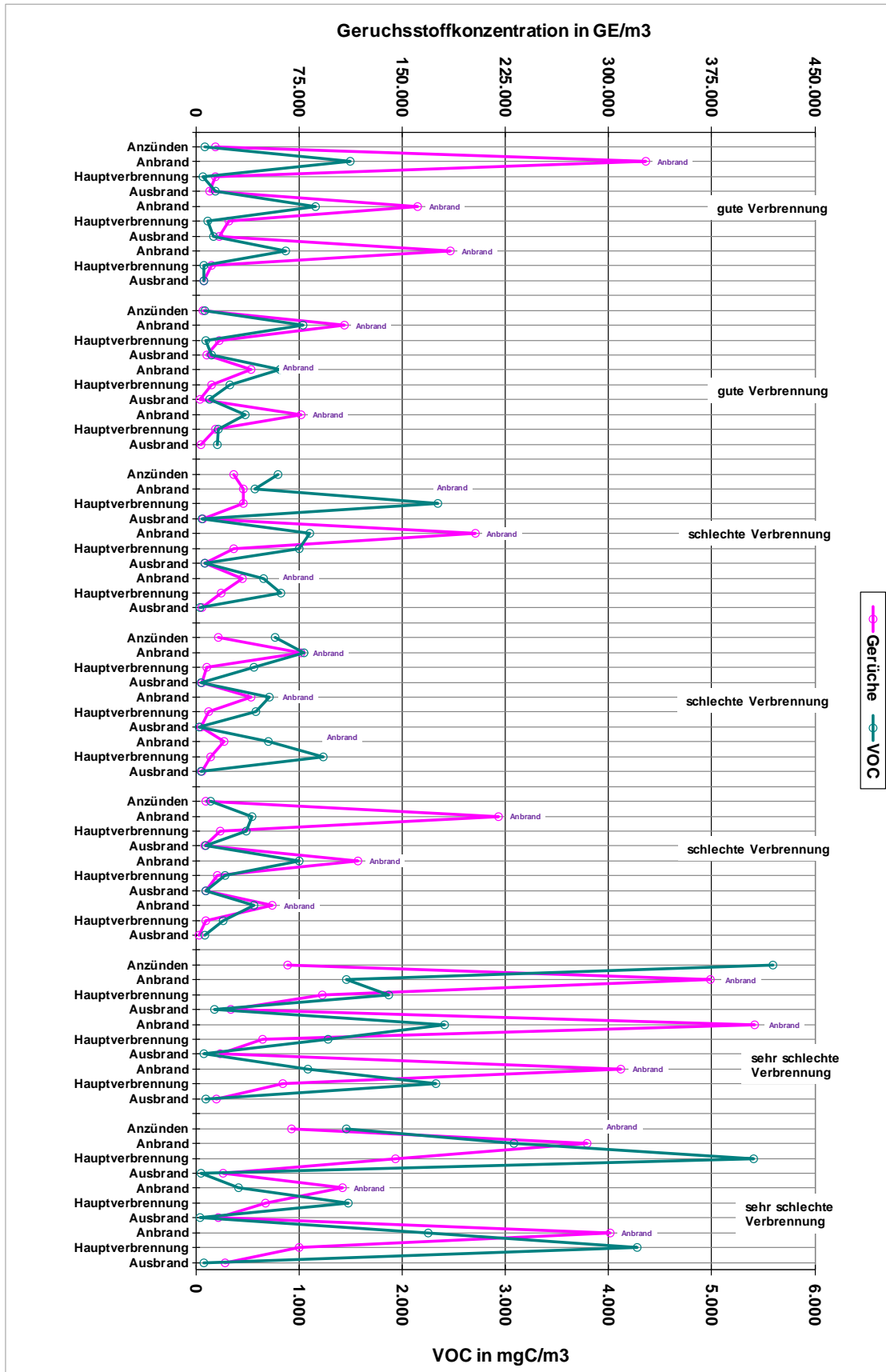


Abbildung 4.1 Zusammenhang zwischen Geruchsstoff- und VOC-Konzentrationen für die verschiedenen Verbrennungsphasen in Abhängigkeit des Betriebszustandes für Buchenholz ($w = 15,3\%$)

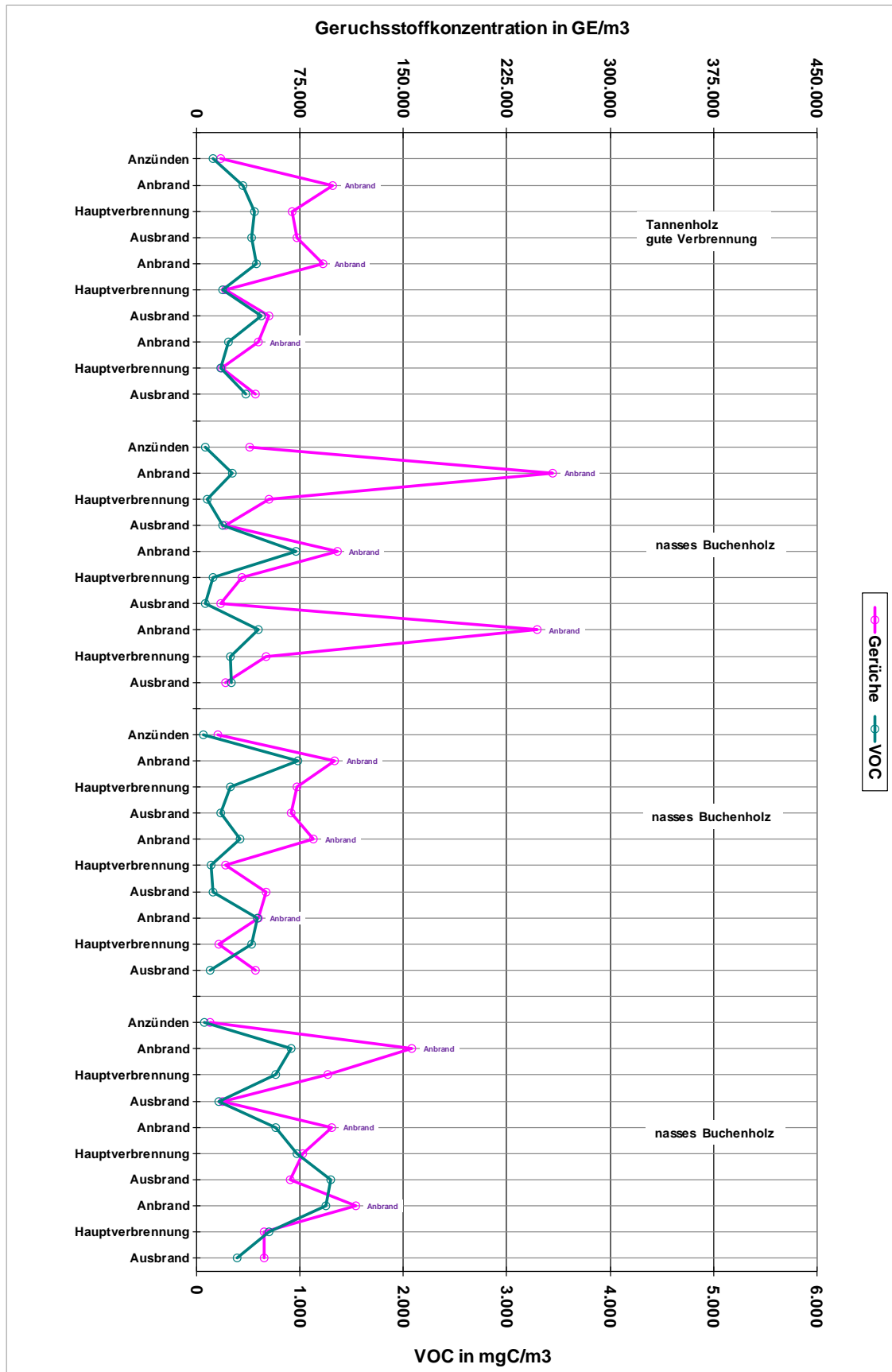


Abbildung 4.2 Zusammenhang zwischen Geruchsstoff- und VOC-Konzentrationen für die verschiedenen Verbrennungsphasen in Abhängigkeit des Betriebszustandes für Tannenholz ($w = 17,3\%$) und nasses Buchenholz ($w = 36,2\%$)

In der Tendenz nehmen die VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen aufgrund der ansteigenden Feuerraumtemperatur mit jedem Chargenabbrand ab. Allerdings wurden für den 3. Anbrand wieder höhere Geruchswerte ermittelt als für den 2. Anbrand.

Bei der schlechten Verbrennung mit trockenem Buchenholz sind die Verhältnisse nicht mehr so eindeutig. Trotz z.T. höherer VOC-Konzentrationen, im Vergleich zur guten Verbrennung, erreichen die Geruchsstoffkonzentrationen nicht die erwarteten hohen Werte. Aber auch bei diesem Betriebszustand werden in der Regel die höchsten VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen in der Anbrandphase erreicht. Eine Ausnahme zeigt sich beim dritten Abbrand in der zweiten Versuchsreihe mit schlechter Verbrennung. Hier wurde in der Hauptverbrennungsphase eine höhere VOC-Konzentration gemessen als beim Anbrand. Insgesamt nehmen in diesem Betriebszustand, im Gegensatz zur guten Verbrennung, die VOC-Konzentrationen von der Hauptverbrennungsphase zum Ausbrand hin ab, was mit fallenden Geruchsstoffkonzentrationen einhergeht. Minimale Geruchsstoffkonzentrationen unter 6.400 GE/m^3 wurden durchgehend bei den niedrigsten VOC-Konzentrationen im Ausbrand ermittelt.

Bei der sehr schlechten Verbrennung mit trockenem Buchenholz werden die höchsten VOC-Konzentrationen oft nicht im Anbrand, sondern in der Hauptverbrennungsphase erreicht, obwohl mit der Geruchsprobe erst nach der Zündung des Holzes begonnen wurde. Trotzdem werden auch hier die höchsten Geruchsstoffkonzentrationen meist in der Anbrandphase gemessen. Allerdings werden bei diesem Betriebszustand im Anzünden deutlich höhere VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen ermittelt als in den beiden anderen Betriebszuständen, z.T. (bei erster schlechten und erster sehr schlechten Verbrennung) verläuft die Tendenz von Geruchs- und VOC-Konzentrationen sogar gegenläufig. In der Hauptverbrennungsphase bei sehr schlechter Verbrennung wurden bei den hier vorliegenden hohen VOC-Konzentrationen eher höhere Geruchsstoffkonzentrationen erwartet.

In Abbildung 4.3 ist der Zusammenhang zwischen den VOC- und den Geruchsstoffkonzentrationen für alle durchgeführten Messungen in den verschiedenen Verbrennungsphasen bei unterschiedlichen Betriebszuständen mit trockenem Buchenholz, Tannenholz und nassem Buchenholz dargestellt.

In dieser Darstellung ist keine eindeutige Korrelation zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen erkennbar. So wurden bei gleichen VOC-Konzentrationen sowohl niedrige als auch hohe Geruchsstoffkonzentrationen gemessen. Als grobe Tendenz nehmen die Geruchsstoffkonzentrationen mit steigender VOC-Konzentration zu.

Auch wenn nur die Versuche mit trockenem Buchenholz für gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung betrachtet werden, ergeben sich keine wesentlich anderen Aussagen (siehe Abbildung 4.4), eine eindeutige Korrelation zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentration ist auch bei dieser Darstellung nicht erkennbar.

Wird der Zusammenhang von VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen nur für den Betriebszustand gute Verbrennung betrachtet, ergibt sich ein etwas eindeutigeres Bild, siehe Abbildung 4.5. So nimmt auch hier in der Tendenz die Geruchsstoffkonzentration mit ansteigender VOC-Konzentration zu. Für die verschiedenen Messungen / Messtage ergibt sich eine vergleichsweise gute lineare Trendlinie mit Bestimmtheitsmaßen von rund 0,6 bis 0,9.

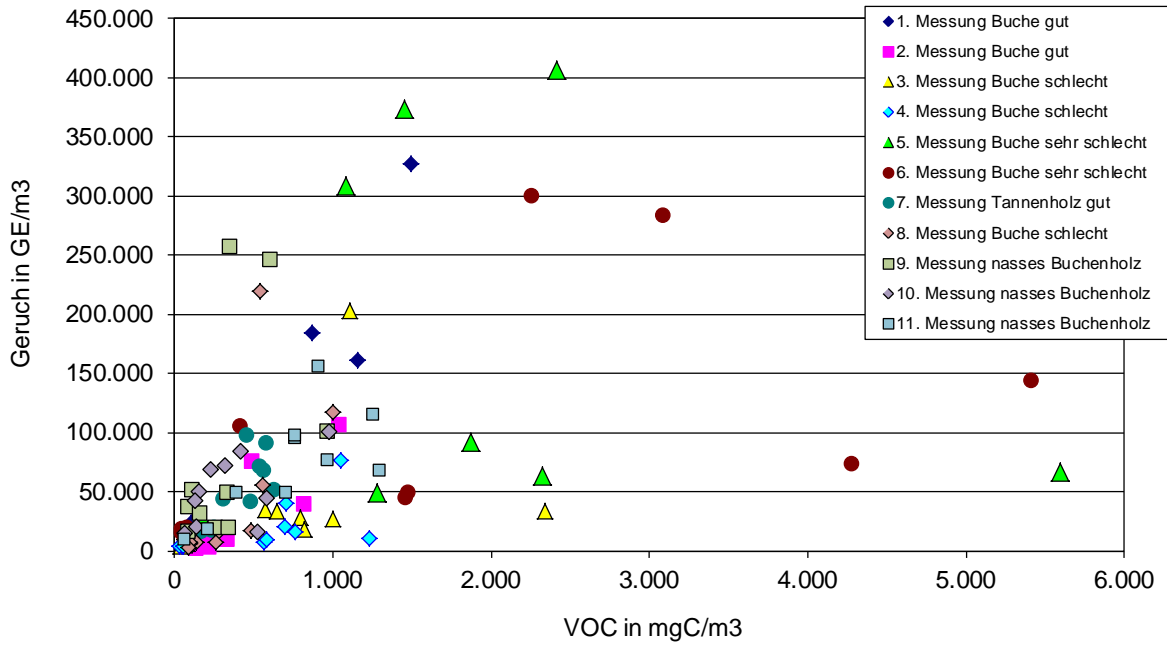


Abbildung 4.3 Zusammenhang zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen für alle durchgeführten Messungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen mit trockenem Buchenholz, Tannenholz und nassem Buchenholz

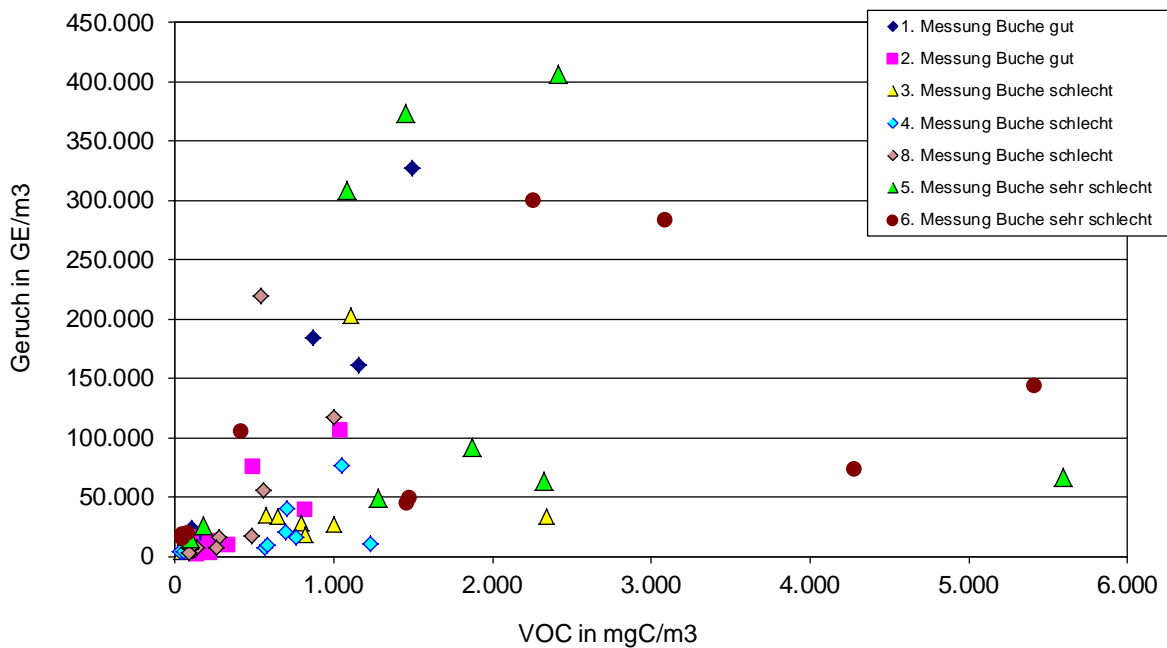


Abbildung 4.4 Zusammenhang zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen für die durchgeführten Messungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen mit trockenem Buchenholz

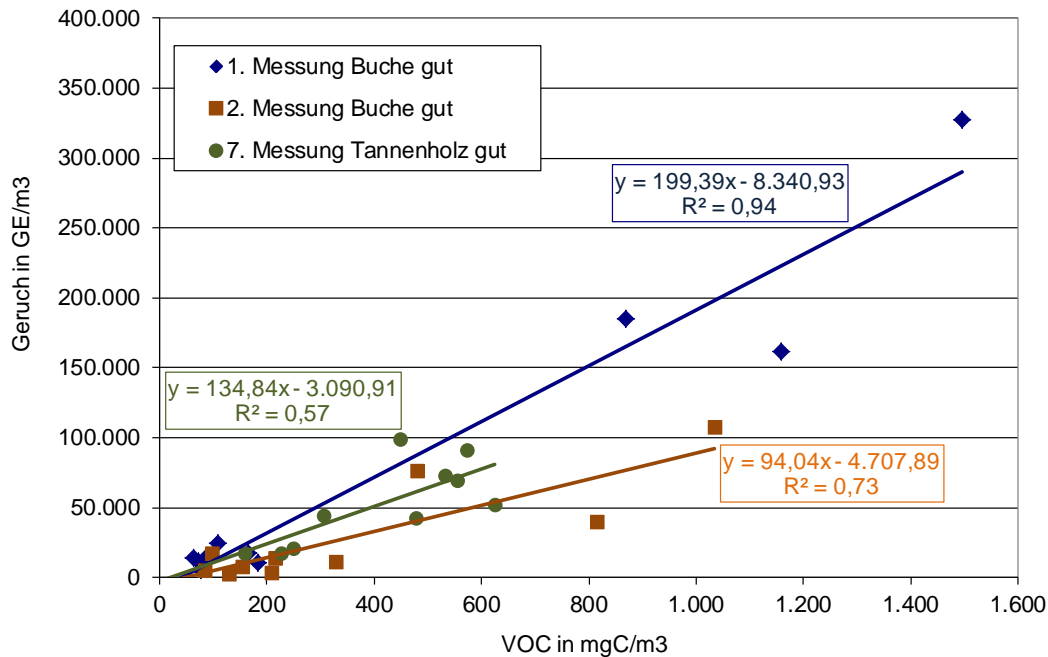


Abbildung 4.5 Zusammenhang zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen für die durchgeführten Messungen beim Betriebszustand gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz und trockenem Tannenholz

Im Folgenden soll eine für die praktische Anwendung nicht weiterführende Mittelwertbetrachtung aus den einzelnen Messungen für die jeweiligen Betriebszustände gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, gute Verbrennung mit trockenem Tannenholz und die Abbrände mit nassem Buchenholz (bei einer Verbrennungslufteinstellung wie für gute Verbrennung bei trockenem Buchenholz) erfolgen, um hieraus Rückschlüsse auf Verbrennungseffekte zu ziehen. Außerdem soll gezeigt werden, dass bei einer Mittelwertbildung mit unterschiedlichen Intervalllängen und ohne Wichtung der Zeitanteile die tatsächlichen Emissionen des Chargenabbrandes nur unvollkommen wiedergegeben werden.

4.1 Mittelwerte der untersuchten Betriebszustände

In Abbildung 4.6 sind die arithmetischen Mittelwerte der VOC-, CO- und Geruchsstoffkonzentrationen (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) sowie der O₂-Konzentrationen, des Unterdrucks im Abgasrohr, der Abgastemperatur an der Probenahmestelle sowie des Abgasvolumens (Mittelwert für die Probenahmeintervalle von 3 und 6 Minuten für die jeweiligen Verbrennungsphasen) bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, gute Verbrennung mit trockenem Tannenholz und Verbrennung von nassem Buchenholz dargestellt.

Die mittleren Geruchsstoffkonzentrationen für die Betriebszustände gute und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz sowie bei der Tannenholzverbrennung sind in etwa gleich hoch. Bei der Verbrennung von trockenem Buchenholz unter schlechten Bedingungen wurden im Mittel die geringsten Geruchsstoffkonzentrationen ermittelt. Bei Verbrennung von nassem Buchenholz ergaben sich im Mittel die höchsten Geruchsstoffkonzentrationen.

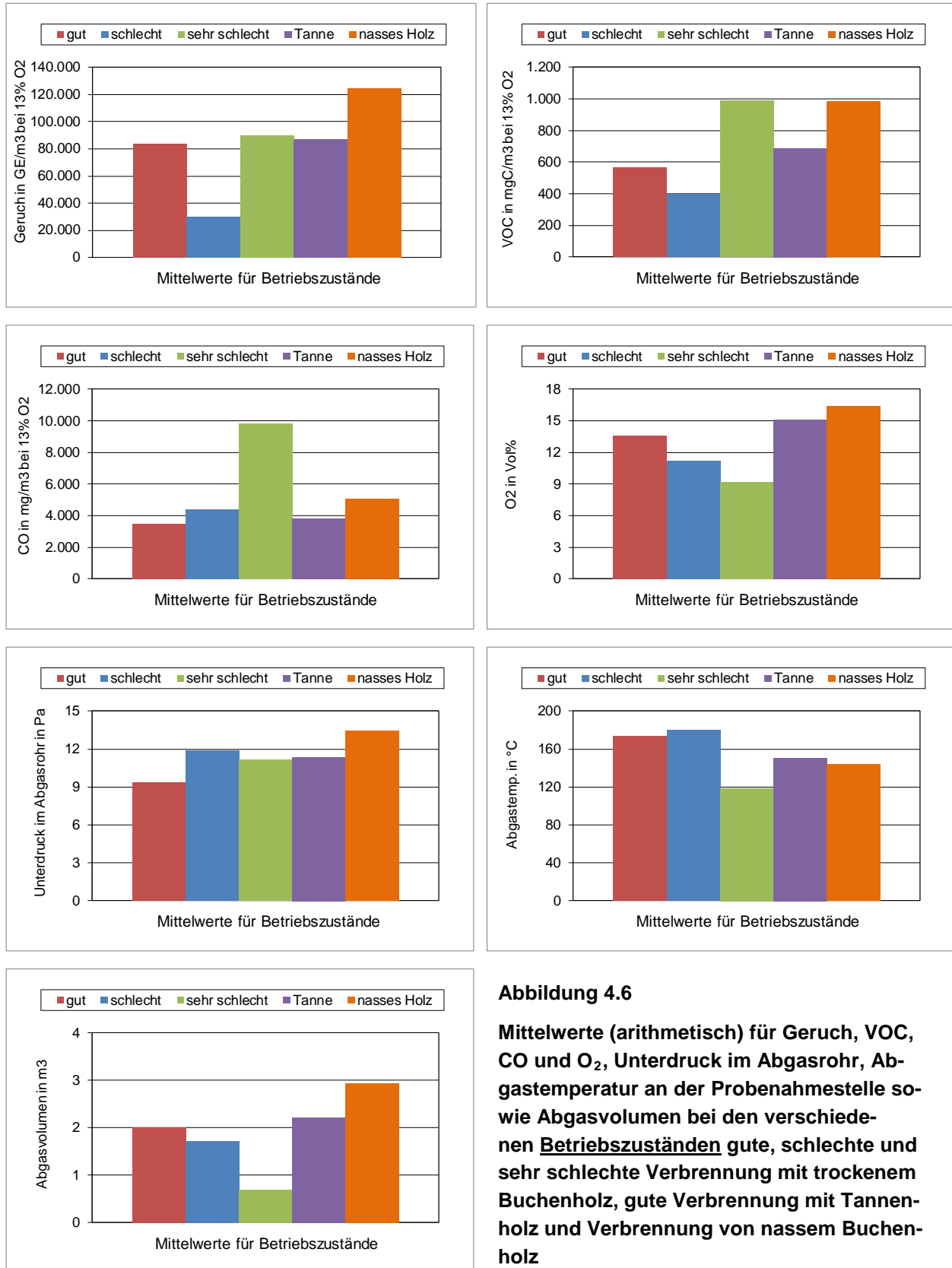


Abbildung 4.6

Mittelwerte (arithmetisch) für Geruch, VOC, CO und O₂, Unterdruck im Abgasrohr, Abgastemperatur an der Probenahmestelle sowie Abgasvolumen bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, gute Verbrennung mit Tannenholz und Verbrennung von nassem Buchenholz

Die mittleren VOC-Konzentrationen für die Betriebszustände mit trockenem Buchenholz steigen nicht kontinuierlich an. Beim Betriebszustand schlechte Verbrennung ergeben sich im Mittel geringere VOC-Konzentrationen als bei guter Verbrennung.

Dies liegt an den geringeren VOC-Konzentrationen in den Anbrandphasen aufgrund des geringeren Luftüberschusses, welcher sich bei der Einstellung für die schlechte Verbrennung ergibt. Bei sehr schlechter Verbrennung und bei Verwendung von nassem Buchenholz ergeben sich in etwa im Mittel für die jeweiligen Betriebszustände die gleichen VOC-Konzentrationen. Bei der Tannenholzverbrennung lag die mittlere VOC-Konzentration zwischen schlechter Verbrennung bzw. Verbrennung von nassem Buchenholz.

Die mittlere CO-Konzentration für die Betriebszustände nimmt mit einer Verschlechterung der Verbrennung bei trockenem Buchenholz zu. Die mittlere CO-Konzentration liegt beim Tannenholzabbrand zwischen der guten und der schlechten Verbrennung mit Buchenholz und bei der Verbrennung von nassem Buchenholz zwischen schlechter und sehr schlechter Verbrennung mit Buchenholz.

Der Restsauerstoffgehalt im Abgas nimmt bei trockenem Buchenholz entsprechend der Verbrennungslufteinstellung von guter zu sehr schlechter Verbrennung kontinuierlich ab. Bei Tannenholz und bei nassem Buchenholz wurden höhere O₂-Konzentrationen im Abgas gemessen.

Beim Abgasunterdruck liegen die Betriebszustände schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz sowie der Tannenholzabbrand eng beieinander. Der geringste mittlere Unterdruck im Abgasrohr ergab sich bei guten Verbrennungsbedingungen und der höchste bei der Verbrennung von nassem Buchenholz. Der Unterdruck im Abgasrohr wurde jeweils bei kaltem Ofen eingestellt und dann nicht mehr verändert.

Die Abgastemperatur an der Probenahmestelle steigt bei der schlechten Verbrennung leicht über die der guten Verbrennung an. Die sehr schlechte Verbrennung hat ein geringes Temperaturniveau von im Mittel nur knapp 120°C. Die mittlere Abgastemperatur von Tannenholz beträgt ca. 150°C. Bei nassem Holz liegt die Abgastemperatur etwas unter den Verhältnissen bei der Tannenholzverbrennung.

Das mittlere Abgasvolumen für die Probenahmezeiten der Geruchsmessung ändert sich vor allem in Abhängigkeit der Luftschieberstellungen und nimmt deshalb von guter zu sehr schlechter Verbrennung kontinuierlich ab. Bei sehr schlechter Verbrennung beträgt dies im Mittel nur ungefähr 0,7 m³ gegenüber z.B. rund 2,0 m³ bei der guten Verbrennung. Mit einem Abgasvolumen von rund 2,2 m³ liegt bei der Tannenholzverbrennung ein noch etwas höherer Wert vor.

In Abbildung 4.7 sind die Mittelwerte der Massenströme für VOC, CO und Geruch für die Zeiten der Probenahmeintervalle bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, gute Verbrennung mit Tannenholz und Verbrennung von nassem Buchenholz dargestellt. Zu den in Abbildung 4.6 dargestellten entsprechenden Konzentrationsmittelwerten ergeben sich, in Abhängigkeit des mittleren Abgasvolumens für den Betriebszustand, gewisse Änderungen im Vergleich der verschiedenen Betriebszustände. So liegen z.B. die Massenströme für VOC und CO bei der schlechten Verbrennung höher bzw. deutlich höher als bei der guten Verbrennung und der Geruchsstoffmassenstrom weist weniger Abstand zur guten bzw. sehr schlechten Verbrennung auf. Insgesamt ergeben sich aber beim Vergleich der Betriebszustände mit Buchenholz immer noch etwas andere Zusammenhänge als eigentlich erwartet.

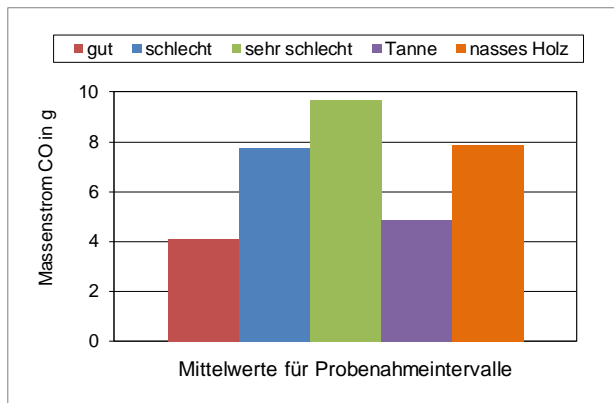
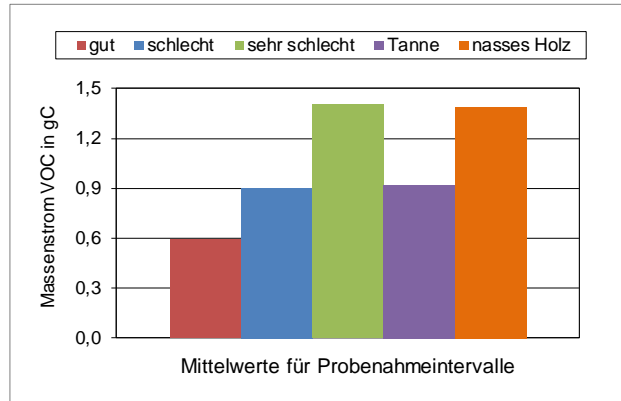
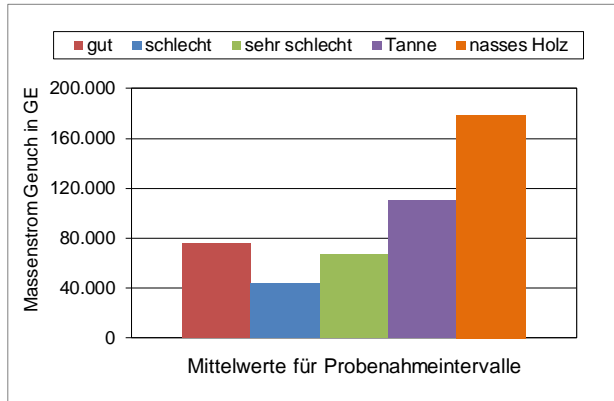


Abbildung 4.7

Mittelwerte (arithmetisch) der Massenströme für VOC, CO und Geruch für die Probenahmeintervalle bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, gute Verbrennung mit Tannenholz und Verbrennung von nassem Buchenholz

Dies betrifft die Verhältnisse vom Betriebszustand bei der Verbrennung von nassem Buchenholz zu schlechter bzw. sehr schlechter Verbrennung von trockenem Buchenholz für VOC und CO sowie vom Betriebszustand gute bis sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz für Gerüche. Die Ursache für die z.T. außerhalb der Erwartung liegenden Zusammenhänge liegt darin, dass bei den Mittelwerten für die Konzentrationen und Massenströme nur die Probenahmeintervalle von 3 Minuten (für den Anbrand) und jeweils 6 Minuten (für die Hauptverbrennungs- und Ausbrandphase) betrachtet werden und nicht die Gesamtabbrände, wie in Abbildung 4.8 für VOC und CO dargestellt.

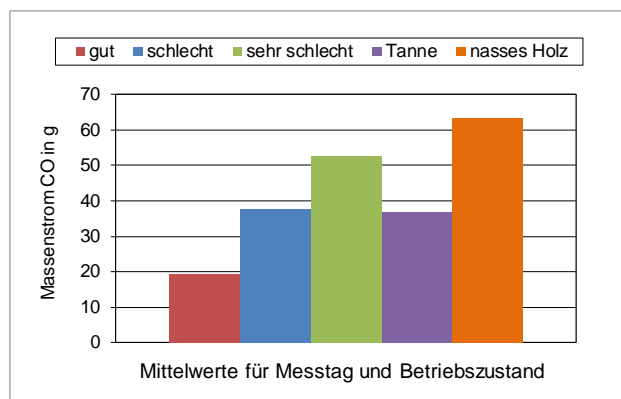
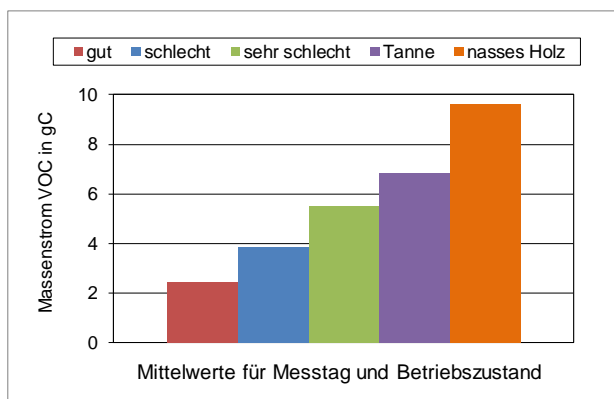


Abbildung 4.8 Mittelwerte (arithmetisch) der Massenströme für VOC und CO für alle Abbrände an einem Messtag (Anzünden und Abbrand von 3 Holzchargen) bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, gute Verbrennung mit Tannenholz und Verbrennung von nassem Buchenholz

Betrachtet man die mittleren Massenströme für VOC und CO aller Abbrände an einem Mess-tag für die einzelnen Betriebszustände ergeben sich klare Unterschiede. So nehmen die dargestellten Massenströme bei guter, schlechter, sehr schlechter Verbrennung und Verbrennung von nassem Buchenholz kontinuierlich zu. Bei der Verbrennung von Tannenholz lag der mittlere VOC- bzw. CO-Massenstrom für alle Abbrände eines Messtages oberhalb des Wertes für die sehr schlechte Verbrennung bzw. im Bereich der schlechten Verbrennung von trockenem Buchenholz.

4.2 Zusammenhänge für die Verbrennungsphasen

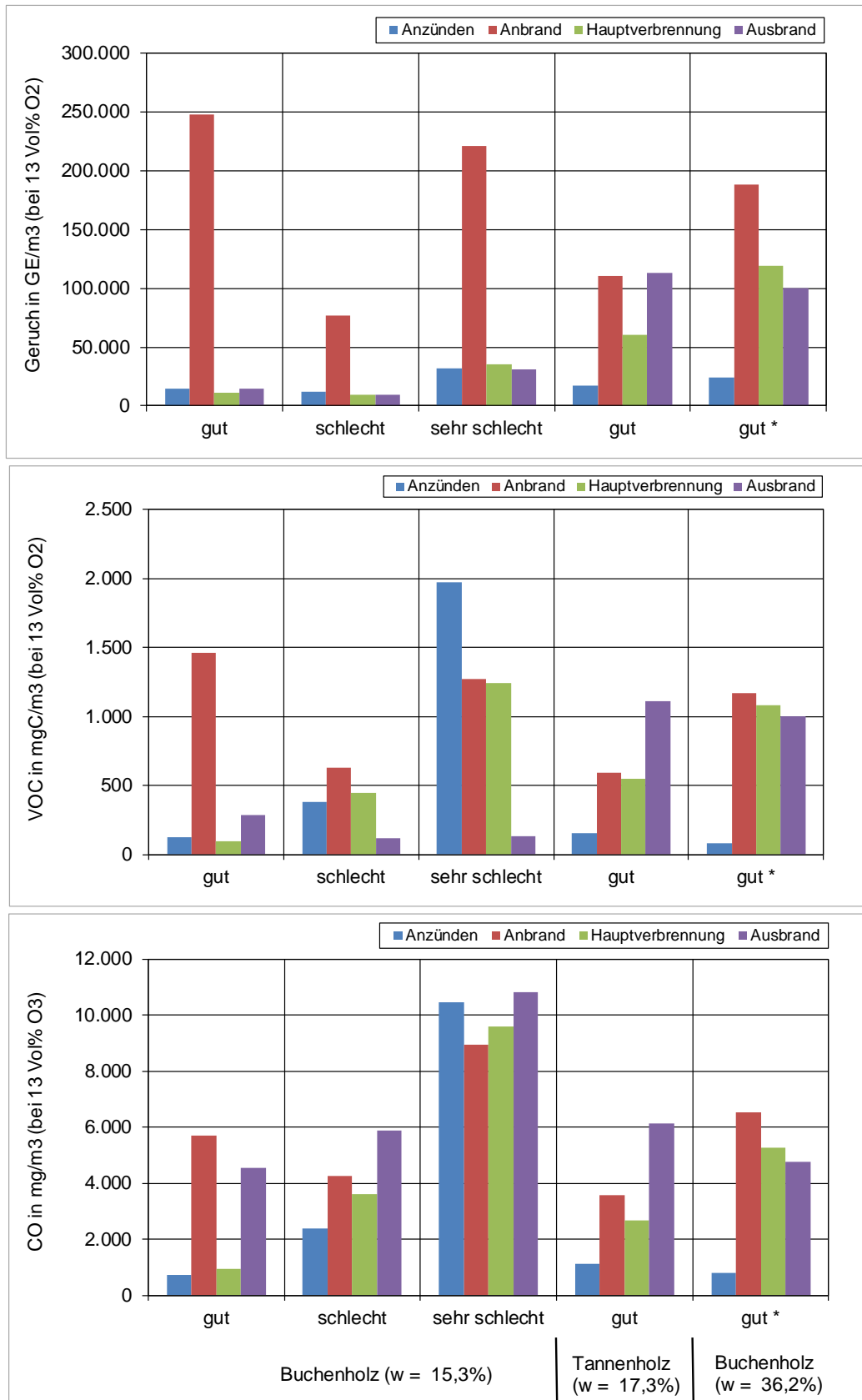
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Feuerungsversuche detaillierter für die einzelnen Verbrennungsphasen bewertet. In Abbildung 4.9 sind zusammenfassend die arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Messreihen der Geruchs-, VOC- und CO-Konzentrationen (bezogen auf 13 Vol% O₂) für das Anzünden und die untersuchten Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand für trockenes Buchenholz und die Betriebszustände gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung, für Tannenholz mit guter Verbrennung sowie für nasses Buchenholz mit Verbrennungslufteinstellung für gute Verbrennung bei trockenem Buchenholz dargestellt (in Tabelle 11.3 im Anhang sind die Zahlenwerte gelistet).

Mit Ausnahme beim trockenen Tannenholz, wurden beim Buchenholz in allen Betriebszuständen jeweils beim Anbrand die höchsten Geruchsstoffkonzentrationen ermittelt. Beim Tannenholz waren die Geruchsstoffkonzentrationen im Anbrand und im Ausbrand in etwa gleich hoch. Beim Buchenholz steigen die Geruchsstoffkonzentrationen mit schlechteren Verbrennungsbedingungen bzw. bei Verwendung von nassem Holz in der Hauptverbrennungs- und in der Ausbrandphase an.

Bei den VOC- und CO-Konzentrationen werden im Anbrand nur bei trockenem Buchenholz und guter Verbrennung und bei nassem Holz die höchsten Konzentrationen gemessen. Bei schlechteren Verbrennungsbedingungen bzw. bei Verwendung von Tannenholz werden die höchsten VOC- und CO-Konzentrationen entweder beim Anzünden oder im Ausbrand erreicht. Gegenüber trockenem Buchenholz und guten Verbrennungsbedingungen nehmen bei schlechten und sehr schlechten Betriebsbedingungen bzw. bei Verwendung von nassem Holz oder Tannenholz die Unterschiede in den VOC- und CO-Konzentrationen zwischen den einzelnen Verbrennungsphasen und z.T. auch bezüglich des Anzündens ab.

Die einzelnen Verbrennungsphasen seien nachfolgend detailliert betrachtet. Die Abbildung 4.10 und die Abbildung 4.11 zeigen die Korrelationen von VOC- und Geruchsstoffkonzentration (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) der einzelnen Messungen für das Anzünden und die Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand bei trockenem Buchenholz und den Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung.

Für das Anzünden, den Anbrand und die Hauptverbrennung ergibt sich eine vergleichsweise gute Korrelation von VOC und Gerüchen mit Bestimmtheitsmaßen R^2 von 0,61 bis 0,84. Für den Ausbrand konnte bei trockenem Buchenholz kein Zusammenhang zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentration ermittelt werden.



* Einstellung der Verbrennungsluft wie bei trockenem Buchenholz und gute Verbrennung

Abbildung 4.9 Mittelwerte (arithmetisch) für Geruchs-, VOC- und CO-Konzentrationen bei 13 Vol% O₂ für das Anzünden und die untersuchten Verbrennungsphasen für trockenes Buchenholz, Tannenholz und nasses Buchenholz

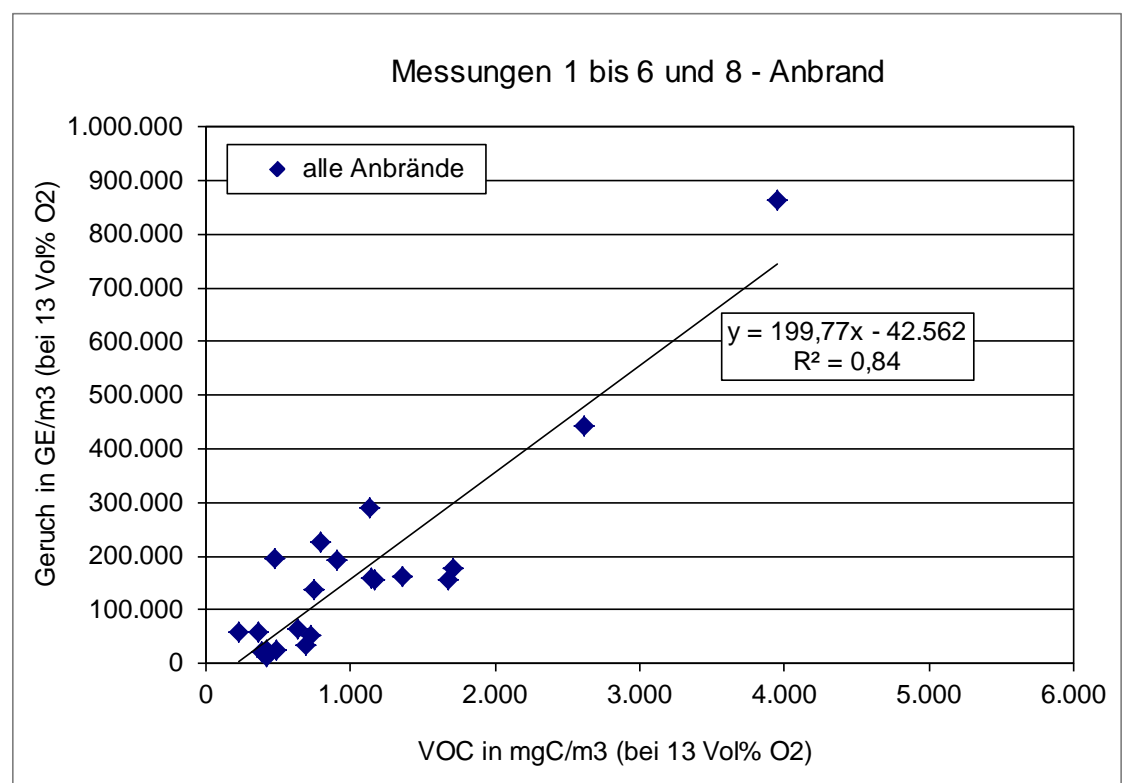
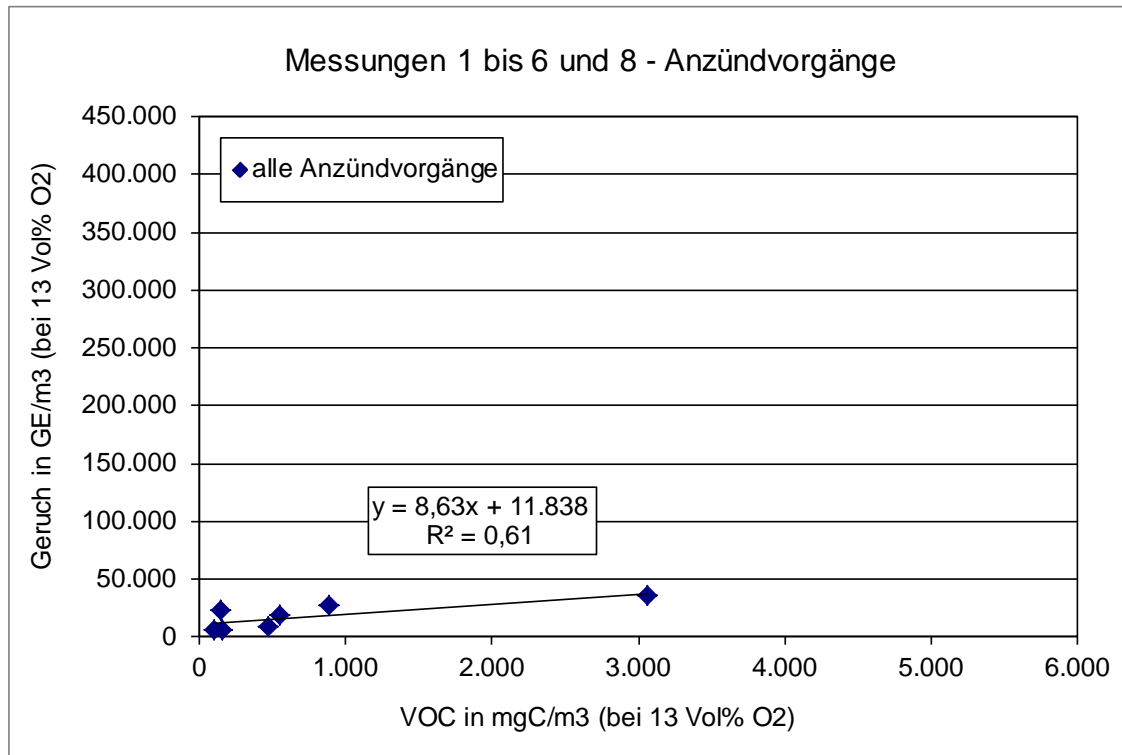


Abbildung 4.10 Korrelationen von VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) für das Anzünden und die Verbrennungsphase Anbrand bei trockenem Buchenholz (Verbrennungszustände, gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung)

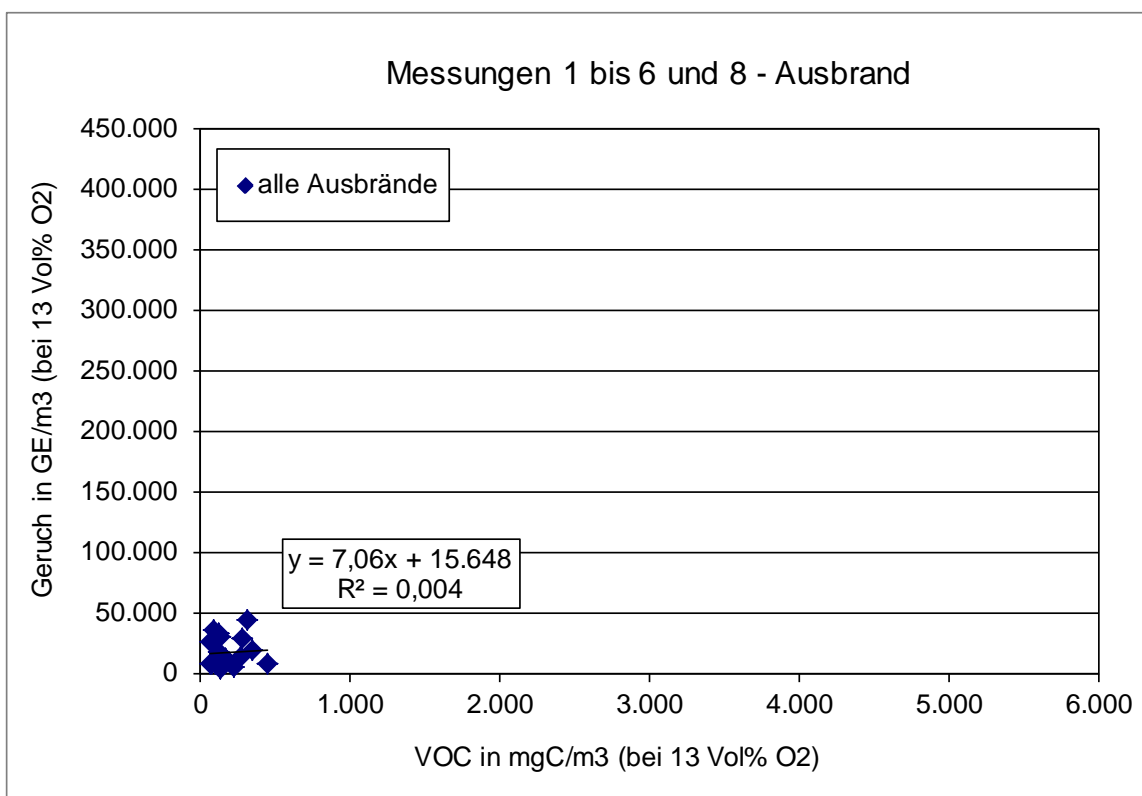
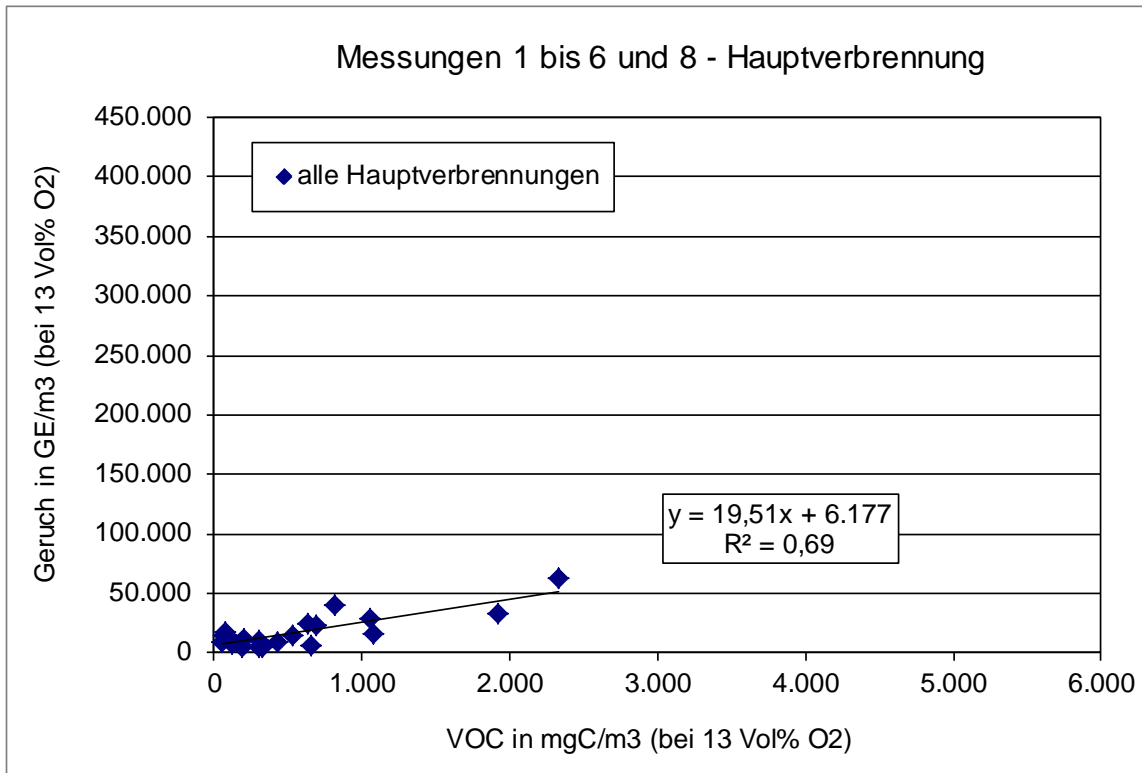


Abbildung 4.11 Korrelationen von VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) für die Verbrennungsphasen Hauptverbrennung und Ausbrand bei trockenem Buchenholz (Verbrennungszustände: gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung)

Abbildung 4.12 zeigt zusammenfassend den linearen Zusammenhang von VOC- und Geruchsstoffkonzentration (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) für die Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand für trockenes und nasses Buchenholz sowie Tannenholz, ggf. jeweils zusammengefasst für die Verbrennungszustände gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung.

Für trockenes Buchenholz ergeben sich die Geraden jeweils anhand den in Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 aufgeführten Gleichungen. Die Gerade für die Ausbrandphasen weist die geringste Steigung auf, eine etwas größere Steigung weist die Hauptverbrennungsphase auf. Die Geraden vom Ausbrand sowie der Hauptverbrennung schneiden die Y-Achse im positiven Bereich. Die Gerade für die Anbrandphase zeigt die höchste Steigung, der Schnittpunkt mit der y-Achse liegt im negativen Bereich. Letzteres würde man vielleicht nicht so erwarten da man davon ausgehen könnte, dass wenn im Abgas keine organischen Verbindungen vorhanden sind auch die Geruchsstoffkonzentration gegen Null geht. Bestehen bei geringen VOC-Konzentrationen diese im Wesentlichen aus geruchslosen Verbindungen (z.B. Methan), dann wäre der Geradenverlauf plausibel.

Bei den Versuchen mit nassem Buchenholz ist die Reproduzierbarkeit gegenüber den Versuchen mit trockenem Buchenholz eingeschränkt, weil ohne Schüreingriffe ein Holzabbrand kaum möglich war. Unter Schüreingriffen wird nur das Öffnen der Feuerraumtür oder das zusätzliche Verändern der Lage der Holzscheite (Schüren mit Stochern) zusammengefasst. Beim Schüren mit Stochern wurden die Holzauflageflächen zur Glut gewälzt oder die Scheite wieder besser auf Glutresten auf dem Rost platziert. Die Schüreingriffe wirken sich stark auf die Luftströmung im Holzbereich und damit den lokalen O₂-Gehalt und die Feuerraumtemperatur aus, was den weiteren Abbrandverlauf beeinflusst. Insgesamt wurde trotz der Schüreingriffe ein deutlich geringerer Brennstoffumsatz und damit niedrigere CO₂-Konzentrationen gegenüber dem trockenem Buchenholz erreicht.

Um auch die Bedingungen bei den Abbränden mit nassem Buchenholz möglichst zu vereinheitlichen, wurde aufgrund von Vorversuchen festgelegt, dass nach der Probenahme im Anbrand insgesamt dreimal geschürt werden soll. Nach Erreichen einer möglichst hohen CO₂-Konzentration in der Hauptverbrennung wurde dann hier die Geruchsprobe gezogen. Danach soll noch ein- bzw. maximal zweimal geschürt werden, bis die Geruchsprobe der Ausbrandphase genommen wird. Zusätzlich wurden zeitliche Fenster für die Probenahmen definiert und bei der Hauptverbrennung immer erst ein charakteristisches Fallen der CO₂-Konzentration nach dem 3. Schüren abgewartet und beim darauf folgenden Anstieg erst die Geruchsprobe genommen. Beim 3. Abbrand konnten jeweils ein bis zwei Schüreingriffe entfallen, da die höhere Feuerraumtemperatur das Abbrandverhalten verbesserte. Auffällig war, dass bei einer Abgastemperatur von unter 110°C die CO₂-Konzentration auch durch Schüren kaum zu verbessern war.

Beim ersten Versuchstag mit nassem Buchenholz entwickelte sich der Abbrand von Beginn an wesentlich besser als erwartet, so dass hier von der Schürvorgabe abgewichen wurde. Eine Begründung könnte ein zusätzliches Absinken des Wassergehalts der verwendeten Holzscheite sein, da die abgewogenen Scheite über Nacht direkt vor dem Ofen auf dem Betonboden gelagert waren.

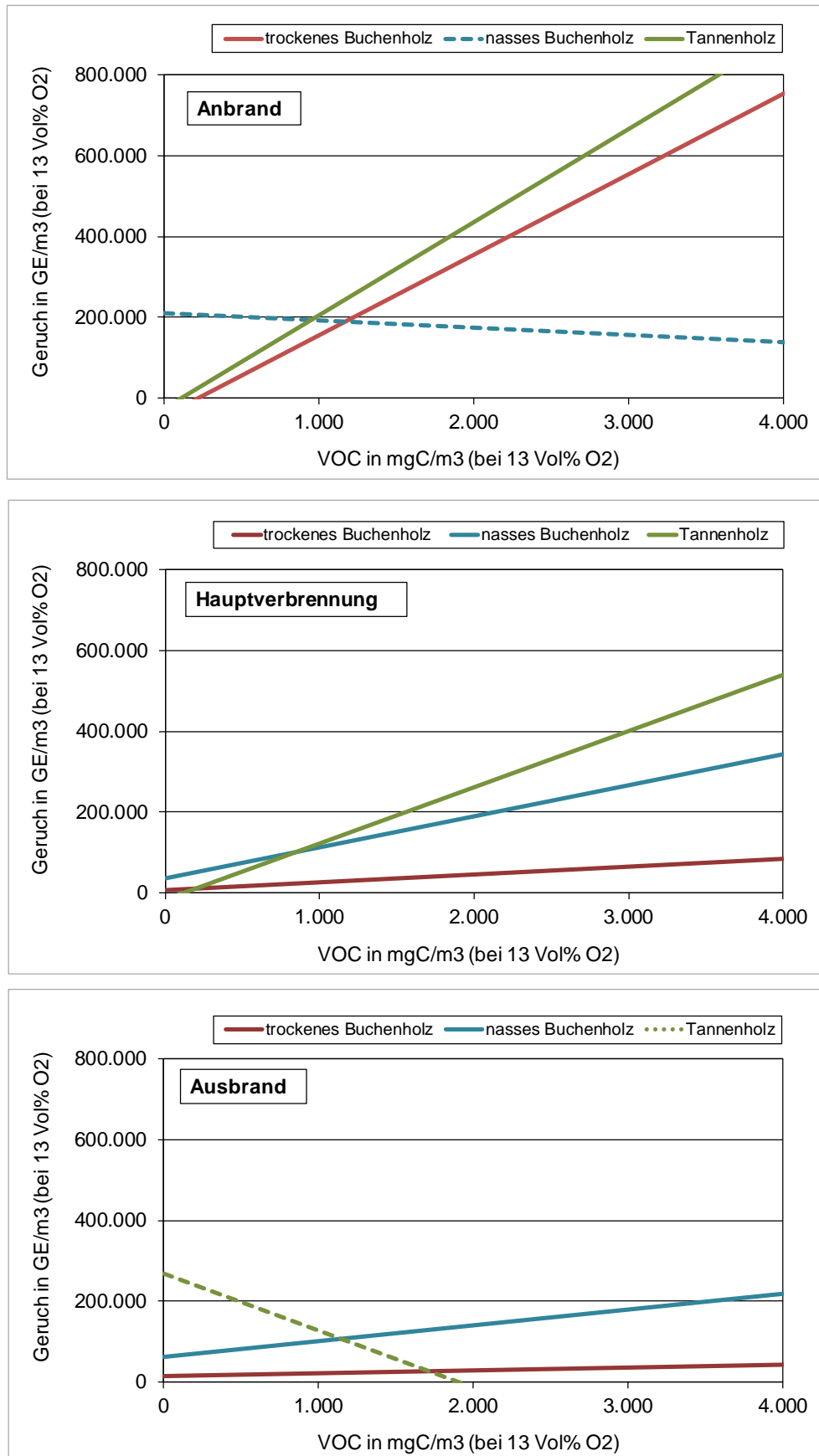


Abbildung 4.12 Linearer Zusammenhang von VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen der Verbrennungsphasen bei trockenem und nassem Buchenholz sowie bei Tannenholz

Durch seine hygroscopischen Eigenschaften entzog der Beton u.U. genau an der Auflagefläche der Holzstücke Wasser, so dass lokal auf der Glut ein abgesenkter Wassergehalt im Holz den Anbrand und damit auch die darauffolgenden Verbrennungsphasen günstig beeinflusste. Danach wurde das vorbereitete Holz bis zum Auflegen in einem verschlossenen Plastiksack aufbewahrt. Die Holzmenge pro Abbrand ist mit ca. 1.300 g nassem Holz etwas größer als bei den Versuchen mit trockenem Holz.

Auffällig beim Vergleich der Zusammenhänge zwischen VOC- und Geruchsstoffkonzentration im Anbrand ist, dass bei nassem Buchenholz eine negative Steigung vorliegt, d.h. mit zunehmender VOC-Konzentration nimmt die Geruchsstoffkonzentration ab (gestrichelte Linie). Ursache könnte hier sein, dass unterschiedliche Startzeiten der Geruchsprobe bei den Messungen mit nassem Buchenholz vorlagen, da mit der Geruchsprobe erst ab einer erkennbaren Flammenentwicklung begonnen wurde. Aufgrund des sehr schlechten Anzündverhaltens von nassem Holz dauerte es unterschiedlich lange, bis sich eine erste stabilere Flamme ausbildete. Z.T. waren auch zusätzliche Eingriffe notwendig, um überhaupt ein Zünden zu erreichen. Somit sind die Zustände im Anbrand bei den einzelnen Chargenabbränden mit nassem Holz nicht mehr so gut vergleichbar wie bei trockenem Holz, wodurch eine saubere Abgrenzung der Verbrennungsphasen u.U. nicht mehr gegeben ist.

In der Hauptverbrennung nehmen bei trockenem und nassem Buchenholz und bei Tannenholz die Geruchsstoffkonzentrationen mit den VOC-Konzentrationen zu. In der Ausbrandphase ist vor allem Tannenholz auffällig, da hier eine negative Steigung vorliegt ab (gestrichelte Linie). Ursache ist hier wahrscheinlich die Lage der Messpunkte in einem engen Bereich von ca. 990 bis 1.130 mgC/m³ bzw. 99.600 bis 135.600 GE/m³ (bei jeweils 13 Vol% O₂) in Verbindung mit der geringen Anzahl an Messungen (3 Stück), wodurch sich eher zufällig die berechnete negative Steigung ergab.

In Abbildung 4.13 sind zur Veranschaulichung die Konzentrationen von CO₂, VOC und Geruch für die durchgeführten Versuche mit Buchen- und Tannenholz, sortiert nach Verbrennungsphasen und ansteigenden VOC-Konzentrationen (VOC und Geruch bezogen auf 13 Vol% O₂), aufgeführt. Als Kennung der Versuche ist der Messtag (siehe Tabelle 3.5, insgesamt 11 Messtage mit Geruchsmessungen) und die Geruchsprobe Nr. (siehe Tabelle 3.3, je Messtag 10 Geruchsproben) angegeben. Um alle drei Größen mit zwei y-Achsen anschaulich zu machen, wurde die CO₂-Konzentration mit Faktor 100 multipliziert.

Die Säulendiagramme zeigen, sortiert nach den Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand, die nach aufsteigenden VOC-Konzentrationen sortierten Werte. Insgesamt ist ersichtlich, dass tendenziell mit zunehmenden VOC-Konzentrationen auch die Geruchsstoffkonzentrationen beim Anbrand und in der Hauptverbrennung zunehmen. Auffällig sind z.T. erhöhte Geruchsstoffkonzentrationen bei noch vergleichsweise geringen VOC-Konzentrationen. Dies ist z.T. dann der Fall, wenn die CO₂-Konzentration relativ gering ist, z.B. beim Anbrand für Kennung 9.2 oder bei der Hauptverbrennung für die Kennungen 9.3, 9.6, 10.3 und 9.9. Beim Ausbrand ist eine Abhängigkeit der Geruchs- von der VOC-Konzentration bei höheren VOC-Konzentrationen zu erkennen. Liegen die auf 13 Vol% bezogenen VOC-Konzentrationen unter 300 mg/m³, so treten meist nur geringere Geruchsstoffkonzentrationen von < 50.000 GE/m³ auf. Einige Ausnahmen liegen hier allerdings für den 10. Versuchstag bei den Messungen mit nassem Buchenholz (Kennungen 10.10 und 10.4) vor.

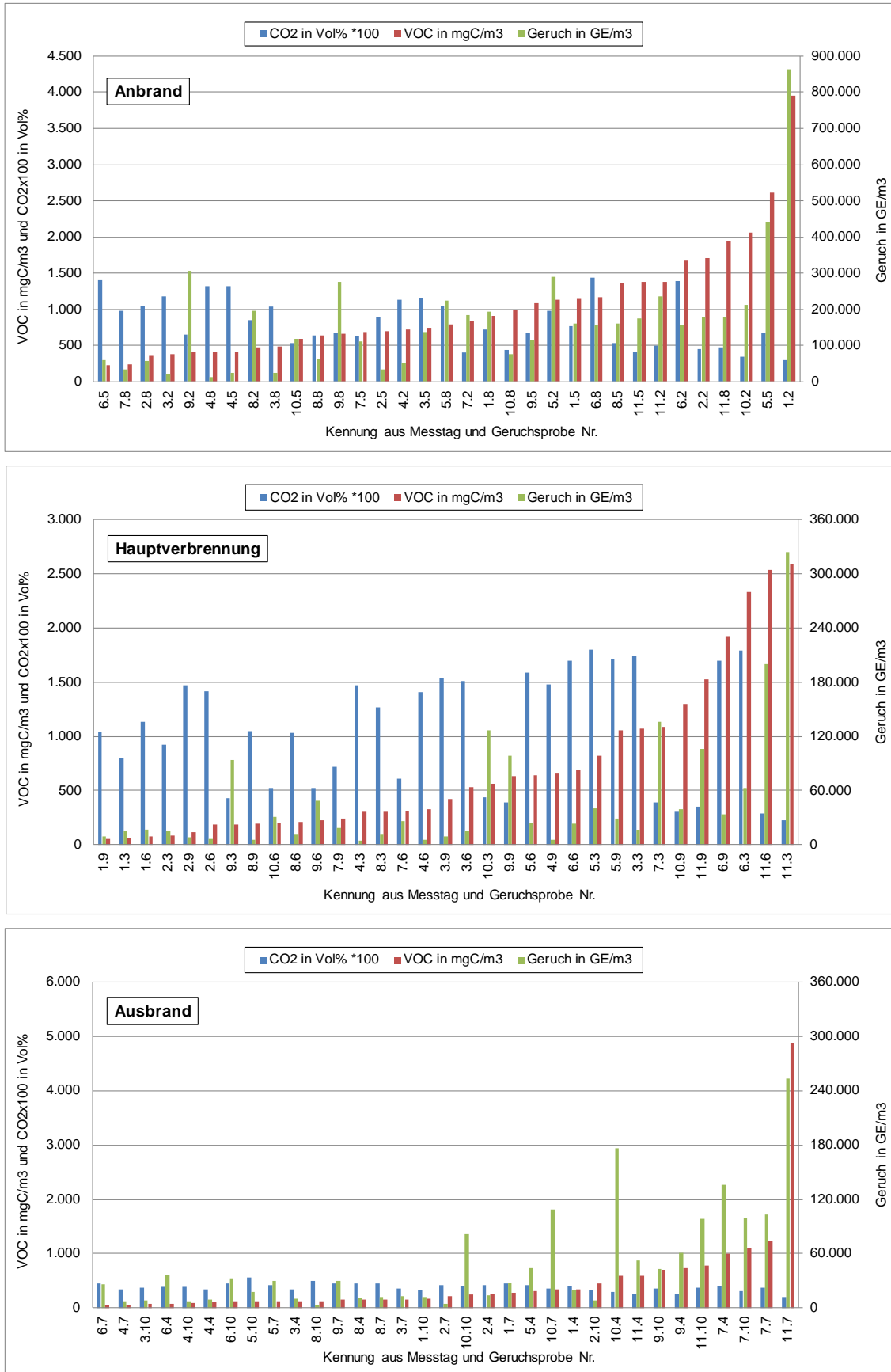


Abbildung 4.13 Konzentrationen von CO₂, VOC und Geruch für die Versuche mit Buchen- und Tannenholz, sortiert nach Verbrennungsphasen und ansteigenden VOC-Konzentrationen (VOC und Geruch bezogen auf 13 Vol% O₂)

Die Geruchs- und VOC-Konzentrationen bei 13 Vol% O₂, jeweils unterschieden nach 1., 2. und 3. Abbrand an einem Versuchstag für den Anbrand (1), die Hauptverbrennung (2) und den Ausbrand (3) für trockenes Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung, nasses Buchenholz (mit selber Verbrennungslufteinstellung wie gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz) und Tannenholz (mit selber Verbrennungslufteinstellung wie gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz) sind zur Verdeutlichung der zeitlichen Entwicklung in Abbildung 4.14 dargestellt. Gut erkennbar ist die Bandbreite der Ergebnisse für die verschiedenen Versuchstage bei den einzelnen Betriebszuständen bzw. Brennstoffen für die beiden dargestellten Emissionskomponenten. Beim 1. Abbrand eines Versuchstages treten meist die größten Streuungen auf, dies ist besonders bei guter Verbrennung und bei nassem Holz ersichtlich. Mit zunehmender Temperatur des Kaminofens werden die Verbrennungsbedingungen für die verschiedenen Betriebszustände stabiler und die Bandbreite der Ergebnisse nimmt ab.

Abbildung 4.15 zeigt zur Interpretation der Verbrennungsabläufe die arithmetischen Mittelwerte der Massenströme bezogen auf die Probenahmeintervalle für Geruch und VOC und unterschieden nach Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, Verbrennung von nassem Buchenholz und gute Verbrennung mit Tannenholz.

Werden die auf die Probenahmeintervalle bezogenen Massenströme betrachtet, so nehmen im Anbrand bei trockenem Buchenholz diese mit einer Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen sogar ab, statt wie erwartet zu. Der insgesamt eingestellte geringere Luftüberschuss bei schlechter und sehr schlechter Verbrennung wirkt sich in der Anbrandphase günstig aus, da in dieser Verbrennungsphase der Luftüberschuss trotzdem ausreichend hoch ist, aber geringer als bei der Einstellung für eine gute Verbrennung. Somit reduziert ein geringerer Luftüberschuss in der Anbrandphase die Geruchs- und VOC-Massenströme. Bei trockenem und nassem Buchenholz wurden im Anbrand die höchsten Geruchsmassenströme ermittelt, obwohl die Probenahmedauer hier nur 3 Minuten betragen hat.

In der Hauptverbrennungsphase (Probenahmedauer 6 Minuten) nehmen die Geruchs- und VOC-Massenströme bei einer Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen durch die Reduzierung des Luftüberschusses bei trockenem Buchenholz in der Tendenz bzw. kontinuierlich zu.

In der Ausbrandphase weisen nasses Buchenholz und auch Tannenholz die höchsten Geruchs- und VOC-Massenströme für die Probenahmeintervalle von 6 Minuten auf.

Für einen Vergleich der eigenen Messwerte mit den Angaben von Richter und Röckle [2000] sowie Kistler [2012] in Abbildung 4.16 wurden die Mittelwerte für VOC und Geruch der Probenahmeintervalle beim Anzünden und bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz herangezogen (siehe auch Abbildung 4.6 sowie Tabelle 11.4 für Mittel-, Maximal- und Minimalwerte). Hierdurch ergibt sich, mit Ausnahme vom Ausbrand, ein überraschend guter Zusammenhang der arithmetischen Mittelwerte für die VOC- und die Geruchsstoffkonzentrationen. Ursache hierfür dürfte sein, dass die vorliegende größere Streuung (siehe hierzu Einzelwerte in Tabelle 11.1) bei den Einzelversuchen in den einzelnen Verbrennungsphasen für die betrachteten Betriebszustände, die sich trotz der standardisierten Vorgehensweise ergaben, bei der Mittelwertbildung weitgehend eliminiert wurde.

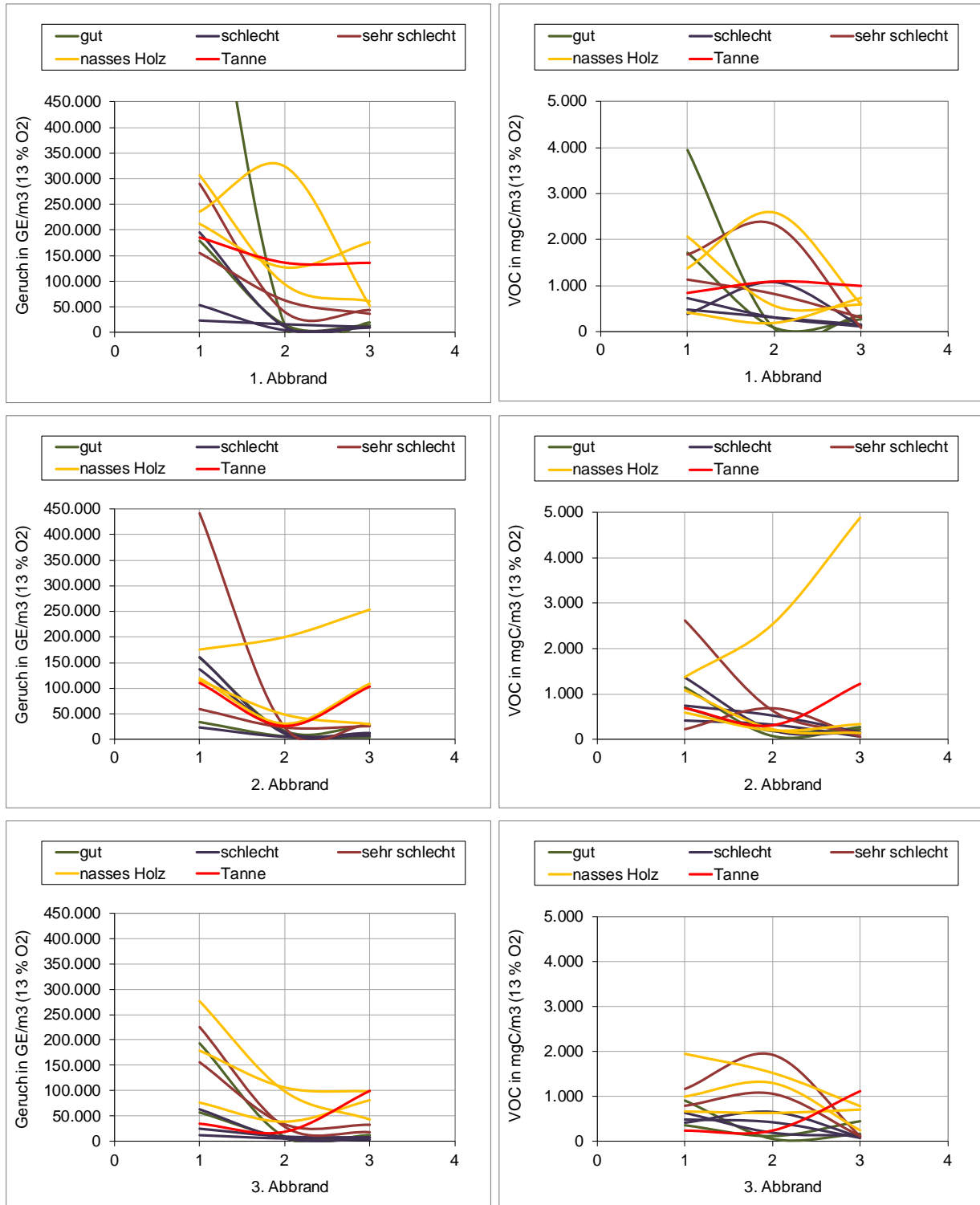


Abbildung 4.14 Geruchs- und VOC-Konzentrationen bei 13 Vol% O₂ unterschieden nach 1., 2. und 3. Abbrand an einem Versuchstag mit Anbrand (1), Hauptverbrennung (2) und Ausbrand (3) für trockenes Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung, nasses Buchenholz und Tannenholz (gute Verbrennung)

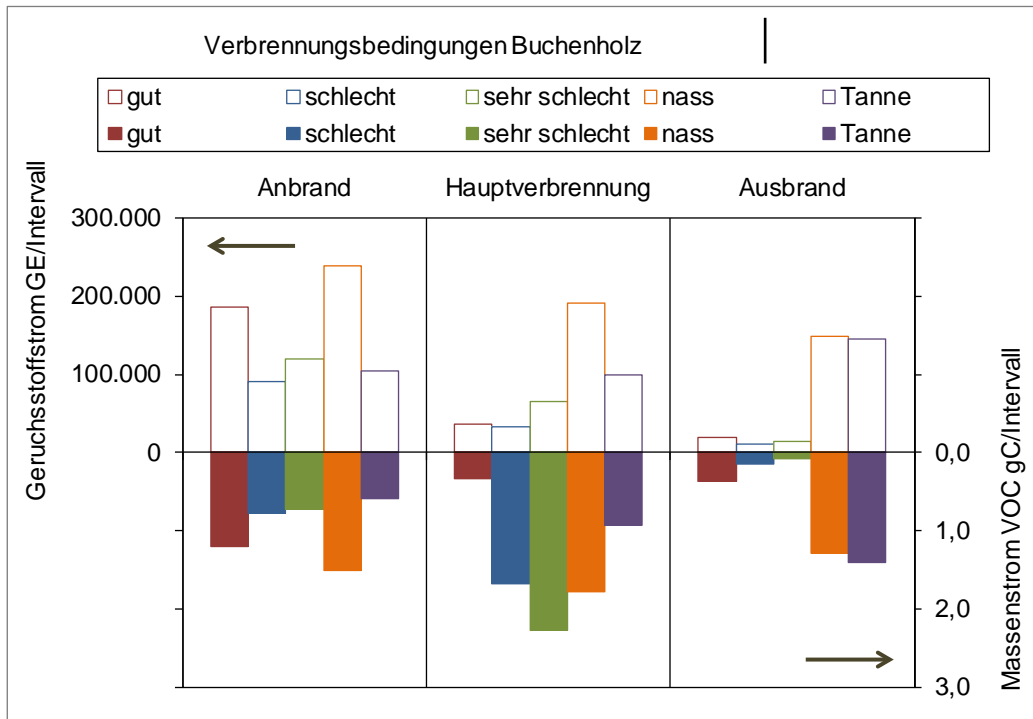


Abbildung 4.15 Mittelwerte (arithmetisch) der Massenströme für Geruch und VOC für die Probenahmeintervalle unterschieden nach Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand bei den verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz, Verbrennung von nassem Buchenholz und gute Verbrennung mit Tannenholz

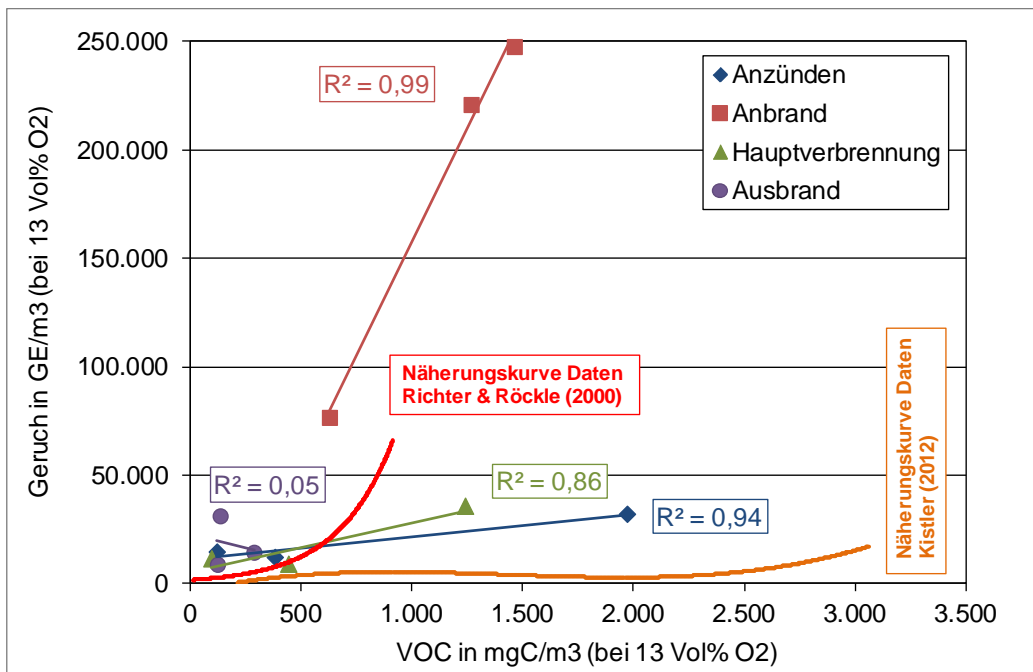


Abbildung 4.16 Mittelwerte (arithmetisch) für VOC und Geruch unterschieden nach Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand für die verschiedenen Betriebszuständen gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz im Vergleich zu den Ergebnissen nach Richter und Röckle [2000] sowie Kistler [2012]

Die Näherungskurve für die Daten von Richter und Röckle [2000] von 5 mechanisch beschickten Heizkesseln im Bereich von 60 bis 3.000 kW Nennwärmeleistung, die mit unterschiedlichen Brennstoffen (Hackschnitzel und Werkstoffreste) und bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen gemessen wurden, zeigen bei höheren VOC-Konzentrationen eine deutliche Zunahme der Geruchsstoffkonzentration. Die Näherungskurve liegt z.T. bei geringeren VOC-Konzentrationen unterhalb der eigenen Messwerte und bei höheren VOC-Konzentrationen zwischen den Werten für Hauptverbrennung und Anbrand. Ein direkter Vergleich wird aufgrund der unterschiedlichen Anlagen und Brennstoffe erschwert.

Bei den Messungen von Kistler [2012] ist auffällig, dass hier die Messergebnisse für Geruch deutlich niedriger liegen als die eigenen Messungen. Dies könnte u.a. daran liegen, dass bei dieser Untersuchung Mittelwerte über 2 Abbrände für einen Kaminofen angegeben wurden.

Der lineare Zusammenhang von VOC- und Geruchsstoffkonzentration (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) mit Unsicherheitsbereichen (60 %) für die unterschiedlichen Verbrennungsphasen bei trockenem Buchenholz (Verbrennungszustände, gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung) sind in Abbildung 4.17 dargestellt, wobei die Bereiche bis zu den in den verbrennungsversuchen maximal gemessenen VOC-Konzentrationen farblich hervorgehoben sind (Vergleiche hierzu Abbildung 4.10 bis Abbildung 4.12).

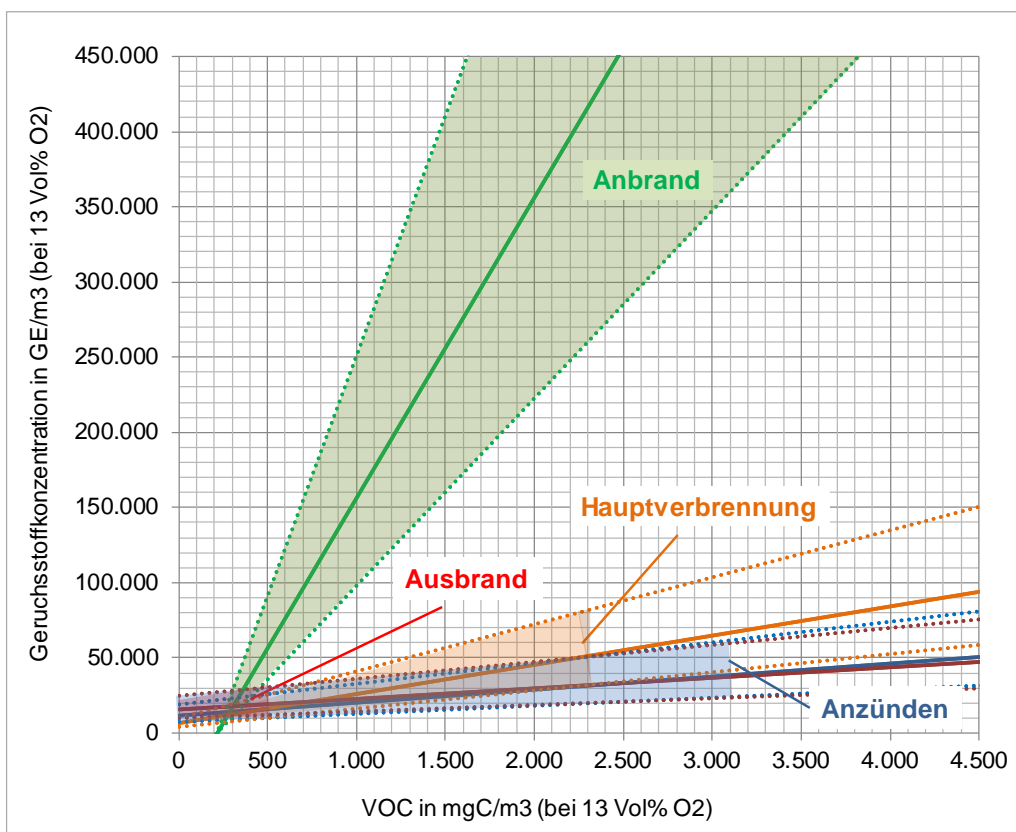


Abbildung 4.17 Linearer Zusammenhang von VOC- und Geruchsstoffkonzentrationen (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) mit Unsicherheitsbereich für die unterschiedlichen Verbrennungsphasen bei trockenem Buchenholz (Verbrennungszustände, gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung)

5 Ergebnisse der Schweizer Anfeuerungsmethode

In dem Projekt wurde außerdem untersucht, ob es emissionsseitige Vorteile hat, wenn der erste Chargenabbrand bei kaltem Ofen nicht mit einem kleinen Vorfeuer zur Erzeugung einer Grundglut (Anzündvorgang) und anschließender Holzaufgabe auf diese Grundglut durchgeführt wird, sondern die Holzcharge und etwas feines Holz von oben angezündet wird (Schweizer Anfeuerungsmethode). Bei diesen Versuchen wurden keine Geruchsmessungen durchgeführt.

Als Brennstoff für diese Versuche wurde trockenes Buchenholz verwendet. Die Aufgabemenge entsprach in etwa den bisher beschriebenen Versuchen für die Geruchsmessungen mit trockenem Buchenholz für den ersten Abbrand. Bei den Geruchsmessungen wurden ca. 1,25 kg Buchenholz in 3 Stücken und ca. 80 Gramm feines Anfeuerholz (5 Stück) für die 1. Holzaufgabe nach der Grundgluterzeugung verwendet. Für die Schweizer Anfeuerungsmethode wurden ebenfalls ca. 1,25 kg Buchenholz, allerdings 4 bis 5 Stück, sowie 0,2 kg feines Anfeuerholz (ca. 12 Stück) eingesetzt. Als Anzündhilfe wurden Anzündwürfel auf Paraffin-Basis (Versuch am 9.1.2012) sowie aus mit Wachsgetränkter Holzwole (Versuch am 16.1.2012) verwendet. In Vorversuchen wurden die Randbedingungen festgelegt, es zeigte sich hier vor allem, dass die Anzahl der Holzstücke erhöht werden musste, um eine sichere Zündung zu erreichen.

Die Buchenholzstücke wurden für die Versuche in den kalten Ofen unten auf dem Rost mit Abstand in 2 Lagen aufgeschichtet und das Anfeuerholz (fein gespaltene Weichholzstücke) sowie die Anzündhilfe oben aufgelegt, siehe Abbildung 5.1. Nach dem Anbrennen der Anzündhilfe reagiert zuerst das Anfeuerholz und mit dessen zunehmendem Abbrand beginnt auch das Buchenholz zu brennen, allerdings nur zögerlich.

Die Abbildung 5.2 zeigt den Abbrandverlauf bei der Schweizer Anfeuerungsmethode im Vergleich zum guten Abbrand mit trockenem Buchholz. Während beim Chargenabbrand mit guten Verbrennungsbedingungen, hier dargestellt das Anzünden mit feinem Holz und anschließender Aufgabe der ersten Holzcharge, die maximale CO₂-Konzentration nach gut 20 Minuten erreicht ist und stabil bleibt, dauert es bei der Schweizer Anfeuerungsmethode deutlich länger, bis die Hauptverbrennungsphase nach ca. 30 Minuten erreicht wird. Auch sind das Maximum der CO₂-Konzentration und der Mittelwert der CO₂-Konzentration niedriger als bei der herkömmlichen Methode.

Nach der Holzaufgabe bei guter Verbrennung steigen die CO- und VOC-Konzentrationen deutlich an und gehen dann auf ein Minimum, wenn die maximale CO₂-Konzentration erreicht wird. Der Anzündvorgang mit feinem Holz erzeugt nur eine kurze und vergleichsweise niedrige VOC-Spitze. Bei der Schweizer Anfeuerungsmethode steigen die VOC- und CO-Konzentration nach dem Anbrennen langsam an und bleiben dann, bis die CO₂-Konzentration ihr Maximum erreicht hat, auf relativ konstantem Niveau. Im Bereich des CO₂-Maximums werden auch bei der Schweizer Anfeuerungsmethode die geringsten VOC- und CO-Konzentrationen erreicht. Bei der guten Verbrennung liegt die CO-Konzentration immer höher als bei der Schweizer Methode, bis auf einen kurzen Zeitraum um die 20. Minute der Abbrandzeit.



Holzanordnung in kaltem Ofen
mit Anfeuerholz
und Anzündwürfel



Start Anzündvorgang



Anzündvorgang im weiteren Verlauf



Anbrand vom Buchenholz



Hauptverbrennung

Abbildung 5.1 Anordnung der Holzcharge in kaltem Kaminofen mit Anfeuerholz und Anzündwürfel, Anzündvorgang und Verbrennungsphasen bei der Schweizer Anfeuerungsmethode

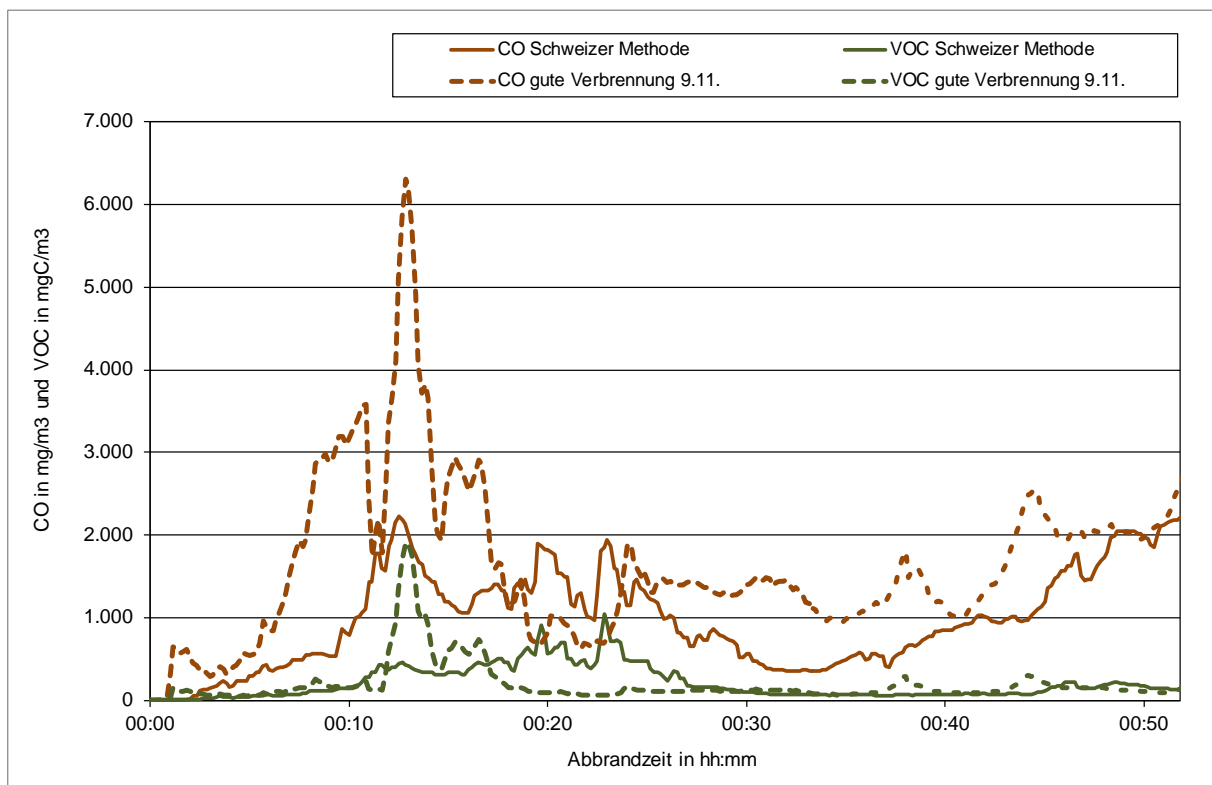
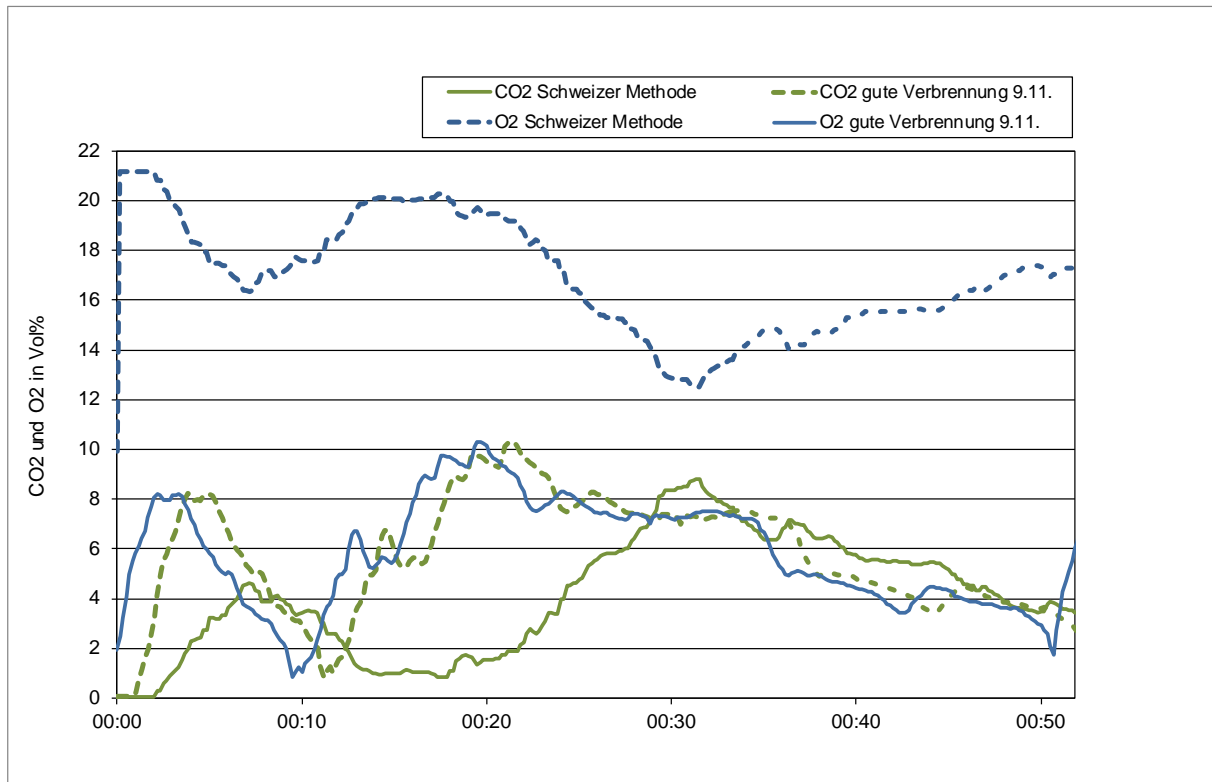


Abbildung 5.2 Verlauf der CO₂-, O₂-, CO- und VOC-Konzentrationen mit Buchenholz bei der Schweizer Anfeuerungsmethode vom 9.1.2012 im Vergleich zum Anzünden und ersten Chargenabbrand mit guter Verbrennung vom 9.11.11

In Tabelle 5.1 sind die Mittelwerte für CO₂, CO und VOC für die Schweizer Anfeuerungsmethode und den Buchenholzabbrand mit guten Verbrennungsbedingungen aufgelistet. Bei der guten Verbrennung wurden die angegebenen Mittelwerte über den Abbrandverlauf von 3,0 Vol%

CO₂ bis zum Erreichen dieser Konzentration im Ausbrand gebildet. Enthalten ist hierbei auch der Anzündvorgang mit Anfeuerholz. Bei der Schweizer Anfeuerungsmethode wurde ebenfalls vom Anbrennen ab einer CO₂-Konzentration von 3,0 Vol% bis zum Ausbrand und Erreichen derselben Konzentration gemittelt. Zeitlich liegen die Abbrände nach der Schweizer Methode und bei guter Verbrennung nur geringfügig auseinander, die Abbranddauer ist jeweils ähnlich.

Mit in der Tabelle enthalten sind die mittleren Konzentrationen des ersten Messtages mit guter Verbrennung Abbrand vom 25.10.2011. Hier lagen die CO-Konzentrationen niedriger als beim zweiten Versuchstag am 9.11.2011. Die mittleren VOC-Emissionen verhalten sich aber umgekehrt, sie sind beim zweiten Messtag geringer.

Tabelle 5.1 Mittelwerte VOC und CO über gesamten Abbrand bis Ausbrand bei 3,0% CO₂ (bei guter Verbrennung mit Anzündphase)

CO und VOC auf 13 Vol% O ₂ bezogen	Mittelwerte der Abbrände mit Buchenholz und guter Verbrennung (Anzünden und erster Chargenabbrand) und Schweizer Anfeuerungsmethode				
	CO ₂ in Vol%	O ₂ in Vol%	CO in mg/m ³	VOC in mgC/m ³	Abbranddauer
gute Verbrennung am 9.11.2011	5,8	15,0	2.171	262	00:51:30
gute Verbrennung 25.10.2011	5,1	15,8	1.741	415	00:51:40
Mittelwert gute Verbrennung	5,5	15,4	1.956	338	00:51:35
Schweizer Anbrand I 9.01.12	4,0	17,0	2.117	405	00:55:20
Schweizer Anbrand II 16.1.12	4,2	16,8	2.232	409	00:48:50
Mittelwert Schweizer Anfeuerungsmethode	4,1	16,9	2.174	407	00:52:05
Änderung zu Standardabbrand	76	110	111	120	101

Im Mittel sind bei den Abbränden nach der Schweizer Anfeuerungsmethode die CO₂-Konzentrationen etwas, was sich negativ auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad auswirkt. Aus sind die mittleren, auf 13 Vol% O₂ bezogenen, CO- und VOC-Konzentrationen bei der Schweizer Methode in der Tendenz höher als beim üblichen Chargenabbrand mit Aufgabe der Holzcharge auf eine vorhandene Grundglut.

Somit ergeben sich keine eindeutig positiven Erkenntnisse aus der Anwendung der Schweizer Anfeuerungsmethode im Vergleich zum herkömmlichen Chargenabbrand bei guten Verbrennungsbedingungen. Berücksichtigt werden muss hierbei aber, dass bei Entwicklung der Schweizer Methode eigentlich eine größere Auflage im Focus stand, die z.B. in Grundöfen und anderen Speichergeräten üblich sind. Die Vorteile durch Ausbleiben des Nachlegevorgangs und Bewahren des CO₂-Niveaus sowie der Feuerraumtemperatur über eine längere Dauer des Abbrandes kommen dann deutlicher zum Tragen als bei den geringen Holzaufgabemengen im Kaminofen.

6 Ergebnisse der PAK-Messungen

An dem auch für die Geruchsmessungen eingesetzten Kaminofen wurden an vier Messtagen (11.4 und 12.4.2012 sowie 16.4. und 17.4.2012) die Emissionen an PAK untersucht. Hierbei wurde zwischen den Betriebszuständen gute und schlechte Verbrennung unterschieden. Die unterschiedlichen Betriebszustände wurden über die Regelung der Verbrennungsluft entsprechend den Abbrandversuchen bei den Geruchsmessungen eingestellt. Bei beiden Betriebszuständen wurden die Anbrandphase und die Hauptverbrennungsphase untersucht. Als Brennstoff wurde bei allen Messungen trockenes Buchenholz eingesetzt, mit annähernd gleicher Masse (ca. 1,25 kg je Abbrand).

Um aufgrund der kurzen Probenahmedauern eine ausreichende Anreicherung der PAK zu gewährleisten, wurden die Probenahmen kumulierend (eine Gesamtprobe bestehend aus drei Einzelmessungen) durchgeführt, Schema zur kumulierenden Probenahme siehe beispielhaft für den 1. Messtag im Anhang in Abbildung 11.1).

Bei jedem Betriebszustand (gute und schlechte Verbrennung) wurden jeweils vier Messungen bei Anbrand und Hauptfeuerung durchgeführt. Aufgrund der kumulierenden Probenahmen (eine Messung bestehend aus drei Einzelmessungen) ergaben sich eine Gesamtzahl von 48 Einzel- bzw. 16 kumulierte Gesamtproben.

Ermittelt wurden folgende 17 PAK:

Naphthalin	NAP	Benzo(a)anthracen	BaA
Acenaphthylen	ACY	Chrysen	CHR
Acenaphthen	ACE	Benzo(b)fluoranthen	BbF
Fluoren	FLU	Benzo(j)fluoranthen	BjF
Phenanthren	PHE	Benzo(k)fluoranthen	BkF
Anthracen	ANT	Benzo(a)pyren	BaP
Fluoranthen	FLUA	Dibenzo(ah)anthracen	DBahA
Pyren	PYR	Indeno(1,2,3-cd)pyren	IND
		Benzo(ghi)perylen	BghiP

In Abbildung 6.1 sind die Mittelwerte der PAK-Konzentrationen bei 13 Vol% für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase bei den Abbränden mit trockenem Buchenholz und die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung dargestellt, die Einzelwerte der 16 PAK-Proben sind im Anhang in Tabelle 11.7 aufgelistet.

Sowohl im Anbrand als auch in der Hauptverbrennung nehmen die PAK-Konzentrationen bei einer Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen drastisch zu. Die Höhe der Zunahme hängt allerdings von der Verbrennungsphase und vom PAK ab.

Besonders stark steigen in beiden untersuchten Verbrennungsphasen Naphthalin an, sowie in der Anbrandphase Benzo(a)pyren, Dibenzo(ah)anthracen, Indeno(1,2,3-cd)pyren und Benzo(ghi)perylen. Das Verhältnis CO-, CO₂-, O₂-, VOC-, Staub- (orientierende Werte, siehe Kapitel 3.3.3) und PAK-Konzentrationen in der Anbrand- und Hauptverbrennungsphase für die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Bei einer Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen von guter zu schlechter Verbrennung nehmen die CO- und Staubkonzentrationen sowohl für die Anbrand- als auch für die Hauptverbrennungsphase in etwa um den Faktor 2 zu. Durch die reduzierte Verbrennungs-

Luftmenge steigt die CO₂-Konzentration in etwa um den Faktor 1,3 an, die O₂-Konzentration nimmt entsprechend ab.

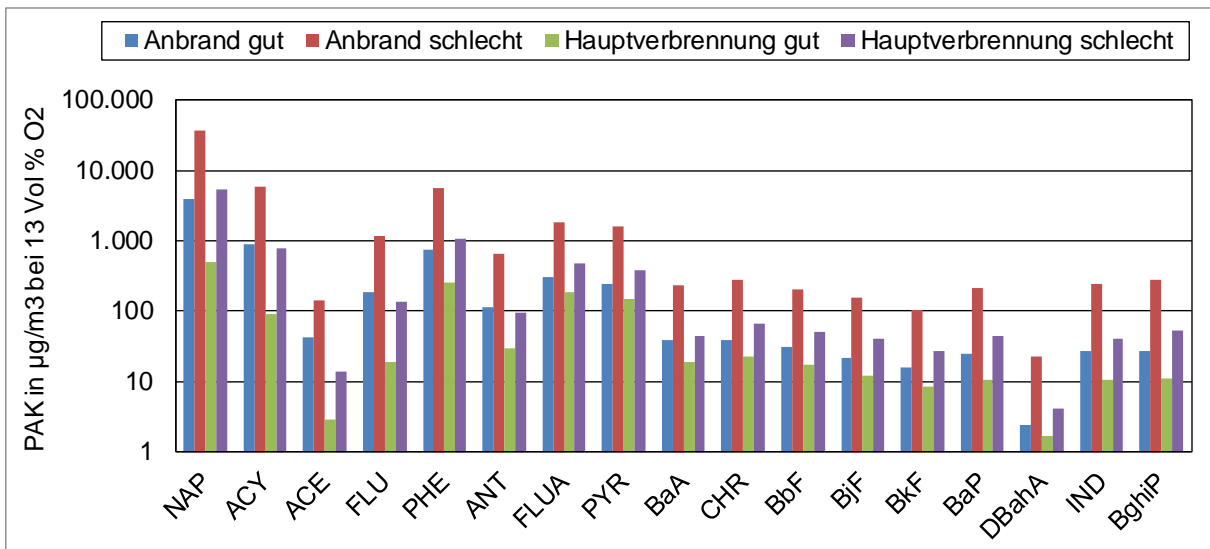


Abbildung 6.1 Mittelwerte der PAK-Konzentrationen bei 13 Vol% O₂ für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase bei den Abbränden mit trockenem Buchenholz und die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung

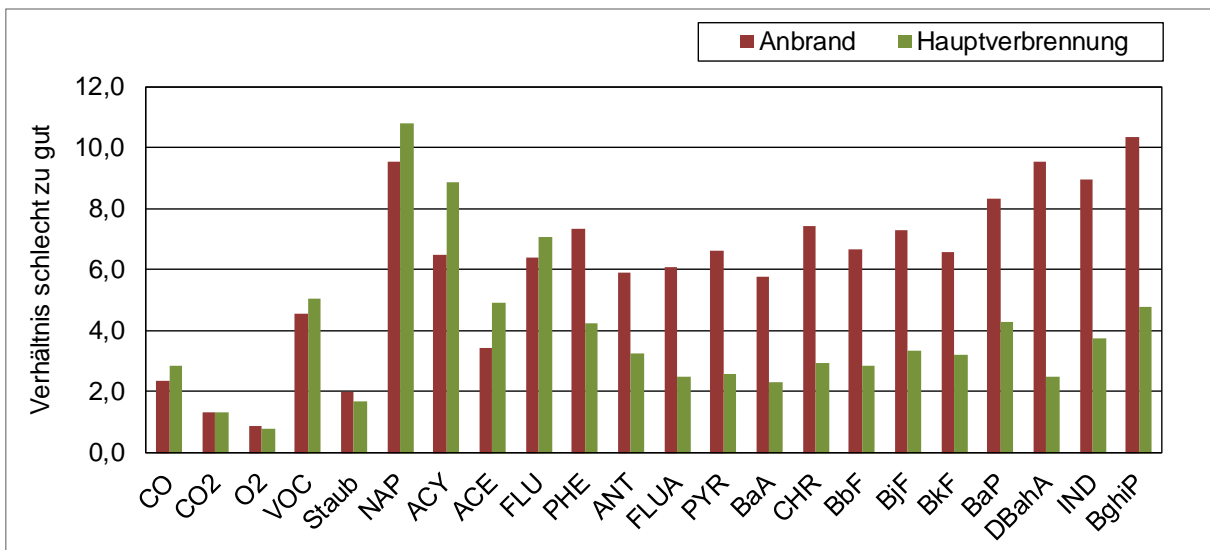


Abbildung 6.2 Verhältnis der Gas-, Staub- und PAK-Konzentrationen in der Anbrand- und Hauptverbrennungsphase für die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung (berechnet aus auf 13 Vol% O₂ bezogenen Konzentrationen, Staub: nur orientierende Werte)

Ein deutlicherer Anstieg ergibt sich bei der VOC-Konzentration, diese liegt bei schlechter Verbrennung sowohl im Anbrand als auch in der Hauptverbrennung um ca. den Faktor 5,1 höher. Am stärksten steigen die PAK-Konzentrationen bei einer Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen an. Die Höhe der Konzentrationszunahme hängt vom PAK und von der Verbrennungsphase ab.

Der Zusammenhang zwischen der CO-Konzentration und den Konzentrationen der Summe der 17 PAK, VOC und Staub (jeweils bei 13 Vol% O₂, Staub: orientierende Werte, siehe Kapitel 3.3.3) für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase bei den Abbränden mit trockenem Buchenholz und die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Die Summe der 17 PAK sowie VOC und Staub nehmen mit der CO-Konzentration zu. Allerdings steigt Staub mit der Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen nur moderat und im Anbrand und der Hautverbrennung ähnlich an. Die Summe der 17 PAK und VOC steigen bei schlechteren Verbrennungsbedingungen stärker und für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase auch unterschiedlich stark an. Den höchsten Anstieg weisen die Summe der PAK im Anbrand auf.

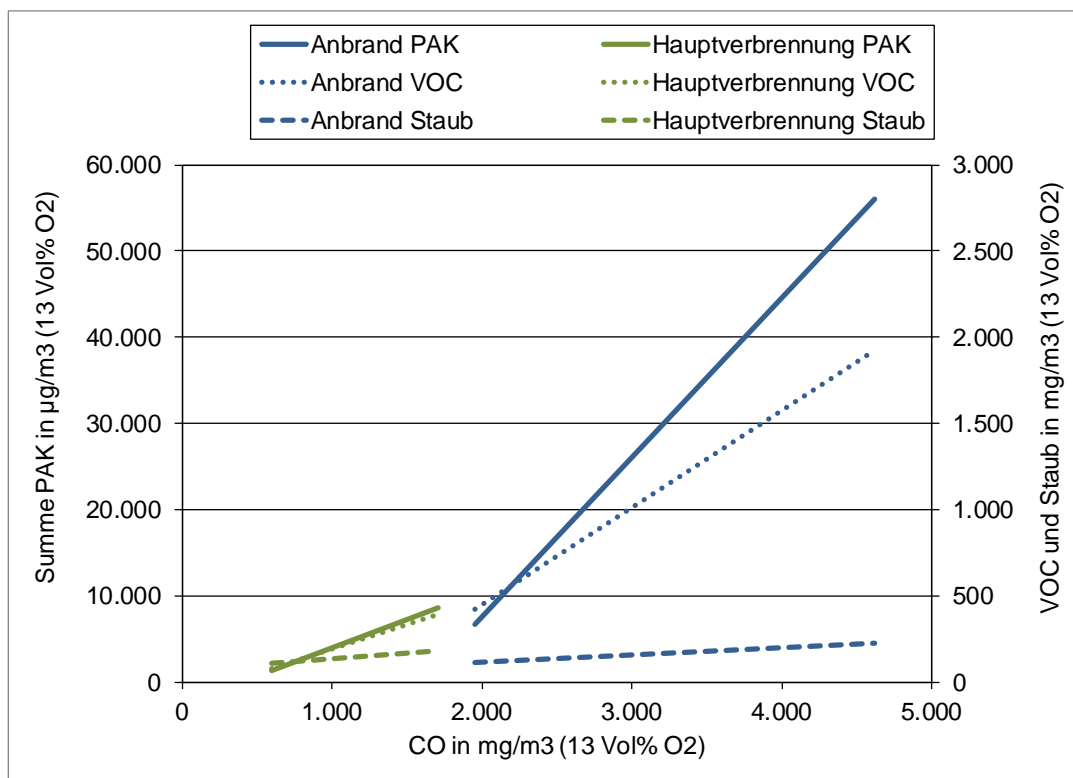


Abbildung 6.3 Summe PAK- sowie VOC- und Staub-Konzentration in Abhängigkeit der CO-Konzentration (jeweils bei 13 Vol% O₂) für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase bei den Abbränden mit trockenem Buchenholz und die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung (PAK: Summe der 17 analysierten PAK, Staub: nur orientierende Werte)

Der Zusammenhang zwischen der Konzentration an VOC und der Summe der 17 PAK (jeweils bei 13 Vol% O₂) für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase bei den Abbränden mit trockenem Buchenholz und die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die Konzentration der Summe der 17 PAK nimmt sowohl in der Anbrand- als auch in der Hauptverbrennung mit der VOC-Konzentration zu, wobei bei ähnlichen VOC-Konzentrationen (höchste Werte bei der Hauptverbrennung und niedrigste Werte beim Anbrand) auch vergleichbare PAK-Summenkonzentrationen ermittelt werden.

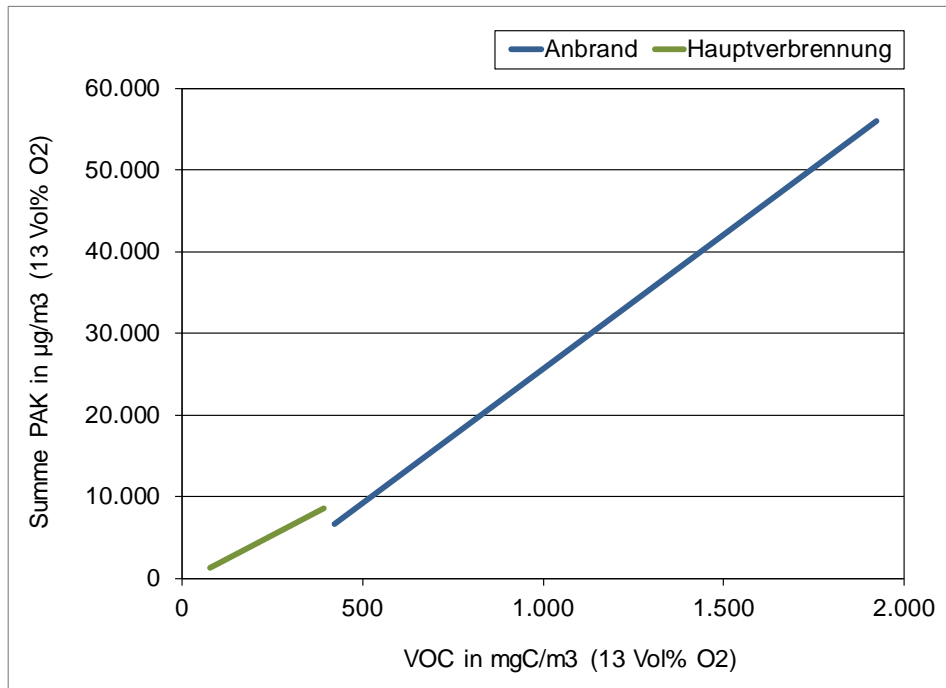


Abbildung 6.4 Summe PAK in Abhängigkeit der VOC-Konzentration (jeweils bei 13 Vol% O₂) für die Anbrand- und Hauptverbrennungsphase bei den Abbränden mit trockenem Buchenholz und die Betriebszustände gute und schlechte Verbrennung (PAK: Summe der 17 analysierten PAK)

Ein Vergleich der Probenahmedauern und der Mittelwerte für die O₂-, CO- und VOC-Konzentrationen für die Abbrandversuche mit trockenem Buchenholz bei guter und schlechter Verbrennung bei den PAK- und Geruchsmessungen zeigt Tabelle 6.1. Aufgrund der kumulierenden Probenahmen bei den PAK-Messungen musste die Probenahmeapparatur nach der Probenahme in der entsprechenden Verbrennungsphase jeweils gewechselt werden. Hierdurch ergaben sich z.T. Verschiebungen beim Beginn der Probenahme und bei der Probenahmedauer.

An den O₂-Mittelwerten ist erkennbar, dass im Anbrand bei guter Verbrennung die PAK-Messungen in der Tendenz etwas später gestartet und damit ein etwas höherer Anteil der Hauptverbrennungsphase mit erfasst wurden, wodurch sich geringere CO- und VOC-Konzentrationen gegenüber den vergleichbaren Geruchsmessungen ergeben. Bei schlechter Verbrennung wurden in der Tendenz die PAK-Messungen in der Anbrandphase etwas früher gestartet, wodurch sich höhere Konzentrationen an O₂, CO (nur geringfügig) und VOC ergaben.

Durch den Wechsel der Probenahmeapparatur nach der PAK-Probenahme im Anbrand konnte die Probenahme in der Hauptverbrennung, im Vergleich zu den Geruchsmessungen, erst etwas später gestartet werden. Hierdurch sind die mittleren O₂-Konzentrationen bei den PAK-Messungen in der Hauptverbrennungsphase für beide untersuchten Betriebszustände höher und die CO- und VOC-Konzentrationen geringer als bei den vergleichbaren Geruchsmessungen. Sowohl bei den PAK- als auch bei den Geruchsmessungen liegt bei den Probenahmen in der Hauptverbrennungsphase bei guter und schlechter Verbrennung keine Überlappung mit der Anbrand- oder Ausbrandphase vor, allerdings wurden etwas unterschiedliche Bereiche der Hauptverbrennungsphase erfasst.

Tabelle 6.1 Vergleich der Probenahmedauern und der Mittelwerte für die O₂-, CO- und VOC-Konzentrationen für die Abbrandversuche mit trockenem Buchenholz bei guter und schlechter Verbrennung bei den PAK- und Geruchsmessungen (PAK- und Geruchsmessungen: unterschiedliche Versuchsreihen)

Versuche	Betriebszustand	Anbrand	Hauptverbrennung	Probenahmedauer	O ₂	CO	VOC *
					[Vol%]	[mg/m ³]	[mgC/m ³]
PAK	gut	X		03:11	13,3	1.880	406
Geruch				03:00	13,7	4.309	975
PAK			X	05:11	12,8	611	79
Geruch				06:00	9,7	1.483	147
PAK	schlecht	X		03:00	11,4	5.562	2.316
Geruch				03:00	10,4	5.442	764
PAK			X	04:56	9,9	2.368	545
Geruch				06:00	6,9	6.621	840

* bezogen auf feuchtes Abgas

7 Ergebnisse der Sensormessungen

In dem Projekt wurden orientierend Messungen mit Sensoren während den Abbrandversuchen für die Geruchsmessungen durchgeführt. Eingesetzte wurden je 2 neuartige LSM-Sensorelemente und zwei herkömmlichen Sensorelemente vom Typ CarboSen 1000 mit Deckschicht (CS1000DS). Die Sensoren messen gasförmige Produkte unvollständiger Verbrennung (z.B. CO und VOC) und wurden jeweils bei unterschiedlichen Temperaturen betrieben, die durch den Temperaturfaktor T_f ($T_f = 2,35$ niedrigere Betriebstemperatur und $T_f = 2,7$ höhere Betriebstemperatur) gekennzeichnet ist. Weitere Details sind in Struschka et al. [2012] enthalten. Letztlich sollte untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Geruchsemission erkennbar ist. In Tabelle 3.5 ist aufgeführt, an welchen Messtagen die Sensoren im Einsatz waren.

Bei den Versuchen mit Geruchsprobenahme traten, vor allem bei schlechten und sehr schlechten Verbrennungsbedingungen in Phasen Anzünden, Anbrand und Ausbrand hohe bis sehr hohe Konzentrationen von Produkte unvollständiger Verbrennung (VOC und CO) sowie Geruchemissionen auf, wodurch der nominelle Messbereich der LSM-Sensoren überschritten wurde (siehe hierzu auch Struschka et al. [2012]). Das führt dazu, dass zur Gegenüberstellung von Sensorsignalen und Geruchsstoffkonzentrationen nur die Geruchsproben der Hauptverbrennungsphase herangezogen werden können. Trotzdem sind auch hier oft einige Lücken aufgrund von Messbereichsüberschreitungen beim LSM-Sensor oder durch Sensorausfälle vorhanden, so dass in diesen Fällen eine direkte Korrelation von Geruchsstoffkonzentration und Sensor Spannungsmittelwert über die Probenahmedauer der Geruchsprobe von 6 Minuten nicht möglich ist. Während der kurzen Einsatzdauer der LSM-Sensoren haben diese rapide an Empfindlichkeit verloren, vor allem nachdem die ersten Abbrände mit schlechten Verbrennungsbedingungen durchgeführt wurden.

In Abbildung 7.1 sind die Verläufe der LSM- und CS1000DS-Sensorsignale sowie der CO-Konzentration für den ersten Messtag am 25.10.2011 mit den Abbrandversuchen bei guter Verbrennung mit trockenem Buchenholz dargestellt. Man erkennt, dass die LSM-Sensoren in der Tendenz den CO-Konzentrationen folgen. Allerdings reagiert dieser Sensor z.T. auch sehr empfindlich auf gewisse organische Verbindungen, weshalb gewisse Abweichungen zum Verlauf der CO-Konzentration plausibel sein könnten.

Die CarboSen 1000 mit Deckschicht (CS1000DS) folgen der CO-Konzentration gut, sowohl was die Spitzenwerte als auch geringe Konzentrationen betrifft.

Bereits am 2. Messtag mit guter Verbrennung begannen die Sensorausfälle beim LSM-Sensor und nahmen dann mit schlechter werdenden Verbrennungsbedingungen zu (die Sensoren waren allerdings für ca. 7 Messtage bereits in Vorversuchen im Einsatz). Besonders der kälter betriebene Sensor ($T_f = 2,35$) neigte zu Ausfällen. Abbildung 7.2 zeigt die Verläufe der LSM- und CS1000DS-Sensorsignale sowie der CO-Konzentration für den zweiten Messtag am 9.11.2011 mit guter Verbrennung mit trockenem Buchenholz.

In den ersten vier Proben während der Hauptverbrennungsphase am ersten und zweiten Messtag liegt der Verlauf der Signalspannung des kälteren Sensors immer über dem des heißer betriebenen Sensors. Beide Verläufe haben in etwa die gleiche Tendenz, fällt das Sensorsignal des heißer betriebenen Sensors, so sinkt auch das des kälter betriebenen Sensors.

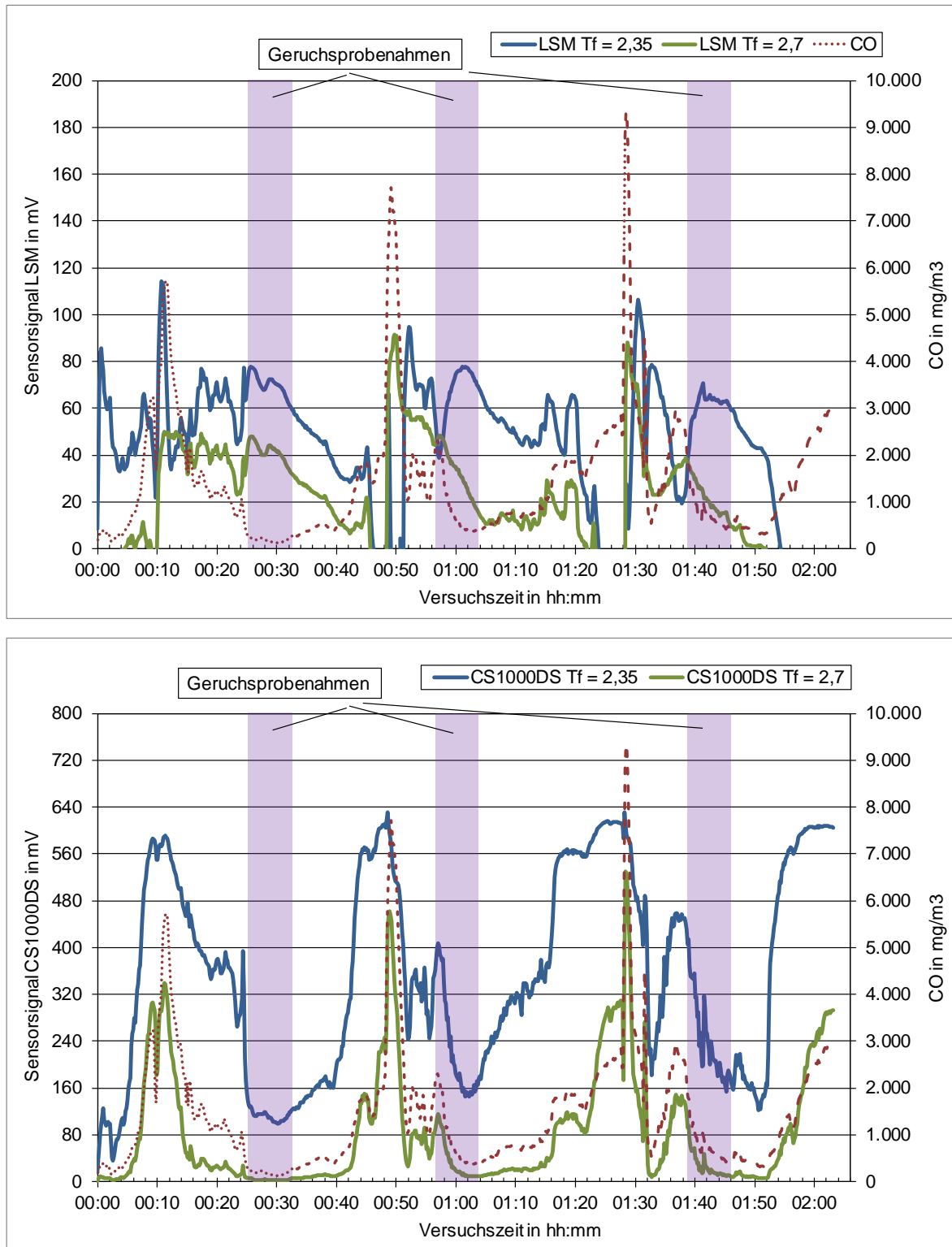


Abbildung 7.1 Verlauf der LSM- (oben) und CS1000DS- (unten) Sensorsignale sowie der CO-Konzentration für den ersten Messtag am 25.10.2011, gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz

Bei Berücksichtigung der VOC-Konzentration im Abgas (in den Abbildungen nicht dargestellt) könnte in der Tendenz gefolgert werden, dass der kälter betriebene LSM-Sensor eher der CO-Konzentration und der wärmer betriebene Sensor eher der VOC-Konzentration folgt.

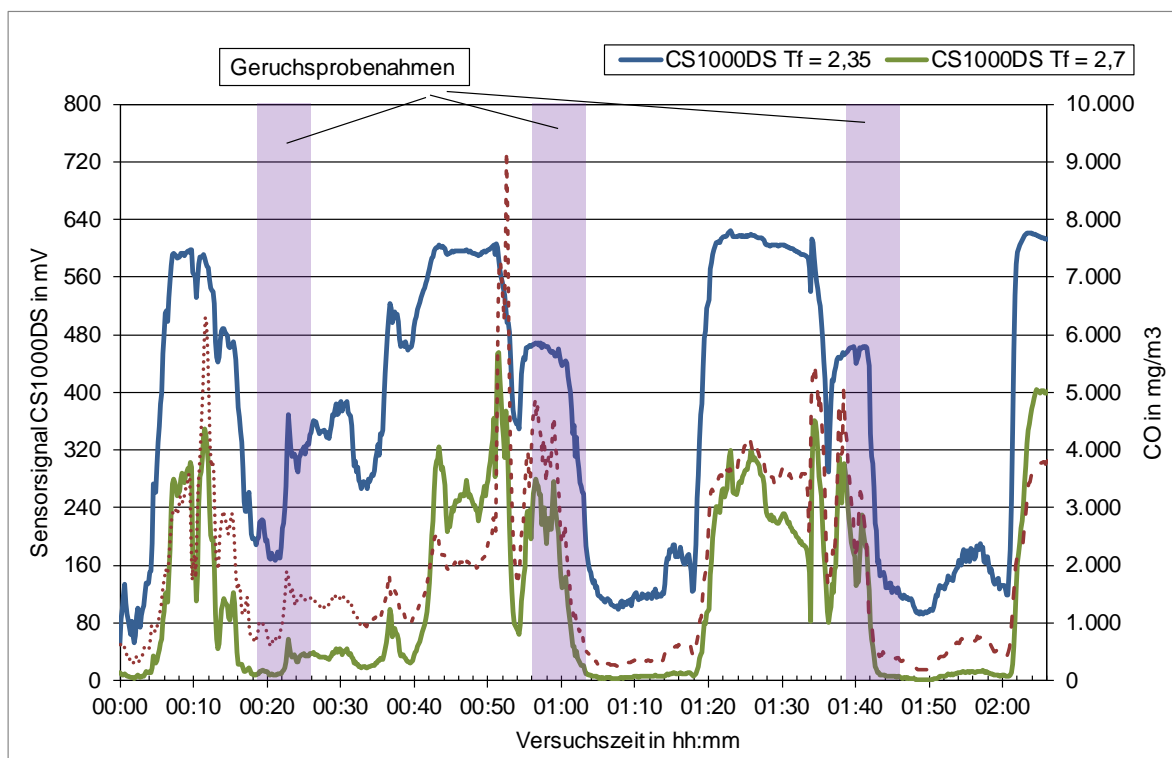
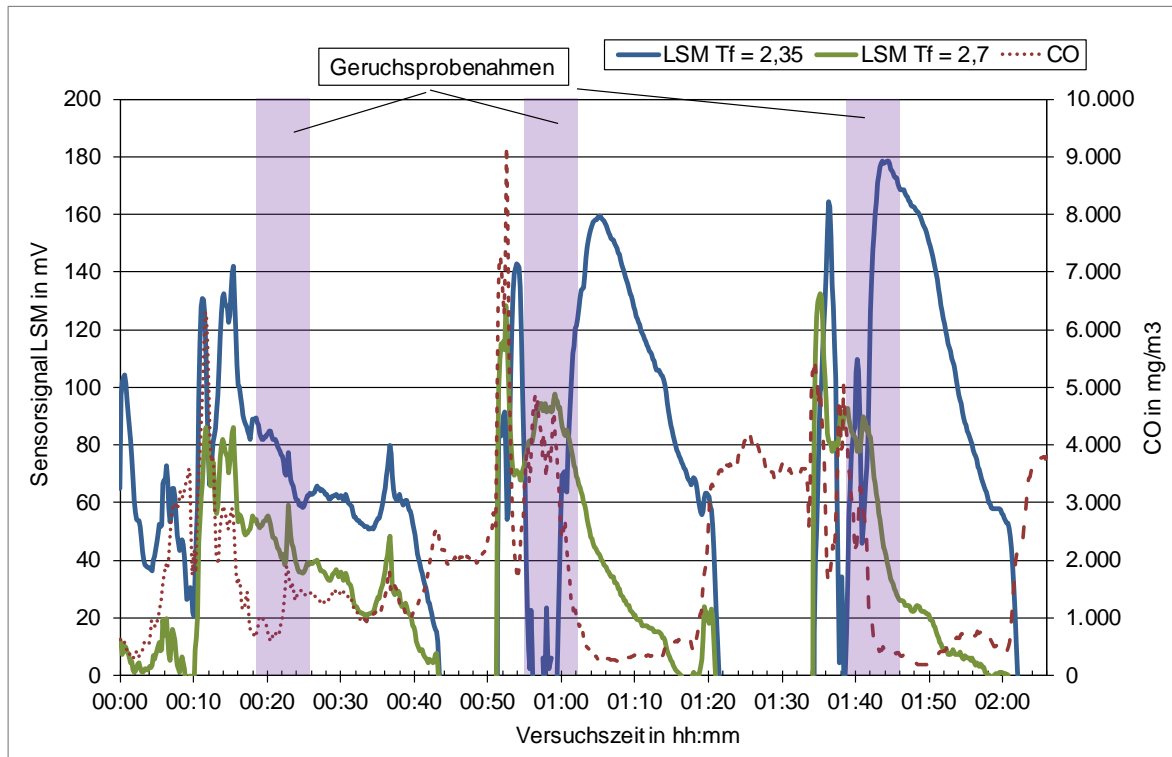


Abbildung 7.2 Verlauf der LSM- (oben) und CS1000DS- (unten) Sensorsignale sowie der CO-Konzentration für den zweiten Messtag am 9.11.2011, gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz

Dabei fällt das Sensorsignal des kälter betriebenen LSM-Sensors mit steigender CO-Konzentration und das Sensorsignal des wärmer betriebenen Sensors steigt mit steigender VOC-Konzentration. Sehr ausgeprägt und gut reproduzierbar sind diese Effekte allerdings nicht. Im Ausbrand bei vergleichsweise geringen VOC-Konzentrationen und mittleren CO-

Konzentrationen liegt das LSM-Sensorsignal meist außerhalb des nominellen Messbereichs, obwohl beide Sensoren in anderen Verbrennungszuständen bei höheren CO-Konzentrationen und gleichzeitig vorhandenen etwas höheren VOC-Konzentrationen noch innerhalb des Messbereiches liegen.

Tabelle 7.1 zeigt die Mittelwerte der Sensorsignale und die ermittelten Geruchsstoffkonzentrationen für die Probenahmen in der Hauptverbrennungsphase am ersten und zweiten Messstag. Die Daten der übrigen Messtage sind aufgrund der weiter zunehmenden Ausfälle und der zunehmenden Unempfindlichkeit der LSM-Sensoren noch weniger aussagekräftig und werden deshalb hier zahlenmäßig nicht einzeln aufgeführt.

Tabelle 7.1 Mittelwerte der Sensorsignale und ermittelte Geruchsstoffkonzentrationen für die Probenahmen in der Hauptverbrennungsphase am ersten und zweiten Messtag

Messung	LSM Tf = 2,35 [mV]	LSM Tf = 2,7 [mV]	CS1000DS Tf = 2,35 [mV]	CS1000DS Tf = 2,35 [mV]	Geruch [GE/m ³]
Messtag 25.10.2011, gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz					
1	70	42	111	4	14.416
2	63	41	276	54	24.005
3	60	24	265	33	11.508
Messtag 9.11.2011, gute Verbrennung mit trockenem Buchenholz					
1	81	50	217	15	17.225
2		88	438	183	11.017
3		79	384	154	14.237

In Abbildung 7.3 sind die LSM- und CS1000DS-Sensorsignale in Abhängigkeit von der Geruchsstoffkonzentration für die Hauptverbrennung bei den Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung (Messtage 25.10., 9.11., 10.11., 16.11., 22.11. und 23.11.2011) dargestellt.

Für die LSM-Sensoren ist keine Abhängigkeit des Sensorsignals von der Geruchsstoffkonzentration in der Hauptverbrennungsphase erkennbar. Auch für die Sensoren CarboSen 1000 mit Deckschicht (CS1000DS) ist der Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Geruchsstoffkonzentration nicht sehr gut zu erkennen. Es zeigt sich aber eine gewisse Tendenz, dass mit zunehmender Geruchsstoffkonzentration auch die Sensorsignale ansteigen.

In Abbildung 7.4 sind die CS1000DS-Sensorsignale in Abhängigkeit der VOC-Konzentration für die Anbrandphase bei den Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung (Messtage 25.10., 9.11., 10.11., 16.11., 22.11. und 23.11.2011) sowie deren Trendlinien dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Empfindlichkeiten beim kälter bzw. wärmer betriebenen Sensor ergeben sich auch deutliche Unterschiede im Zusammenhang zwischen Sensorsignal und VOC-Konzentration und damit bei den dargestellten Bestimmtheitsmaßen der Trendlinien. Beim wärmer betriebenen CS1000DS-Sensor (Tf = 2,7) steigt mit zunehmender VOC-Konzentration auch das Sensorsignal merklich an.

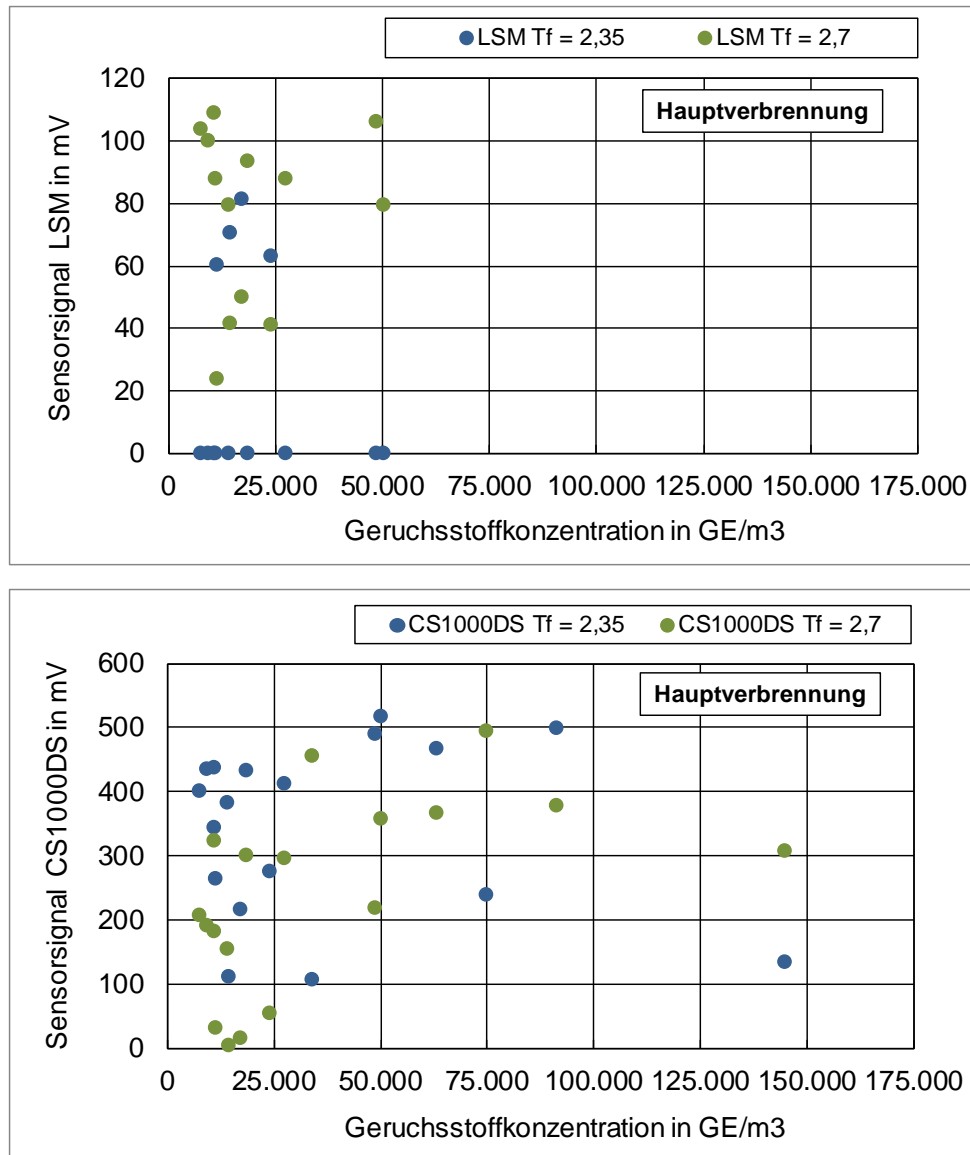


Abbildung 7.3 LSM- (oben) und CS1000DS- (unten) Sensorsignale in Abhängigkeit der Geruchsstoffkonzentration für die Hauptverbrennung bei Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung (Messtage 25.10., 9.11., 10.11., 16.11., 22.11. und 23.11.2011)

Abbildung 7.5 zeigt die VOC-Konzentrationen und CS1000DS-Sensorsignale in Abhängigkeit der Geruchsstoffkonzentration sowie deren Trendlinien mit Bestimmtheitsmaß für den Anbrand bei Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung.

Auch in dieser Darstellung zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Sensorsignalen und Geruchsstoffkonzentration, wobei sich hier, im Gegensatz zu Abbildung 7.4, beim kälter betriebenen Sensor ein besseres Bestimmtheitsmaß und eine vergleichbare Empfindlichkeit im Vergleich zum wärmer betriebenen Sensor ergeben. Damit besteht für den kälter betriebenen CS1000DS-Sensor ein besserer Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Geruchsstoffkonzentration als zwischen Sensorsignal und VOC- (siehe Abbildung 7.4) bzw. CO- oder Summe von CO und VOC-Konzentration (siehe Abbildung 7.6).

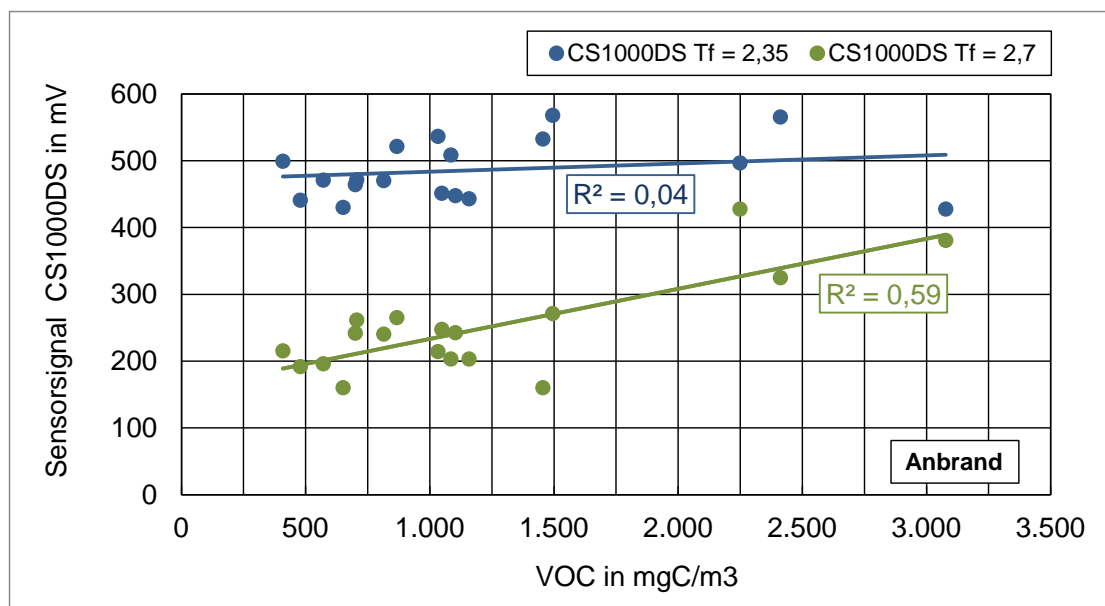


Abbildung 7.4 CS1000DS-Sensorsignale in Abhängigkeit der VOC-Konzentration für den Anbrand bei Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung sowie Trendlinien mit Bestimmtheitsmaß für die-Sensorsignale (Messtage 25.10., 9.11., 10.11., 16.11., 22.11. und 23.11.2011)

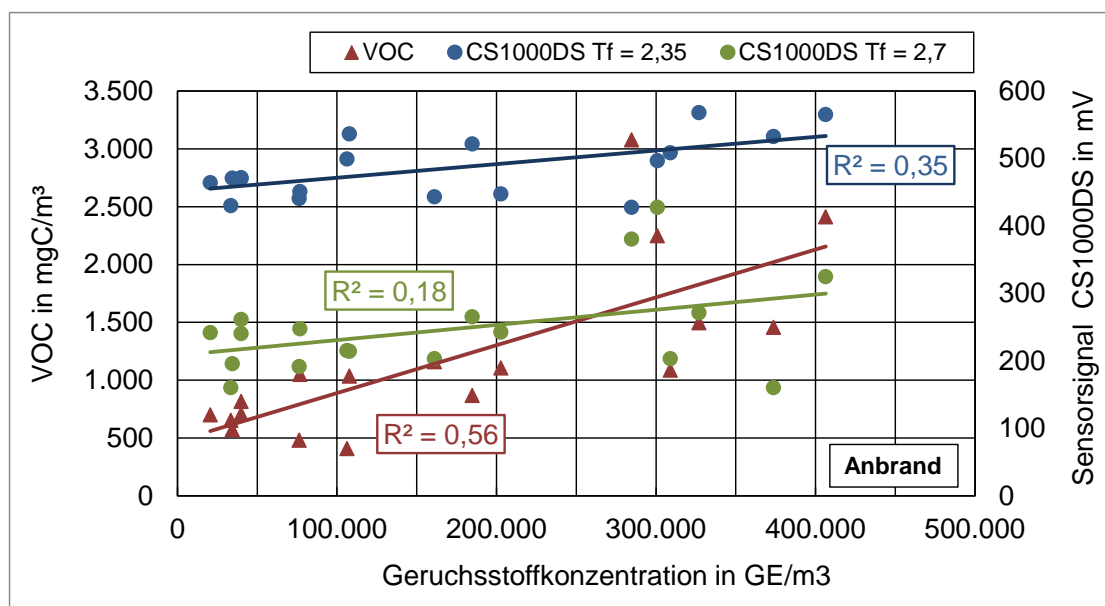


Abbildung 7.5 VOC-Konzentrationen und CS1000DS-Sensorsignale in Abhängigkeit der Geruchsstoffkonzentration sowie Trendlinien mit Bestimmtheitsmaß für den Anbrand bei Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung (Messtage 25.10., 9.11., 10.11., 16.11., 22.11. und 23.11.2011)

Beim wärmer betriebenen CS1000DS-Sensor liegt für alle aufgeführten Zusammenhänge ein vergleichsweise hohes Bestimmtheitsmaß vor, welches für die Summe der CO- und VOC-Konzentration, entsprechend der Funktionsweise des Sensors zur Messung gasförmiger Produkte unvollständiger Verbrennung, am höchsten ist.

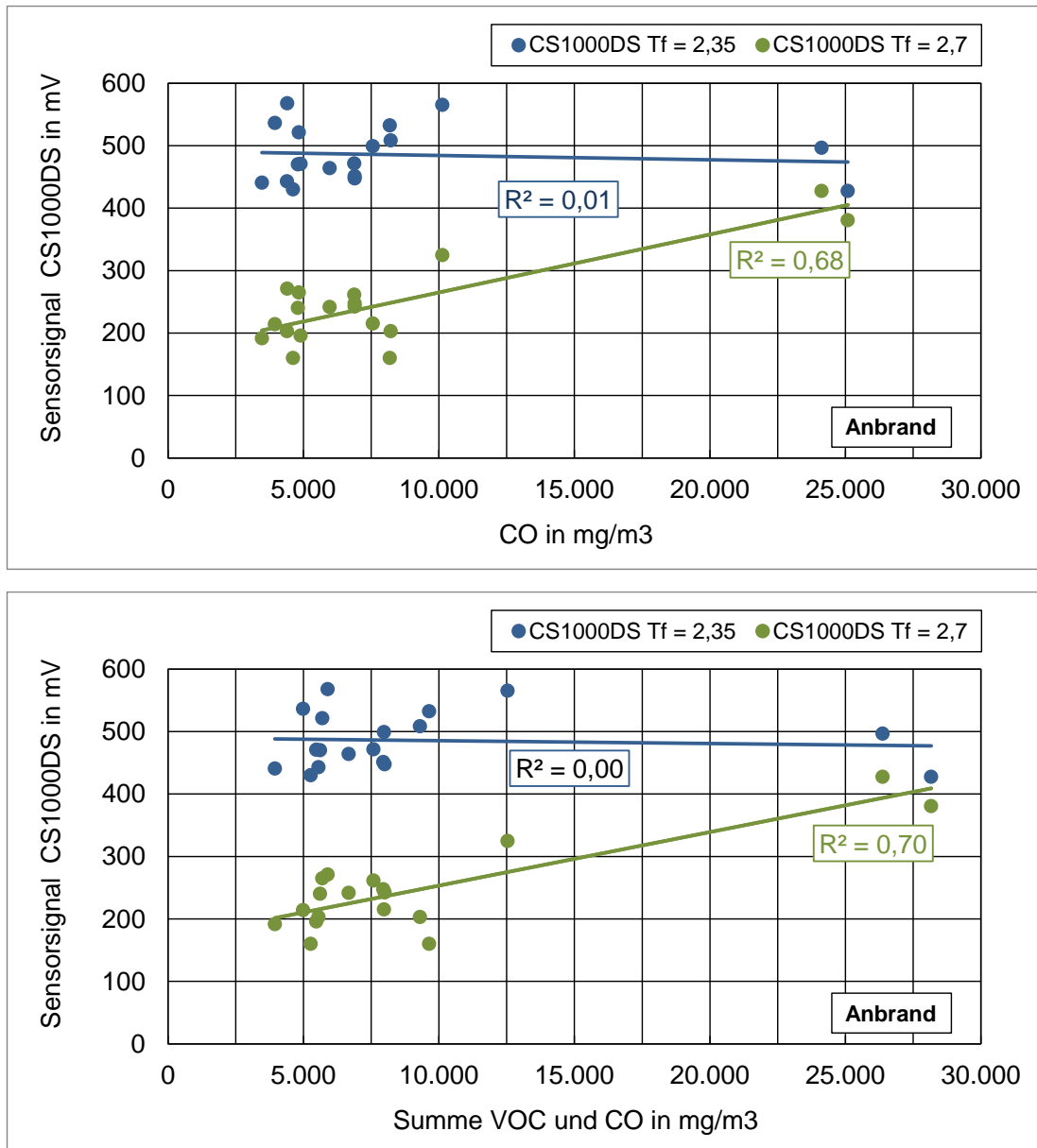


Abbildung 7.6 CS1000DS-Sensorsignale in Abhängigkeit der CO-Konzentration (oben) sowie der Summe CO- und VOC-Konzentration (unten) für den Anbrand bei Abbrandversuchen mit trockenem Buchenholz mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung mit Trendlinien und Bestimmtheitsmaß (Messtage 25.10., 9.11., 10.11., 16.11., 22.11. und 23.11.2011)

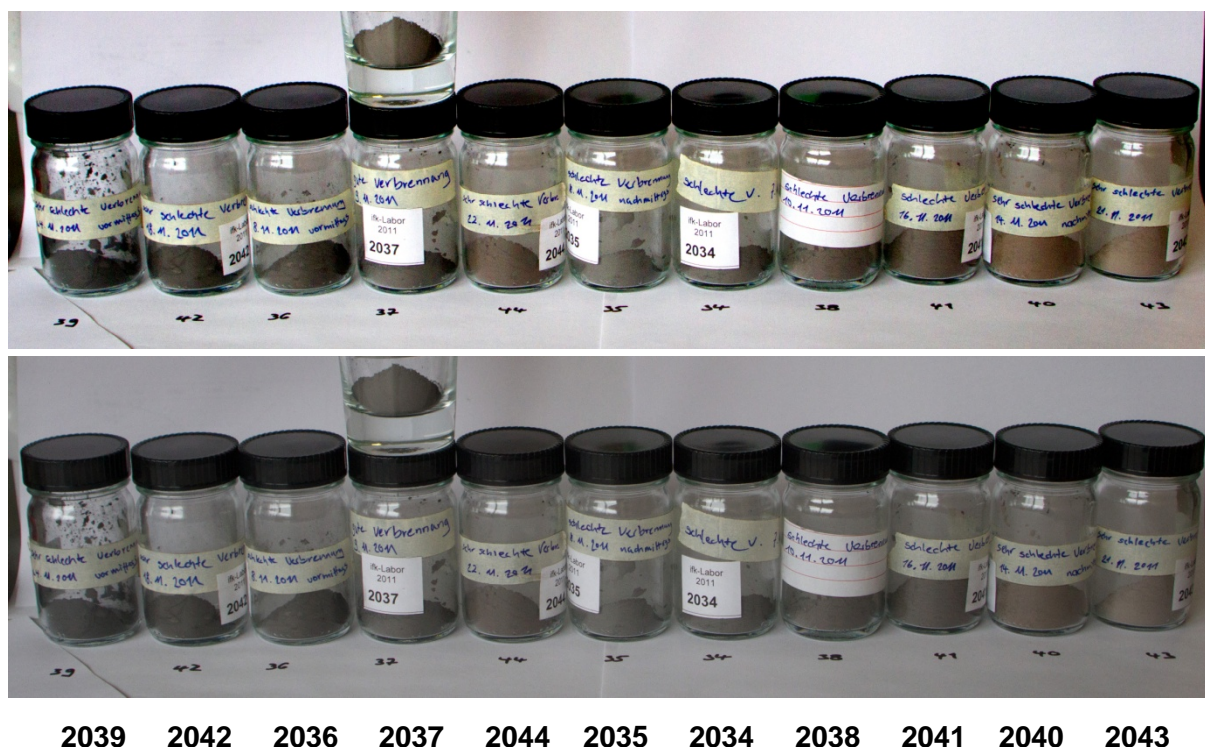
Zusammenfassend lässt sich folgern, dass beim CS1000DS-Sensor ein gewisser und beim LSM-Sensor kein funktionaler Zusammenhang von Sensorsignal und Geruchsstoffkonzentration erkennbar ist. Beim LSM-Sensor nehmen die Signalausfälle mit der Einsatzdauer schnell zu und der kälter betriebene LSM-Sensor ist früher und stärker störanfällig, dieser liefert allerdings etwas plausiblere Signale (im Vergleich zu CO und VOC).

8 Ergebnisse der Ascheanalysen

Asche ist ein fester Rückstand aus der Verbrennung organischen Materials und besteht vor allem aus Oxiden und (Bi-)Karbonaten diverser Metalle, z. B. Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , P_2O_5 , K_2O , SiO_2 . Die Verbrennungsrückstände verlassen mit dem Abgasstrom z.T. den Feuerraum, der überwiegende Teil verbleibt nach dem Abbrand auf dem Rost oder fällt durch diesen in den Aschekasten. Ob aus der Zusammensetzung der Rostasche auf die Verbrennungsgüte geschlossen werden kann, sollte durch die Ergebnisse von Ascheanalysen geklärt werden.

Deshalb wurden zwölf Ascheproben nach Buchenholzabbränden unter guten, schlechten und sehr schlechten Verbrennungsbedingungen entnommen und im IFK-Brennstofflabor auf die Gehalte an Wasser, Asche, flüchtige Stoffe, die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel sowie die Aschehauptbestandteile untersucht. Zu erwarten wäre, dass unter guten Abbrandbedingungen (hohe Temperaturen im Feuerraum mit ausreichender Verbrennungsluft) die Aschen einen hohen Anteil anorganischer Bestandteile und nur noch geringe Kohlenstoffanteile aufweisen, wodurch sich helle Aschen ergeben.

Bei den Ascheproben handelt es sich um Verbrennungsrückstände mit einer körnigen, pulverigen Struktur. Für die gute Verbrennung lag nur eine Ascheprobe vor, für die schlechte Verbrennung vier und für die sehr schlechte Verbrennung sieben Proben. Die visuelle Beurteilung der Ascheproben kann anhand von Abbildung 8.1 vorgenommen werden.



2037 - gute Verbrennung

2034, 2035, 2036, 2038 - schlechte Verbrennung

2033, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044 - sehr schlechte Verbrennung

Abbildung 8.1 Ascheproben aus den Verbrennungsversuchen mit Probennummer zur visuellen Beurteilung mit unterschiedlichem Kontrast

Von links nach rechts werden die Aschen heller, Probe 2043 ist dabei die hellste (sehr schlechte Verbrennung). Die gute Verbrennung (Probe 2037) befindet sich im dunkleren Drittel. Die schlechten Verbrennungen 2034-2036 und 2038 befinden sich im mittleren Drittel. Die dunkelste Probe (2039) ist eine Probe, die nach Abbränden unter sehr schlechten Verbrennungsbedingungen entnommen wurde.

In der kontrastreicheren Abbildung 8.1 (oben) fallen die Proben 2040 und 2044 noch durch ihre bräunliche Färbung auf. Beide Proben wurden nach Abbränden mit sehr schlechten Verbrennungsbedingungen entnommen, die gekennzeichnet sind durch örtlichen Sauerstoffmangel im Feuerraum und einem sehr flachen Anstieg der Feuerraumtemperatur.

Abbildung 8.2 zeigt die Mittelwerte für die Ergebnisse der Ascheanalysen für Kohlenstoff, Kalziumoxid, Kaliumoxid, Wasserstoff sowie Kohlenstoff (gesamt, organisch und anorganisch) der Betriebszustände gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz. Die Einzelergebnisse der durchgeführten Ascheanalysen finden sich im Anhang in Tabelle 11.8.

Für die dargestellten Komponenten sind gewisse Zusammenhänge zu den Betriebszuständen erkennbar. So nimmt der Anteil von Kohlenstoff und Kaliumoxid in den Aschen etwas zu, wenn sich die Verbrennungsbedingungen verschlechtern, dagegen nimmt der Kalziumoxidanteil ab.

Die Verbrennungsbedingungen wirken sich merklicher auf den Wasserstoffanteil in den Aschen aus. Mit zunehmender Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen steigt der Wasserstoffanteil an. Dies gilt zum Teil auch für die Anteile von Kohlenstoff gesamt und Kohlenstoff organisch, der von der guten Verbrennung zur schlechten Verbrennung ansteigt, dann allerdings bei der sehr schlechten Verbrennung in etwa konstant bleibt. Der anorganische Anteil von Kohlenstoff in den Aschen ist für alle Betriebszustände ungefähr konstant.

Durch die Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen nimmt der Brennstoffumsatz deutlich von ca. 1,9 kg/h bei guter Verbrennung auf ca. 1,2 kg/h ab. Hierdurch verlängert sich die Abbrandzeit und die Temperaturen im Abgas und im Feuerraum gehen zurück. Durch die abnehmende Temperatur im Feuerraum wird die thermische Zersetzung des Holzes verlangsamt und läuft auch nicht mehr ganz vollständig ab, wodurch sich die höheren Anteile von Kohlenstoff und Wasserstoff in den Aschen mit ungünstigen Verbrennungsbedingungen erklären lassen.

Durch die geringeren Temperaturen im Bereich der Holzaufgabe und in der Holzglut bei schlechten Verbrennungsbedingungen wird auch weniger Kalium während des Abbrandes freigesetzt, so dass die Kaliumkonzentration in der Asche bei schlechten Verbrennungsbedingungen etwas zunimmt.

Insgesamt wird durch die Analysenergebnisse deutlich, dass man bei dem eingesetzten Kaminofen allenfalls grob in der Tendenz von der Aschezusammensetzung auf die Verbrennungsqualität schließen kann. Genauere Rückschlüsse, z.B. dahingehend, dass Annahmen über gewisse Konzentrationsbereiche für CO oder VOC getroffen werden, die bei den Abbränden erreicht wurden, sind nicht möglich.

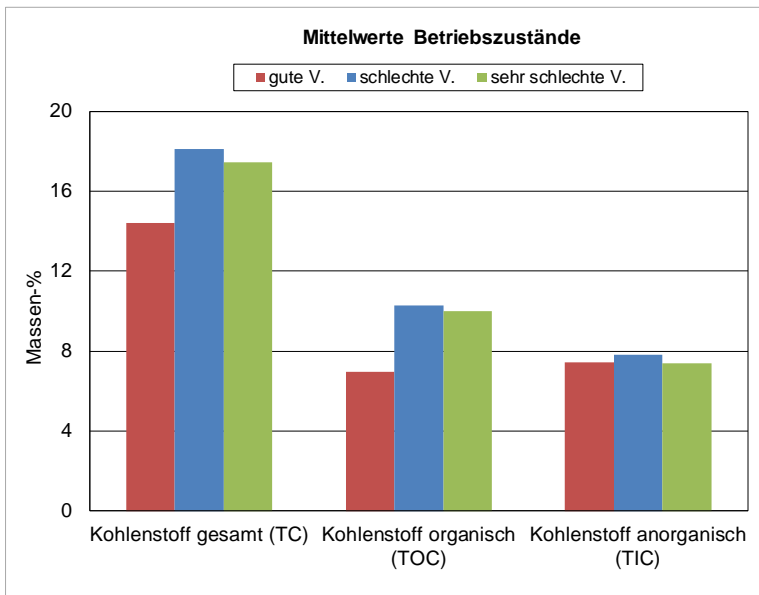
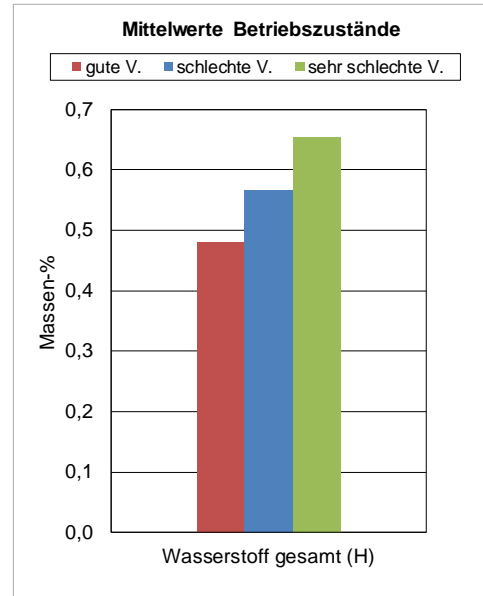
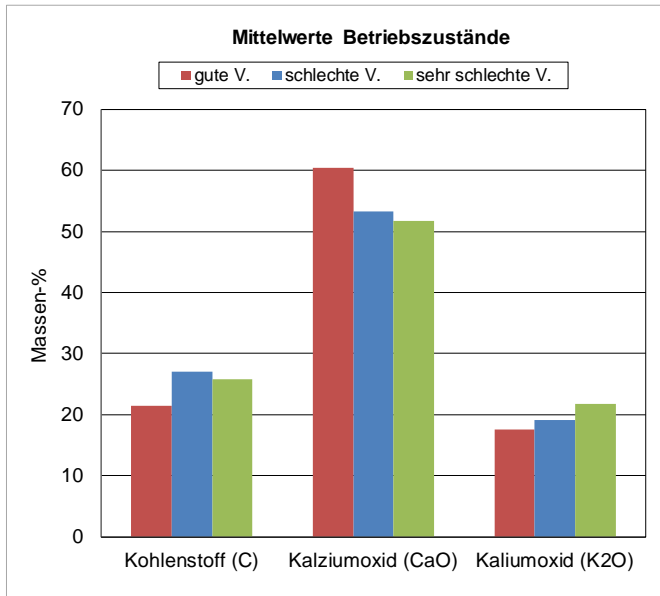


Abbildung 8.2

Mittelwerte der Ascheanalysen für ausgewählte Komponenten der Betriebszustände gute, schlechte und sehr schlechte Verbrennung mit trockenem Buchenholz

9 Zusammenfassung

In den letzten Jahren ergab sich bei Einzelraumfeuerstätten, vor allem bei Kaminöfen, die oft nachträglich in Wohnungen und Häuser eingebaut werden, eine deutliche Zunahme der Bestandszahlen. Dieser vermehrte Einsatz von Holzfeuerungen führt häufig zu flächenhaften Geruchsbelästigungen in der Umgebung, wodurch sich Nachbarschaftsbeschwerden ergeben können, die nicht selten vor Gericht enden.

Da bisher nur wenige Untersuchungen über Geruchsemissionen aus Einzelfeuerstätten vorliegen, wurden in diesem Projekt Geruchsmessungen an einem Kaminofen bei den 3 Betriebszuständen guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung vorgenommen. Innerhalb eines Betriebszustands erfolgten Geruchsmessungen jeweils beim Anzündvorgang bei kaltem Kaminofen und feinem Holz sowie bei 3 aufeinander folgenden Abbränden. Innerhalb eines Chargenabbrandes wurden die Geruchsstoffkonzentrationen beim Anbrandvorgang, während der Hauptverbrennungsphase und in der Ausbrandphase ermittelt. Eingesetzt wurde trockenes und nasses Buchenscheitholz sowie trockenes Tannenholz.

Wichtige Fortschritte in diesem Projekt wurden bei der Systematik zur Untersuchung von Geruchsemissionen bei diesen Feuerungen erzielt. So wurden erstmals Geruchproben mit kurzen Probenahmeintervalle von 3 bzw. 6 Minuten entnommen, die zum einen den Abbrandverlauf bei diesen Feuerungen deutlich besser wiedergeben und zum anderen aussagekräftiger für die Bewertung sind, ob eine Geruchstunde (nach GIRL) vorliegt oder nicht. Außerdem lassen sich hierdurch deutlich bessere Zusammenhänge zwischen Gerüchen und Verbrennungszustand ermitteln. Zur weiteren Qualitätssteigerung wurde der für die Geruchspaltenahme eingesetzte dynamische Verdünnner modifiziert und durch die genaue Bestimmung der Verdünnungsrate über den Tracer CO₂ wurde die Unsicherheit bei der Berechnung der Verdünnungsrate reduziert.

Anhand dieser Untersuchungen konnten exemplarisch die Geruchsemissionen für einen Vertreter der Kaminöfen bei unterschiedlichen Betriebszuständen, Brennstoffen und jeweils differenziert für die verschiedenen Verbrennungsphasen ermittelt werden. Es zeigte sich, dass eine Korrelation zwischen der VOC- und der Geruchsstoffkonzentration in der Anbrand- und Hauptverbrennungsphase gegeben ist, wenn die Verbrennungsphasen beim Abbrand von trockenem Buchenholz unter guten, schlechten und sehr schlechten Betriebszuständen getrennt betrachtet werden. Für die Ausbrandphase konnte kein derartiger Zusammenhang ermittelt werden. Die höchsten Geruchsstoffkonzentrationen werden in der Anbrandphase erreicht, hier treten, im Vergleich zur Hauptverbrennungsphase, bei gleichen VOC-Konzentrationen im Mittel etwa die 6fachen Geruchsstoffkonzentrationen auf.

Die Geruchbelastung von nassem Holz ist nicht so stark wie eigentlich vermutet, hingegen wurden beim Tannenholz höhere Geruchsstoffkonzentrationen ermittelt, da hier das Abbrandverhalten des eingesetzten Kaminofens auch unter guten Bedingungen nicht so günstig war wie beim trockenen Buchenholz.

In diesem Projekt wurde zusätzlich untersucht, ob es emissionsseitige Vorteile hat, wenn der erste Chargenabbrand bei kaltem Ofen nicht mit einem kleinen Vorfeuer zur Erzeugung einer Grundglut (Anzündvorgang) und anschließender Holzaufgabe auf diese Grundglut durchgeführt wird, sondern die Holzcharge und etwas feines Holz von oben angezündet wird (Schweizer Anfeuermethode). Bei diesen Versuchen wurden keine Geruchsmessungen

durchgeführt. Es zeigten sich, aufgrund der relativ geringen Holzaufgabemengen beim Kaminofen, keine eindeutigen Vorteile für die Schweizer Anfeuerungsmethode. Vielmehr besteht hier die Gefahr, dass durch eine unsachgemäße Anwendung (z.B. Verwendung von zu wenig feinem Anfeuerholz oder zu grober Holzstücke für die Holzcharge) die Verbrennung nicht richtig in Gang kommt und ein lang andauernder Abbrand mit relativ hohen CO- und VOC-Konzentrationen und sehr großem Luftüberschuss erfolgt. Dieser hat dann weder emissionsseitig noch beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad einen Vorteil gegenüber der ansonsten üblichen Vorgehensweise (Grundgluterzeugung und Holzaufgabe auf diese Grundglut).

Des Weiteren wurden im Rahmen des Projekts die Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei zwei Betriebszuständen (gute und schlechte Verbrennung) in Abhängigkeit der Verbrennungsphase (Anbrand- und Hauptverbrennungsphase) untersucht. Bei diesen Versuchen wurden ebenfalls keine Geruchsmessungen durchgeführt werden. Die PAK-Messungen wurden von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) durchgeführt. Bei schlechten Verbrennungsbedingungen nahmen die PAK-Konzentrationen gegenüber den VOC- bzw. CO-Konzentrationen überproportional in beiden Verbrennungsphasen zu. So stieg z.B. in der Hauptverbrennungsphase die VOC-Konzentration beim Betriebszustand schlechte Verbrennung um ca. den Faktor 5,1, die Konzentration der Summe der 17 untersuchten PAK stieg allerdings um den Faktor 6,5. Allerdings hängt die Konzentrationszunahme bei den PAK von der Verbindung ab. Besonders stark nehmen in der Anbrandphase z. B. Naphthalin oder Acenaphthyl- en zu (Faktor 10,8 bzw. 8,9).

Mit einem neuartigen Sensorelement (LSM-Sensor) zur Messung von gasförmigen Produkten unvollständiger Verbrennung (z.B. CO und VOC) wurden orientierende Vergleichsmessungen durchgeführt um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Geruchsemission erkennbar ist. Es konnte kein Zusammenhang zwischen LSM-Sensorsignal und Geruchsstoffkonzentration festgestellt werden. Allerdings wurde bei höheren CO- und VOC-Konzentrationen oft der nominelle Messbereich der LSM-Sensoren überschritten und die Empfindlichkeit der Sensoren auf CO und VOC nahm innerhalb weniger Abbrände deutlich ab. Somit liegen auch nur vergleichsweise wenige Daten vor, um den diskutierten möglichen Zusammenhang zu bewerten.

Nach Feuerungsversuchen wurden Ascheproben von der Rostasche entnommen und analysiert. Es wurde geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffe der Rostasche und Betriebszustand der Feuerung gegeben ist. Anhand der Analysenergebnisse konnten nur grobe Tendenzen ermittelt werden. So nehmen bei schlechteren Verbrennungsbedingungen die Konzentrationen von Kohlenstoff, Wasserstoff und von Kaliumoxid in der Asche zu.

In zukünftigen Projekten sollten die Zusammenhänge von VOC- und Geruchs- bzw. VOC- und PAK-Emissionen auch bei anderen Feuerungen, Brennstoffen und weiteren kritischen Betriebszuständen untersucht werden. Des Weiteren wäre eine weitergehende Aufschlüsselung der VOC hinsichtlich von Verbindungen bzw. Verbindungsklassen hilfreich, die hauptsächlich zum Geruch beitragen. Dies gilt auch für eine weitere Auflösung der Anbrandphase, um zeitliche Abhängigkeiten innerhalb der Phase zu ermitteln. Durch ein besseres Verständnis der Detailvorgänge könnten letztlich Strategien entwickelt werden, um die Geruchsemissionen bei diesen Feuerungen deutlich zu mindern.

10 Quellenverzeichnis

- Buderus, 2007.
Bedienungs- und Montageanleitung für Kaminofen Buderus blueLine 4W. BBT Thermotechnik GmbH, Buderus Deutschland.
- DIN EN 13240. 2005.
Raumheizer für feste Brennstoffe. Anforderungen und Prüfungen. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 15259. 2008.
Luftbeschaffenheit - Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht. Beuth Verlag, Berlin.
- Kistler, M., 2012.
Particulate matter and odor emission factors from small scale biomass combustion units. Dissertation. Technische Universität Wien. Institut für Chemische Technologien und Analytik. Wien 27.4.2012.
- LAI, 2008.
Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie GIRL) in der Fassung vom 29. Februar 2008 und einer Ergänzung vom 10. September 2008 mit Begründung und Auslegungshinweisen. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- Richter, C.-J., Röckle, R., 2000.
Recherche zur Ermittlung von Emissionsfaktoren für Geruch aus Hackschnitzelfeuerungsanlagen, iMA Richter & Röckle, Freiburg.
- Baumbach, G., Struschka, M., Juschka, W., Carrasco, M., Ang, K. B., Hu, L., Bächlin, W., Sörgel, C., 2010.
Modellrechnungen zu den Immissionsbelastungen bei einer verstärkten Verfeuerung von Biomasse in Feuerungsanlagen der 1. BImSchV. Forschungsbericht 205 43 263, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Schindwein, U., 2012.
Emissionsmessungen im Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) an der Universität Stuttgart. Messobjekte: Gesamtstaub und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Messbericht LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 22.10.2012
- Struschka, M., Winter, P., Hammer, F., 2012.
Untersuchungen zum Praxiseinsatz des neuen LSM-Sensors der Firma ESCUBE. Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart.
- Teichler, J., 2008.
Einsatz von Sensoren zur Bestimmung von brennbaren Gasen in Holzfeuerungsanlagen. Studienarbeit, Institut für Werkstoffe und Elektrotechnik (IWE) - Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- VDI-Richtlinie 2066, Blatt 1, November 2006.
Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen, gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Beuth Verlag, Berlin.
- Norm ISO 11338-1, Juni 2003.
Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen - Teil 1: Probenahme. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 13725, Juli 2003.
Luftbeschaffenheit Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie Deutsche Fassung EN 13725:2003, Beuth Verlag, Berlin.

Fortsetzung Tabelle 11.1:

Mess- tag / Datum	Betriebs- zustand / Brenn- stoff	Mess. Nr.	Ver- brennungs-phase	Geruch			VOC			CO		CO2	O2		
				Ver- dünnungs- faktor	Mess- wert	bez. auf 13 % O2	Mess- wert	bez. auf 13 % O2	Massen- strom	Mess- wert	bez. auf 13 % O2	Massen- strom	Mess- wert	Mess- wert	
					GE/m3	GE/m ³	GE/m ³ *	mgC/m ³	mgC/m ³	gC	mg/m ³	mg/m ³	gCO	Vol%	Vol%
7 16.2.2012	gute Verbrennung Tannenholz - 17,3%	1	Anzünden	6,3	17.608	17.291	17.000	159	156	0,47	1.130	1.109	3,18	7,8	12,9
		2	Anbrand	5,8	98.834	185.199	190.000	448	840	0,64	2.446	4.583	3,31	4,1	16,7
		3	Hauptverbrennung	6,3	69.145	136.024	140.000	553	1.089	1,62	2.067	4.067	5,75	3,9	16,9
		4	Ausbrand	6,1	72.610	135.630	140.000	531	992	1,50	2.364	4.416	6,35	4,1	16,7
		5	Anbrand	6,1	91.455	110.384	110.000	573	691	0,76	3.476	4.195	4,36	6,3	14,4
		6	Hauptverbrennung	6,0	20.992	26.471	26.000	249	314	0,61	1.729	2.181	4,05	6,1	14,7
		7	Ausbrand	5,7	52.631	103.370	100.000	624	1.226	1,50	3.576	7.023	8,13	3,8	16,9
		8	Anbrand	6,2	44.493	34.824	35.000	305	239	0,36	2.491	1.950	2,83	9,8	10,8
		9	Hauptverbrennung	5,9	17.816	18.919	19.000	226	240	0,55	1.634	1.735	3,81	7,2	13,5
		10	Ausbrand	5,5	42.592	99.581	100.000	477	1.116	1,19	2.962	6.926	7,04	3,1	17,6
9 8.11.2012	Luftfeinstellung gute Verbrennung nasses Buchenholz - 36,2 %	1	Anzünden	5,5	38.564	42.928	43.000	83	92	0,11	833	927	1,85	6,9	13,8
		2	Anbrand	5,7	258.341	306.620	310.000	346	411	0,47	2.812	3.338	5,99	6,5	14,3
		3	Hauptverbrennung	5,5	52.421	93.985	94.000	104	187	0,24	728	1.305	2,68	4,3	16,5
		4	Ausbrand	5,8	20.904	60.625	61.000	252	732	0,45	1.276	3.699	3,60	2,7	18,2
		5	Anbrand	6,0	101.739	115.261	120.000	957	1.084	1,27	5.202	5.894	10,94	6,7	13,9
		6	Hauptverbrennung	6,0	32.567	48.634	49.000	152	226	0,35	1.301	1.942	4,78	5,2	15,6
		7	Ausbrand	5,6	17.313	29.967	30.000	84	146	0,19	892	1.544	3,21	4,4	16,4
		8	Anbrand	5,5	247.173	276.244	280.000	595	665	0,72	4.369	4.883	8,52	6,8	13,8
		9	Hauptverbrennung	5,8	50.507	98.814	99.000	323	632	0,71	2.521	4.932	8,76	3,9	16,9
		10	Ausbrand	5,5	20.467	43.164	43.000	335	706	0,73	2.110	4.449	7,28	3,6	17,2
10 13.11.2012	Luftfeinstellung gute Verbrennung nasses Buchenholz - 36,2 %	1	Anzünden	5,3	14.963	20.196	20.000	60	81	0,20	561	758	1,86	5,6	15,1
		2	Anbrand	5,9	100.300	211.792	210.000	978	2.065	2,23	5.049	10.662	11,14	3,5	17,2
		3	Hauptverbrennung	6,6	72.589	126.795	130.000	321	560	1,34	2.661	4.648	10,77	4,4	16,4
		4	Ausbrand	5,7	68.410	176.041	180.000	228	587	0,88	2.196	5.650	8,15	2,9	17,9
		5	Anbrand	5,6	84.718	119.588	120.000	420	593	0,93	3.579	5.052	7,64	5,4	15,3
		6	Hauptverbrennung	5,9	20.548	30.854	31.000	135	202	0,58	1.825	2.740	7,55	5,2	15,7
		7	Ausbrand	5,5	50.453	108.971	110.000	158	341	0,64	1.812	3.914	7,08	3,5	17,3
		8	Anbrand	6,2	44.465	76.356	76.000	581	998	1,26	4.282	7.353	8,91	4,3	16,3
		9	Hauptverbrennung	5,3	15.756	38.861	39.000	526	1.298	2,15	2.964	7.310	11,64	3,1	17,8
		10	Ausbrand	5,5	42.696	81.095	81.000	129	245	0,52	1.231	2.338	4,73	4,0	16,8
11 15.11.2012	Luftfeinstellung gute Verbrennung nasses Buchenholz - 36,2 %	1	Anzünden	5,8	9.825	9.659	9.700	68	66	0,30	714	702	3,04	7,9	12,9
		2	Anbrand	6,0	156.125	235.721	240.000	912	1.377	2,07	4.892	7.386	10,69	5,0	15,7
		3	Hauptverbrennung	5,6	95.385	324.060	320.000	762	2.589	3,20	2.701	9.178	10,92	2,2	18,6
		4	Ausbrand	5,1	18.508	52.029	52.000	213	598	0,86	1.637	4.601	6,33	2,6	18,2
		5	Anbrand	6,1	97.828	175.569	180.000	766	1.375	1,66	3.173	5.694	6,61	4,2	16,5
		6	Hauptverbrennung	5,9	76.525	199.914	200.000	971	2.538	4,34	3.062	7.998	13,16	2,9	17,9
		7	Ausbrand	4,8	67.390	253.428	250.000	1.298	4.880	5,61	3.267	12.286	13,60	2,0	18,9
		8	Anbrand	5,8	115.170	178.861	180.000	1.253	1.946	2,98	5.545	8.612	12,72	4,7	15,8
		9	Hauptverbrennung	5,8	48.967	106.220	110.000	702	1.522	3,03	3.325	7.213	13,81	3,5	17,3
		10	Ausbrand	5,8	48.981	98.532	99.000	390	784	1,65	2.159	4.344	8,79	3,8	17,0

* gerundete Werte

Tabelle 11.2 Probenauswertung am Olfaktometer - Verfahrenskenngrößen und Qualitätssicherung

Olfaktometer	Mannebeck TO7 (Vierplatzgerät), Inv.-Nr. S-026
Verdünnungsprinzip	Gasstrahlprinzip
verwendete Materialien	Teflon, Edelstahl
Verdünnungsbereich	2.5 bis 640 ohne Vormischer bis 64 000 mit Vormischer
Volumenstrom der einzelnen Riechproben	1.24 m ³ /h
Anzahl der Prüfer, die gleichzeitig am Gerät arbeiten können	4
Art und Material des Olfaktometerausgangs	Riechrohr wahlweise aus Glas oder Edelstahl
Art der Verdünnungsluft	Pressluft ölfrei, sekundär 1 Partikelfilter, 1 Wasserabscheider, 2 Aktivkohlefilter.
Vorverdünnung vor/während der Olfaktometrie	Nach Bedarf
Häufigkeit der Überprüfung der Prüfer mit Standardgeruchsstoff (n-Butanol)	Grundsätzlich am Messtag vor jeder Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration am Olfaktometer zur Überprüfung der Tagesform der Prüfer und mindestens innerhalb von jeweils 12 Einzelmessungen
Ort der Probenauswertung	
Lage und Beschreibung des Riechraums	An der Roßweid 3, 76229 Karlsruhe, 1. OG, an der Nordostecke des Bürokomplexes Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik (IFK) Universität Stuttgart, Messwarte Neues Technikum
Klimatisierung	Karlsruhe: Ja; Stuttgart: Ja
Lüftung	Freie Lüftung
Zuluftreinigung	Nein
Temperatur im Riechraum	20 < T [°C] < 25
Auswerteverfahren	
Versuchsleiter	Dr.-Ing. A. Lohmeyer; Dipl.-Ing. D. Morrison
Darbietung der Geruchsproben	Limitverfahren
Methode	„Ja/Nein-Verfahren“
Dauer des einzelnen Reizes	2.2 s
Dauer der Pause zwischen den einzelnen Reizen	2.2 s
Zahl der Darbietungen in einer Verdünnungsreihe	Minimal 4 bis zur Bestätigung der Geruchswahrnehmung durch alle Prüfer
Stufung der Verdünnungsreihe	2

Fortsetzung Tabelle 11.2:

Zahl der Nullproben in einer Verdünnungsreihe	20 %
Dauer der Pause zwischen zwei Verdünnungsreihen	60 s
Zahl der Durchgänge pro Probe	3
Dauer der Pause zwischen zwei Proben	2 min
Kalibrierung der Verdünnungseinrichtung einschließlich Vorverdünnung mit Referenzmaterial	
Datum der letzten Kalibrierung	06/2012
Referenzmaterial	197.000 ppm Propan in N ₂ 19.900 ppm Propan in N ₂
Prüferkollektiv inklusive Prüferhistorie	
Anzahl der Prüfer	> 12
Sensorische Gesamtqualität des Labors	
Wiederholpräzision des Labors	r = 0.367
Genauigkeit des Labors	A _{od} = 0.098
Nachweisgrenze der olfaktometrischen Messeinrichtung	5 GE/m ³ (Stand 08/2011)
Standardgeruchsstoffe	
Angaben zu den verwendeten Standardgeruchsstoffen n-Butanol und H ₂ S	n-Butanol in Stickstoff 5.0: Konzentration: 19.9 Mol-ppm Hersteller: Air Liquide Herstellungsdatum: 23.03.2009 Stabilitätsgarantie: 36 Monate H ₂ S in synthetischer Luft: Konzentration: 2.03 mg/m ³ Hersteller: Air Liquide Herstellungsdatum: 27.10.2011 Stabilitätsgarantie: 12 Monate

Die bei der Messung eingesetzten Materialien durchlaufen eine Eingangskontrolle zur Überprüfung der Geruchsneutralität. Die Probenbeutel werden nach Fertigung auf Dichtigkeit geprüft, ihr Volumen wird vermessen.

Vor Ort wurde zu Beginn der Geruchsmessungen eine Feldblindprobe genommen (Beutel mit Stickstoff gefüllt), die gleich den Proben behandelt wurde.

Tabelle 11.3 Mittelwerte (arithmetisch) der Geruchs-, VOC- und CO-Konzentrationen der untersuchten Betriebszustände für trockenes Buchenholz (w = 15,3%), Tannenholz (w = 17,3%) und nasses Buchenholz (w = 36,2%)

Verbrennungsphase	Komponente	Buchenholz (w = 15,3%)			Tannenholz (w = 17,3 %)	nasses Buchenholz (w = 36,2 %)
		gut	schlecht	sehr schlecht	gut	gut **
Anzünden	Geruch in GE/m ³ *	14.608	11.879	32.132	17.291	24.261
	VOC in mgC/m ³ *	121	382	1.971	156	80
	CO in mg/m ³ *	733	2.385	10.458	1.109	796
	O ₂ in Vol%	15,2	9,9	7,1	12,9	13,9
Anbrand	Geruch in GE/m ³ *	247.691	76.968	221.103	110.136	188.446
	VOC in mgC/m ³ *	1.461	627	1.268	590	1.168
	CO in mg/m ³ *	5.710	4.276	8.953	3.576	6.542
	O ₂ in Vol%	13,7	10,4	8,8	14,0	15,4
Hauptverbrennung	Geruch in GE/m ³ *	11.577	9.221	35.411	60.471	118.682
	VOC in mgC/m ³ *	97	446	1.243	548	1.084
	CO in mg/m ³ *	952	3.623	9.586	2.661	5.252
	O ₂ in Vol%	9,7	6,9	3,4	15,0	17,0
Ausbrand	Geruch in GE/m ³ *	14.335	9.065	31.081	112.860	100.428
	VOC in mgC/m ³ *	287	120	134	1.112	1.002
	CO in mg/m ³ *	4.543	5.883	10.795	6.122	4.758
	O ₂ in Vol%	16,7	16,6	15,9	17,1	17,5

* bezogen auf 13 Vol% O₂

** Einstellung der Verbrennungsluft wie bei trockenem Buchenholz und gute Verbrennung

Verbrennungsphase	Komponente	Buchenholz (w = 15,3%)			Tannenholz (w = 17,3 %)	nasses Buchenholz (w = 36,2 %)
		gut	schlecht	sehr schlecht	gut	gut *
Anzünden	Geruch in GE/m ³	9.508	16.965	56.261	17.608	21.117
	VOC in mgC/m ³	85	564	3.525	159	70
	CO in mg/m ³	548	3.477	18.586	1.130	703
	O ₂ in Vol%	15,2	9,9	7,1	12,9	13,9
Anbrand	Geruch in GE/m ³	149.528	89.025	296.825	78.261	133.984
	VOC in mgC/m ³	975	764	1.781	442	756
	CO in mg/m ³	4.309	5.442	13.885	2.804	4.323
	O ₂ in Vol%	13,7	10,4	8,8	14,0	15,4
Hauptverbrennung	Geruch in GE/m ³	15.401	16.515	78.847	35.984	51.696
	VOC in mgC/m ³	147	840	2.771	343	444
	CO in mg/m ³	1.483	6.621	21.310	1.810	2.343
	O ₂ in Vol%	9,7	6,9	3,4	15,0	17,0
Ausbrand	Geruch in GE/m ³	7.876	4.883	19.090	55.944	39.458
	VOC in mgC/m ³	153	66	84	544	343
	CO in mg/m ³	2.382	3.052	6.619	2.967	1.842
	O ₂ in Vol%	16,7	16,6	15,9	17,1	17,5

* Einstellung der Verbrennungsluft wie bei trockenem Buchenholz und gute Verbrennung

Tabelle 11.4 Mittelwerte (arithmetisch) sowie Maximal- und Minimalwerte der Geruchs- und VOC-Konzentrationen der untersuchten Betriebszustände für trockenes Buchenholz (w = 15,3%), Tannenholz (w = 17,3%) und nasses Buchenholz (w = 36,2%)

Verbrennungsphase	Komponente	Buchenholz (w = 15,3%)			Tannenholz (w = 17,3%)	nasses Buchenholz (w = 36,2%)
		gut	schlecht	sehr schlecht	gut	gut **
Anzünden	Geruch in GE/m ³ *	14.608	11.879	32.132	17.291	24.261
	max-Wert Geruch in GE/m ³ *	23.174	19.251	36.305	17.291	42.928
	min-Wert Geruch in GE/m ³ *	6.043	6.516	27.959	17.291	9.659
	VOC in mgC/m ³ *	121	382	1.971	156	80
	max-Wert VOC in mgC/m ³ *	144	553	3.060	156	92
	min-Wert VOC in mgC/m ³ *	98	124	881	156	66
Anbrand	Geruch in GE/m ³ *	247.691	76.968	221.103	110.136	188.446
	max-Wert Geruch in GE/m ³ *	863.515	195.018	441.191	185.199	306.620
	min-Wert Geruch in GE/m ³ *	34.061	12.223	59.305	34.824	76.356
	VOC in mgC/m ³ *	1.461	627	1.268	590	1.168
	max-Wert VOC in mgC/m ³ *	3.948	1.363	2.618	840	2.065
	min-Wert VOC in mgC/m ³ *	358	382	228	239	411
Hauptverbrennung	Geruch in GE/m ³ *	11.577	9.221	35.411	60.471	118.682
	max-Wert Geruch in GE/m ³ *	16.934	15.677	62.409	136.024	324.060
	min-Wert Geruch in GE/m ³ *	6.233	4.200	23.466	18.919	30.854
	VOC in mgC/m ³ *	97	446	1.243	548	1.084
	max-Wert VOC in mgC/m ³ *	186	1.074	2.330	1.089	2.589
	min-Wert VOC in mgC/m ³ *	56	192	637	240	187
Ausbrand	Geruch in GE/m ³ *	14.335	9.065	31.081	112.860	100.428
	max-Wert Geruch in GE/m ³ *	28.434	12.715	43.565	135.630	253.428
	min-Wert Geruch in GE/m ³ *	4.714	3.551	18.064	99.581	29.967
	VOC in mgC/m ³ *	287	120	134	1.112	1.002
	max-Wert VOC in mgC/m ³ *	448	161	306	1.226	4.880
	min-Wert VOC in mgC/m ³ *	166	64	59	992	146

* bezogen auf 13 Vol% O₂

Tabelle 11.5 Messplatzaufbau bei den PAK-Messungen, Behandlung des Abscheidemediums und der Ablagerungen

Messplatzaufbau bei den PAK-Messungen	
Planfilterkopfgerät:	beheizt auf: 150 °C, außerhalb des Kanals Material: Titan
Entnahmesonde:	Material: Titan
Absaugrohr:	Material: Titan, durch Abgasstrom beheizt
Filter, Hersteller/Typ:	Schleicher & Schuell Material: Glasfaser Rundfilter GF9
Durchmesser:	45 mm
Lot. Nr.:	Ref. No 370201 Lot BI0641-1
Kühler:	Intensivgaskühler
wirksame Länge:	250 mm
Gastemperatur nach Kühler:	< 40 °C
Adsorptionseinrichtungen:	Glaskartusche
Sorptionsmittel:	2 vorbehandelte PU-Schäume ORBO-1000, Ø 22 mm x 76 mm
Abstand zw. Ansaugöffnung der Entnahmesonde und Filterelement:	ca. 0,1 m
Dichtheitsprüfung:	Vor Beginn der Probenahme wurde durch Verschließen der Sondenöffnung und durch Anlegung eines Unterdruckes von ca. -200 hPa die Dichtigkeit der gesamten Probenahmeapparatur geprüft.
max. Probenahmevervolumenstroms:	2 m ³ /h
Probentransfer:	Die bestaubten Filter wurden nach den Probenahmen in den dafür vorgesehenen Transportschälchen verpackt. Die Adsorptionseinheit (Intensivkühler, Glas-Verbindungsrohr und Adsorptionskartusche) wurde verschlossen. Das Probenmaterial wurde lichtgeschützt gelagert und transportiert.
Behandlung des Abscheidemediums und der Ablagerungen	
Trocknung des Abscheidemediums vor der Beaufschlagung:	2 h bei 180 °C
Trocknung des Abscheidemediums nach der Beaufschlagung durch Exposition im klimatisierten Wägeraum	48 h
klimatisierter Wägeraum:	ja
Bedingungen im klimatisierten Wägeraum:	t=20 °C bei einer Feuchte=50 %
Expositionszeit vor der Wägung:	mindestens 24 h
Waage:	Sartorius AE 240
Bestimmungsgrenze:	0,2 mg
Genauigkeit:	0,1 mg
Rückgewinnung von Ablagerungen vor dem Filter:	Die Spüllösungen wurden ohne Vorbehandlung der analytischen Bestimmung auf PAK zugeführt. Eine simultane gravimetrische Auswertung war nicht möglich.
Bestimmung von Gesamtleerproben:	ja, eine Gesamtleerprobe

Tabelle 11.6 Analytische Bestimmung bei den PAK-Messungen und Messunsicherheit

Analytische Bestimmung bei den PAK-Messungen	
Die Probenahmeeinrichtung vor dem Filter wurde vor Ort nach jeder kumulierten Gesamtprobe mit Toluol in ein Glasgefäß ausgespült. Die restliche Probenahmeeinrichtung wurde im Labor mit einer Mischung aus Aceton/Hexan (1:1) ausgespült. Die vor Ort angefallene Spüllösung aus Toluol und die Aceton-/Hexan-Spüllösung (ca. 400 ml) sowie das angefallene Kondensat wurden in einen 500 ml Rundkolben überführt.	
Die PU-Schäume und der Glasfaserfilter wurden direkt in einen 300 ml Soxhletextraktor gegeben. Der mit den beiden Spüllösungen gefüllte 500 ml Rundkolben wurde mit dem Soxhletextraktor kombiniert. Die Extraktion erfolgte über Nacht. Zur Entfernung von Kondensat wurde der Extrakt anschließend für eine Stunde mit Natriumsulfat getrocknet. Nach Abtrennung des Natriumsulfats wurde der wasserfreie Soxhletextrakt im Rotationsverdampfer auf 1 ml Toluol eingeengt und filtriert. Aus dem Filtrat wurden Verdünnungen für die anschließende Analyse mittels Massenspektrometer nach gaschromatographischer Auftrennung (GC/MS) hergestellt.	
Analyseverfahren:	Gaschromatographie mit Massenspektrometer (GC/MS)
Analysengeräte	Gaschromatograph: Agilent 7890A Massenspektrometer: AGILENT MSD 5975 C
Trennsäule:	BPX5 60m x iD 0,25mm mit 0,25µm
Kalibrierung:	Mehrpunkt-Kalibrierung; Arbeitsbereich: 20 ng/ml bis 1000 ng/ml
Standard:	native PAK, 10 ng/ml bis 1000 ng/ml; externe Standardmethode
Bestimmungsgrenze:	20 ng/ml
Messunsicherheit	
<p>Von den analysierten Proben wurden teilweise Doppelbestimmungen durchgeführt. Aus diesen Doppelbestimmungen wurde exemplarisch für die Messobjekte Naphthalin (leichtflüchtig), Phenanthren (mittelflüchtig), und Benzo(a)pyren (schwerflüchtig), der jeweilige Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Zur Bestimmung der Messunsicherheit für den analytischen Teilschritt wurde im Sinne einer pessimistischen Abschätzung für jedes Messobjekt die jeweils höchste ermittelte Standardabweichung herangezogen. Der Beitrag zur Messunsicherheit durch die Probenahme ist im Vergleich zur analytischen Messunsicherheit vernachlässigbar. Aus diesem Grund wurde die erweiterte Messunsicherheit durch Erweiterung der analytischen Standardabweichung mit dem Faktor 2 berechnet.</p> <p>Diese beträgt für die Messobjekte Naphthalin und Benzo(a)pyren 60 % und Phenanthren ca. 20 %. Die erweiterte Messunsicherheit wird daher für leicht- bzw. schwerflüchtige Messobjekte mit 60 %, für mittelflüchtige Messobjekte mit 20 % angegeben.</p>	

Messtag 1 (11.04.2012)

Betriebszustand: gut

Vormittag

Kalter Ofen

Anzündvorgang mit kleinen Weichholzscheiten

1. Anbrand (nach Holzaufgabe, ca. 1,2 kg Buchenholz)
Start Messung wenn CO₂-Gehalt 3 %

1. Hauptfeuerung
Start Messung, wenn CO₂-Gehalt = Maximum

1. Ausbrand keine Messung

Betriebswarmer Ofen

2. Anbrand (nach Holzaufgabe, ca. 1,2 kg Buchenholz)
Start Messung wenn CO₂-Gehalt 3 %

2. Hauptfeuerung
Start Messung, wenn CO₂-Gehalt = Maximum

2. Ausbrand keine Messung

Betriebswarmer Ofen

3. Anbrand (nach Holzaufgabe, ca. 1,2 kg Buchenholz)
Start Messung wenn CO₂-Gehalt 3 %

3. Hauptfeuerung
Start Messung, wenn CO₂-Gehalt = Maximum

3. Ausbrand keine Messung

Pause (Abkühlung Ofen)

Nachmittag

Kalter Ofen

Anzündvorgang mit kleinen Weichholzscheiten

4. Anbrand (nach Holzaufgabe, ca. 1,2 kg Buchenholz)
Start Messung wenn CO₂-Gehalt 3 %

4. Hauptfeuerung
Start Messung, wenn CO₂-Gehalt = Maximum

4. Ausbrand keine Messung

Betriebswarmer Ofen

5. Anbrand (nach Holzaufgabe, ca. 1,2 kg Buchenholz)
Start Messung wenn CO₂-Gehalt 3 %

5. Hauptfeuerung
Start Messung, wenn CO₂-Gehalt = Maximum

5. Ausbrand keine Messung

Betriebswarmer Ofen

6. Anbrand (nach Holzaufgabe, ca. 1,2 kg Buchenholz)
Start Messung wenn CO₂-Gehalt 3 %

6. Hauptfeuerung
Start Messung, wenn CO₂-Gehalt = Maximum

6. Ausbrand keine Messung



Abbildung 11.1 Ablaufschema zur kumulierenden PAK-Probenahme am Beispiel des 1. Messtages am 11.4.2012

Tabelle 11.7 PAK-Messungen - Mittelwerte über Probenahmezeit für Gaskonzentrationen und Betriebsgrößen

Mess-tag	Datum	Messung	Probe-nahme-dauer	Betriebs-zustand	An-brand	Haupt-ver-brennung	CO	CO ₂	O ₂	VOC *	Staub **
							[mg/m ³]	[Vol%]	[Vol%]	[mgC/m ³]	[mg/m ³]
1	11.04.2012	PAK 1	00:11:03	gut	X		2.174	6,6	14,4	505	53
		PAK 2	00:17:21	gut		X	876	7,9	12,9	118	98
		PAK 3	00:09:11	gut	X		1.402	8,2	13,0	218	87
		PAK 4	00:14:55	gut		X	479	8,1	12,6	49	126
2	12.04.2012	PAK 5	00:09:05	gut	X		2.714	9,2	12,3	654	158
		PAK 6	00:15:00	gut		X	744	8,2	12,5	112	96
		PAK 7	00:08:56	gut	X		1.227	7,8	13,5	248	138
		PAK 8	00:15:01	gut		X	346	7,4	13,3	39	124
3	16.04.2012	PAK 9	00:09:01	schlecht	X		3.600	8,9	13,1	617	145
		PAK 10	00:14:57	schlecht		X	2.120	11,0	9,7	319	191
		PAK 11	00:08:56	schlecht	X		7.587	10,5	13,6	4.685	419
		PAK 12	00:15:03	schlecht		X	1.952	8,7	10,8	527	242
4	17.04.2012	PAK 13	00:08:59	schlecht	X		6.769	12,3	8,4	2.278	302
		PAK 14	00:14:05	schlecht		X	3.713	11,4	9,3	1.008	342
		PAK 15	00:09:08	schlecht	X		4.292	10,2	10,4	1.684	219
		PAK 16	00:15:02	schlecht		X	1.688	10,8	9,9	324	232

Messung	Unterdruck Abgasrohr	t _{Abgas} Gasprobe-nahme	t _{Abgas} PAK-Probe-nahme	V _{Abgas} (norm, f)	V _{Abgas} (norm, tr)
	[Pa]	[°C]	[°C]	[m ³ /h]	[m ³ /h]
PAK 1	12,4	163	135	34	32
PAK 2	13,0	205	164	32	30
PAK 3	12,8	167	138	33	30
PAK 4	13,2	209	165	30	28
PAK 5	12,7	170	136	33	30
PAK 6	13,0	208	161	29	27
PAK 7	12,5	178	132	30	27
PAK 8	12,9	216	157	28	26
PAK 9	13,2	156	114	26	24
PAK 10	13,5	201	139	24	21
PAK 11	13,7	196	125	24	22
PAK 12	14,0	218	143	21	19
PAK 13	13,5	182	114	21	19
PAK 14	13,9	226	141	18	16
PAK 15	13,1	168	109	18	16
PAK 16	13,6	217	135	16	14

* bezogen auf feuchtes Abgas

** Staubkonzentration ohne Spülung der Probenahmeeinrichtung (Staubwerte sind als orientierende Werte zu sehen)

Fortsetzung Tabelle 11.7:

Messung	Naphthalin NAP	Acenaphthylen ACY	Acenaphten ACE	Fluoren FLU	Phenanthren PHE	Anthracen ANT	Fluoranthren FLUA	Pyren PYR	Benzo(a)anthracen BaA	Chrysen CHR
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PAK 1	3.350	834	54	207	756	133	323	270	38	34
PAK 2	340	80	4	30	533	45	493	384	44	54
PAK 3	2.194	396	17	85	473	60	255	202	39	40
PAK 4	395	69	2	11	117	19	84	69	14	15
PAK 5	7.752	1.776	65	334	1.320	179	441	353	57	55
PAK 6	966	166	4	28	244	33	121	98	13	14
PAK 7	1.826	437	24	90	352	60	144	114	18	16
PAK 8	306	53	2	10	125	22	70	58	7	7
PAK 9	7.593	1.158	38	227	1.288	134	394	303	42	52
PAK 10	2.656	314	6	55	559	57	301	233	32	40
PAK 11	95.358	16.353	360	3.320	14.141	1.723	4.808	4.327	681	821
PAK 12	5.735	1.006	18	149	1.243	105	572	453	48	77
PAK 13	54.325	6.928	186	1.418	7.386	871	2.516	2.173	282	365
PAK 14	17.427	2.233	44	434	2.895	259	1.211	1.056	114	173
PAK 15	23.544	3.406	105	768	3.758	466	1.138	970	94	115
PAK 16	3.569	864	10	109	1.144	105	514	402	52	74

Messung	Benzo(b)- fluoranthren BbF	Benzo(j)- fluoranthren BjF	Benzo(k)- fluoranthren BkF	Benzo(a)pyren BaP	Dibenzo(ah)- anthracen DBahA	Indeno(1,2,3-cd)- pyren IND	Benzo(ghi)- perylene BghiP
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PAK 1	24	18	14	22	2	20	19
PAK 2	40	27	20	23	3	27	26
PAK 3	29	20	15	21	2	23	23
PAK 4	13	8	6	9	< 1	6	7
PAK 5	49	36	26	43	4	47	49
PAK 6	12	8	5	7	1	7	8
PAK 7	14	10	7	11	1	13	13
PAK 8	6	4	2	4	< 1	3	3
PAK 9	47	33	23	34	4	45	47
PAK 10	33	24	15	28	2	22	24
PAK 11	585	449	300	615	68	712	786
PAK 12	53	46	31	56	4	33	58
PAK 13	266	211	138	270	29	318	386
PAK 14	127	103	67	111	13	111	146
PAK 15	81	70	47	85	10	72	110
PAK 16	65	48	34	53	5	56	60

Tabelle 11.8 Analysenergebnisse für Aschen aus Verbrennungsversuchen mit guter, schlechter und sehr schlechter Verbrennung von trockenem Buchenholz im Kaminofen

Probe	Betriebszustand	Kurzanalyse				Elementaranalyse					Multikohlenstoffanalyse			Helligkeitsbewertung
		Analysenfeuchte (N ₂ +106°C), %	Flüchtige Stoffe (N ₂ +900°C), %	Asche (O ₂ +550°C), %	Fixed C (berechn.), %	Kohlenstoff (C), %	Wasserstoff gesamt (H _{ges}), %	Wasserstoff (H _{an}), %	Stickstoff (N), %	Schwefel (S), %	Gesamt-Kohlenstoff (TC) %	organisch Kohlenstoff (TOC) %	anorganisch Kohlenstoff (TIC) %	
2037	gute V.	1,50	30,4	68,1	< 0,1	14,3	0,32	0,15	n. b.	n. b.	14,4	6,96	7,44	8
2034	schlechte V.	1,49	36,0	62,3	0,27	17,9	0,34	0,17	n. b.	n. b.	17,6	9,45	8,17	5
2035	schlechte V.	1,64	33,8	64,4	0,18	18,7	0,39	0,21	n. b.	n. b.	18,5	10,10	8,39	6
2036	schlechte V.	1,63	31,9	66,3	0,22	21,9	0,48	0,30	n. b.	n. b.	21,0	14,0	7,03	10
2038	schlechte V.	1,38	32,2	66,3	< 0,1	15,2	0,33	0,17	n. b.	n. b.	15,3	7,59	7,72	4
2033	sehr schlechte V.	2,04	31,9	66,0	< 0,1	18,0	0,47	0,24	n. b.	n. b.	18,1	10,3	7,82	9
2039	sehr schlechte V.	3,06	28,2	68,7	< 0,1	25,4	0,57	0,23	n. b.	n. b.	25,0	17,5	7,42	12
2040	sehr schlechte V.	1,46	21,3	76,5	0,66	10,7	0,26	0,10	n. b.	n. b.	10,8	3,38	7,42	2 *
2041	sehr schlechte V.	1,01	30,0	68,7	0,30	15,8	0,29	0,17	n. b.	0,45	16,0	8,10	7,92	3
2042	sehr schlechte V.	2,25	29,5	67,9	0,38	29,3	0,71	0,46	n. b.	n. b.	27,4	20,8	6,59	11
2043	sehr schlechte V.	0,25	18,3	80,2	1,28	9,6	0,32	0,29	n. b.	n. b.	9,21	2,09	7,12	1
2044	sehr schlechte V.	1,12	30,6	68,2	< 0,1	15,5	0,54	0,41	n. b.	n. b.	15,5	7,91	7,58	7 *

Probe	Betriebszustand	Hauptelemente									
		Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃), %	Kalziumoxid (CaO), %	Eisenoxid (Fe ₂ O ₃), %	Kaliumoxid (K ₂ O), %	Magnesiumoxid (MgO), %	Natriumoxid (Na ₂ O), %	Phosphoroxid (P ₂ O ₅), %	Schwefeltrioxid (SO ₃), %	Siliziumoxid (SiO ₂), %	Titanoxid (TiO ₂), %
2037	gute V.	0,179	40,2	0,084	11,7	6,31	0,088	1,95	0,49	5,25	0,005
2034	schlechte V.	0,178	37,2	0,109	12,8	4,06	0,102	2,67	1,22	4,75	0,006
2035	schlechte V.	0,214	36,0	0,085	13,1	5,78	0,092	1,56	0,75	5,01	0,007
2036	schlechte V.	0,149	36,1	0,064	12,4	4,59	0,115	2,47	1,01	4,98	0,005
2038	schlechte V.	0,155	35,3	0,078	13,6	8,82	0,095	3,42	0,83	5,52	0,009
2033	sehr schlechte V.	0,125	34,5	0,060	15,3	5,21	0,100	2,62	1,00	4,86	0,055
2039	sehr schlechte V.	0,109	26,7	0,059	17,0	5,69	0,091	1,56	0,54	4,44	0,004
2040	sehr schlechte V.	0,157	39,3	0,078	16,6	4,59	0,107	3,35	1,25	3,85	0,006
2041	sehr schlechte V.	0,175	39,5	0,084	14,2	5,26	0,104	2,81	0,78	5,36	0,008
2042	sehr schlechte V.	0,133	28,5	0,060	12,7	6,11	0,085	2,27	0,71	4,42	0,005
2043	sehr schlechte V.	0,162	43,1	0,078	16,6	7,36	0,099	2,64	0,79	4,76	0,006
2044	sehr schlechte V.	0,145	37,9	0,056	12,8	7,34	0,079	3,02	0,67	4,44	0,004

Bezugszustand: analysenfeucht, Angaben in Massen-%

n. b. nicht bestimmbar, unter der Bestimmungsgrenze von < 0,3 Massen-%

Helligkeitsbewertung nach Skala 1-hell bis 12-dunkel

* braunstich