

Durchführung von Feldmessungen an Feuerungsanlagen mit Sensoren



**Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)
der Universität Stuttgart**

(Institutsdirektor: Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht)

Dr.-Ing. Michael Struschka

M.Sc. Maria Dolores Carrasco Martín

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

IVD, Pfaffenwaldring 23, D-70569 Stuttgart

Tel. 0711-685-63487, Fax 0711-685-63491

Internet: <http://www.ivd.uni-stuttgart.de>

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

März 2009

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Eingesetztes Sensor-Messsystem und Aufbau der Messboxen.....	2
	2.1 Aufbau der Messboxen	6
3	Für Feldtest ausgewählte Feuerungsanlagen	9
	3.1 Messbox 1 - Pelletfeuerung	9
	3.2 Messbox 2 - Feuerung für gewerbliche Holzreste	11
	3.3 Messbox 3 - Stückholzkessel	14
	3.4 Messbox 4 - Kaminofen	15
4	Vergleichsmessungen mit Standardmesstechnik.....	18
	4.1 Vergleichsmessung von Messbox 1 und 2 am Pelletofen	18
	4.2 Vergleichsmessung von Messbox 3 und 4 am Heizeinsatz	19
	4.3 Versuchsdurchführung	22
5	Ergebnisse der Vergleichsmessungen	24
	5.1 Vergleichsmessungen am Pelletofen - Messboxen 1 und 2	24
	5.2 Vergleichsmessungen am Heizeinsatz - Messboxen 3 und 4	42
6	Ergebnisse der Langzeitmessungen.....	54
	6.1 Pelletkessel - Messbox 1	54
	6.2 Gewerbliche Holzfeuerung - Messbox2	71
	6.3 Stückholzkessel - Messbox 3	87
	6.4 Kaminofen - Messbox 4	105
7	Messbox 2 - Zusätzliche Auswertungen	123
8	Zusammengefasste Ergebnisse	127
9	Fazit	133
10	Literaturverzeichnis	134

1 Einleitung

Für Emissionsmessungen an Holzfeuerungsanlagen sind derzeit nur vergleichsweise aufwendige und teure Messverfahren verfügbar, bei denen in kürzeren Abständen auch regelmäßige Wartungs- und Kontrollarbeiten anfallen. Diese Systeme sind nicht für unbeaufsichtigte Langzeitmessungen an Feuerungsanlagen geeignet. Zur Ermittlung des Langzeitemissionsverhaltens von kleinen und mittleren Biomassefeuerungen, für Breit angelegte Feldmessungen an vielen unterschiedlichen Feuerungsanlagen und zur Diagnose von Anlagen die Nachbarschaftsbeschwerden verursachen, wäre eine kompakte, vergleichsweise kostengünstige und wartungsarme Messsystem notwendig, welches die Emissionskomponenten direkt im Abgas mittels preisgünstiger und zuverlässiger Abgassensortechnik erfasst.

Aufbauend auf vorangegangene Untersuchungen zur Eignung derartiger Sensoren für Biomassefeuerungen wurden vom Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik (IWE) der Universität Karlsruhe vier Systeme zur Messung von O_2 , NO_x und unverbrannten Abgasbestandteilen ($CO+HC$) sowie der Abgas- und Außentemperatur und des Schornsteinzuges aufgebaut. Bestandteil der Systeme ist ein PC zur Datenerfassung, Speicherung und Datenübertragung mittels Internet oder Mobilfunk.

Mit diesen mobilen Messsystemen (Messboxen) sollte an vier installierten Feuerungsanlagen Langzeituntersuchungen zum Emissionsverhalten der Anlagen im Praxisbetrieb durchgeführt werden. Als Zeitraum für die Langzeitmessung wurden die Monate Februar bis Anfang Mai 2008 festgelegt. Die Messungen sollten an einem Pelletkessel, an einem mechanisch beschickten Holzkessel im Holzver- und bearbeitenden Gewerbe, an einem handbeschickten Stückholzkessel und an einer Einzelraumfeuerstätten (z.B. Kaminöfen) durchgeführt werden. An Brennstoffen sollten die vom Betreibern der Anlagen üblicherweise eingesetzten Heizmaterialien verwendet werden.

Vor und nach den Langzeitmessungen sollen die Messsysteme anhand von Vergleichsmessungen mit Referenzmessverfahren an Feuerungsanlagen auf dem Prüfstand überprüft werden. Hiermit sollen Kalibrierfunktionen für die Umrechnung der Sensorsignale in Konzentrationen und Sensordriften ermittelt und ggf. Fehlfunktionen der Sonden erkannt werden.

Mit den Ergebnissen der Langzeitmessungen soll zum einen der Nachweis erbracht werden, dass die mobilen Messsysteme für derartige Untersuchungen geeignet sind und es soll das Betriebs- und Emissionsverhalten der Anlagen beschrieben werden. Außerdem soll exemplarisch an einem Beschwerdefall über Rauch- und Rußemissionen gezeigt werden, dass mit Hilfe der Ergebnisse die Betriebszustände identifiziert werden können, welche im wesentlichen für die Nachbarschaftsbeschwerden verantwortlich sind.

2 Eingesetztes Sensor-Messsystem und Aufbau der Messboxen

An ein Messsystem, welches kostengünstig und wartungsarm ist, sowie für Langzeitmessungen an Holzfeuerungen geeignet ist, sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Aufbau als kompakte Messeinheit, die auch bei beengten Verhältnissen untergebracht werden kann
- keine aktiv beweglichen Teile (z.B. Probenpumpen) und keine Messgasaufbereitung (z.B. Partikelfilter, Messgaskühler) außerhalb des Abgasrohres
- außer einer Stromversorgung sind keine weiteren Hilfsmittel (z.B. Prüfgase) notwendig
- das Messsystem sollte ohne Wartung ca. 1.000 h betrieben werden können
- da eine Messgasaufbereitung nicht möglich ist, muss das Messsystem die Bedingungen im Abgasstrom (Temperatur > 200 °C, Anfall von Stäuben und Teeren, ggf. Taupunktunterschreitung) verkraften und

eine hinreichende Präzision und handhabbare Querempfindlichkeiten besitzen, um verwertbare Aussagen ableiten zu können.

Die bekannten Messsysteme sind für eine Langzeitmessung nicht geeignet, da der Wartungsaufwand (z.B. regelmäßige Kalibrierung) für die Messgeräte und die Messgasprobenaufbereitung (z.B. Filterwechsel) zu groß ist. Außerdem benötigen diese Messsysteme viel Platz und stellen durch Pumpen und Lüfter eine permanente Lärmquelle dar, so dass eine Langzeitmessung in Wohnräumen (z.B. bei Kamin- oder Kachelöfen) für die Anlagenbetreiber nicht zumutbar ist. Optische Verfahren sind wegen der schwankenden Abgaszusammensetzung (Asche- und Rußanteil) nur bedingt anwendbar und auch die Messgeräte für die Routineüberwachung durch den Schornsteinfeger sind für eine Dauerüberwachung nicht geeignet.

In vorangegangenen Projekten der LUBW Baden-Württemberg (Struschka et al., 2007, Menesklou, 2007) sollte daher geprüft werden, ob und welche Abgassensoren zur Ermittlung der Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen für Holzbrennstoffe geeignet sind. Außerdem sollten hierbei die Anforderungen an ein kompaktes und robustes Messsystem festgelegt und die Empfindlichkeiten und Genauigkeiten der untersuchten Sensoren ermittelt werden. In **Tabelle 2.1** sind wichtige Anforderungen an ein solches Messsystem aufgelistet.

Auf Grundlage der durchgeführten Eignungsmessungen von unterschiedlichen Abgassensoren im Vergleich mit konventioneller Messtechnik wurden für das Messsystem zur Durchführung der Langzeitmessungen 2 Sensoren ausgewählt. Beide Sensoren weisen als ionenleitendes Trägermaterial dotiertes ZrO_2 auf. Mit den Sensoren können unverbrannte Abgasbestandteile (CO und HC), NO_x und O_2 gemessen werden. In **Tabelle 2.2** sind einige wichtige Angaben zu den eingesetzten Sensoren aufgelistet.

Tabelle 2.1 Anforderungen an ein Messsystem für Langzeitmessungen an Holzfeuerungen

Messgröße	Messbereich
Sauerstoff	0-21 Vol%
Stickstoffoxide (NO _x)	0-500 ppm
Produkte unvollständiger Verbrennung (Summe Kohlenmonoxid CO und gasförmige organische Verbindungen HC)	< 500 bis > 5.000 ppm
Temperatur	0-500° C
Unterdruck im Schornstein	0-100 Pa
Randbedingungen im Abgas	Abgasgeschwindigkeit < 0,5 bis 3 m/s u.U. hohe Partikelkonzentrationen (Aschebestandteile, Ruß, Teere) Abgasfeuchte (einige Vol% bis > 15 Vol%)
Standzeit	eine Heizperiode (mindestens 1.000 h)

Tabelle 2.2 Angaben zu den eingesetzten Abgassensoren

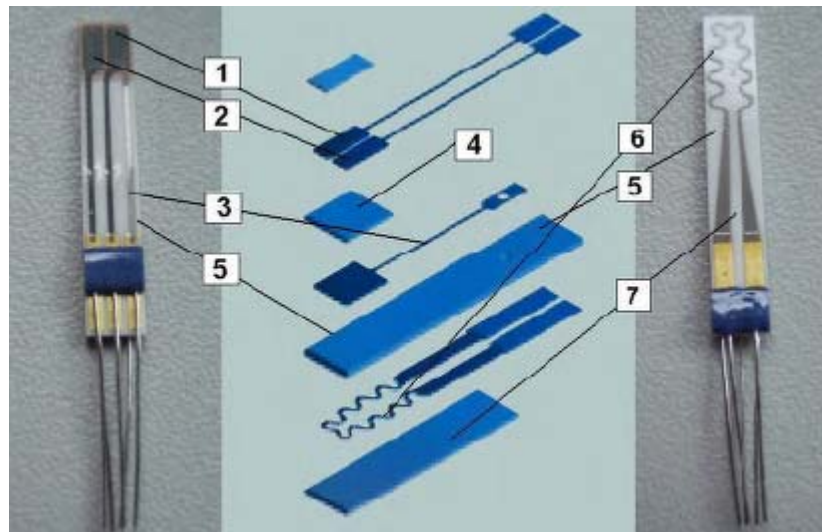
Messgröße	Summe CO+HC	NO _x und O ₂
Hersteller	ESCUBE SpaceSensor Systems GmbH, Stuttgart	Siemens VDO Automotive AG, Schwalbach am Taunus und NGK Insulators LTD., Nagoya, Japan
Typ	CarboSEN	Smart NO _x -Sensor *
Messprinzip	Mischpotenzial (Festkörperelektrolytsensor ohne Gleichgewichtselektrode - „Nicht-Nernst“)	O ²⁻ - Ionenleitung, NO _x -Reduktion,
Ausführung	katalytisch selektive Elektroden	Doppelkammerprinzip
Trägermaterial	ZrO ₂	ZrO ₂
Arbeitstemperatur	550 °C	800 °C
Ausgangssignal	CO+HC: V	NO _x : ppm v/v NO / O ₂ : Vol%
Angabe in Bericht	CO: mg/m ³ ** VOC: mg/m ³ , berechnet als C **	NO _x : mg/m ³ , berechnet als NO ₂ O ₂ : Vol%
* gemessen wird NO		
** Näherungsweise Berechnung aus Summensignal (siehe Kapitel 4)		

Sensor für brennbare Gase (CO+HC)

Die Leitfähigkeit für Sauerstoffionen kann herangezogen werden, um in verschiedenen Konfigurationen Sensoren aufzubauen. Beim klassischen Design trennt der Elektrolyt zwei mit unterschiedlichen Konzentrationen gefüllte Kammern. Der Konzentrationsunterschied erzeugt ein von der Sauerstoffkonzentration logarithmisch abhängiges Spannungssignal, das mit zwei Elektroden abgegriffen werden kann. Beim CO-Sensor liegen beide Elektroden in der Messkammer, so

ist das resultierende Sensorsignal entkoppelt von der jeweiligen Sauerstoffkonzentration. Die Sensitivierung gegenüber CO und anderen oxidierbaren Gasen wird nun durch die Variation des Sensoraufbaus und durch eine geeignete Modifikation der Elektroden in Geometrie und Material erreicht. Dabei wird eine Elektrode bezüglich CO aktiviert und die andere passiviert. Das Messsignal entsteht durch die unterschiedliche Adsorption oxidierbarer Gase an den beiden Elektroden. Dort laufen charakteristische elektrochemische Reaktionen ab und es bilden sich unterschiedliche Elektrodenpotenziale aus. Die Potenzialdifferenz zwischen den Elektroden wird schließlich als Spannung abgegriffen (Escube, 2007). Der Sensor hat eine gewisse Querempfindlichkeit gegenüber NO_x, Feuchte und O₂ (Menesklou, 2007).

In **Bild 2-1** ist die Vorder- und Rückseite des Sensorelements dargestellt. Es besteht aus drei Elektroden, die jeweils einen eigenen Anschluss besitzen. Beide Funktionselektroden (1) und (2) bestehen zum größten Teil aus Platin sowie einem gleichen Goldanteil. Das Sensorsignal wird nach dem Mischpotenzialprinzip an einer Bezugs- bzw. Referenzelektrode (3) aus Platin erzeugt. Die zweite Funktionselektrode (2) dient nur als Ersatz und kann durch entsprechende Veränderung des Sensoranschlusses verwendet werden. Zwischen den Elektroden befindet sich die Funktionskeramik aus Yttriumdotiertem Zirkonoxid (4), das ab einer Temperatur von 400 °C ionenleitend wird. Die Trägersubstanz der Elektroden (5) besteht aus Aluminiumoxid. Durch Anlegen einer entsprechenden Spannung an die Heizwendel (6) kann das Sensorelement auf eine gewünschte Temperatur erwärmt werden. Das Heizelement besteht wiederum aus Platin und ist durch eine Glasdeckschicht (7) geschützt (Teichler, 2008).



- | | |
|---------------------------------------|------------------|
| 1 Funktions-Elektrode | 5 Trägersubstanz |
| 2 Zusatz- (bzw. Redundanz-) Elektrode | 6 Heizwendel |
| 3 Bezugselektrode | 7 Deckschicht |
| 4 Funktionskeramik | |

Bild 2-1 Aufbau des Mischpotenzialsensors CarboSEN der Firma ESCUBE

Sensor für NO_x und O₂

Der eingesetzte NO_x-Sensor (siehe **Bild 2-2**) basiert auf dem amperometrischen Doppelkammerprinzip und kann NO und NO_x sowie O₂ messen.



Bild 2-2 Smart NO_x-Sensor von Siemens VDO

Der Sensor ist aus zwei Kammern aufgebaut, wie in **Bild 2-3** schematisch dargestellt. Das Abgas diffundiert über eine Barriere in die vordere Kammer, in welcher über eine Regelung eine Sauerstoffkonzentration von 1000 ppm v/v eingestellt wird. Bei diesem definierten Sauerstoffgehalt bleibt das Stickstoffmonoxid stabil. Das Abgas gelangt über eine zweite Diffusionsbarriere in die hintere Kammer, in der sich das Stickstoffmonoxid an einer katalytisch aktiven Rh/Pt-Cermetelektrode zersetzt. Durch das Anlegen einer festen Pumpspannung wird der komplette Sauerstoff aus der hinteren Kammer gepumpt.

Der Pumpstrom ist abhängig von der Sauerstoffkonzentration in der hinteren Kammer und somit auch abhängig vom NO-Gehalt im Abgas. Die Gesamtsauerstoffkonzentration in der hinteren Kammer ergibt sich aus der Addition vom Sauerstoffgehalt in der ersten Kammer und freiwerdendem Sauerstoff aus den Stickoxidverbänden. Mit diesem Sensor kann sowohl die NO-Konzentration im Abgas als auch der aktuelle O₂-Wert gemessen werden.

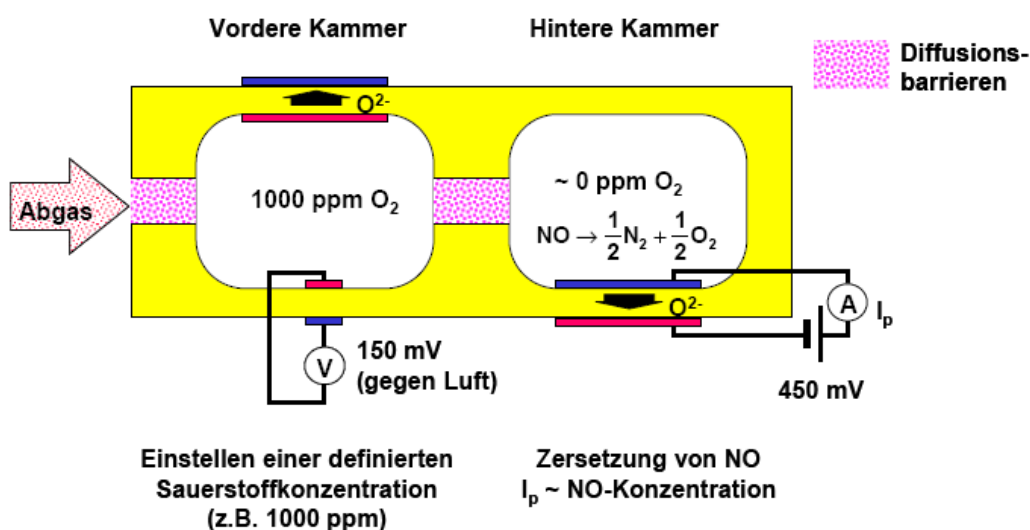


Bild 2-3 Funktionsprinzip des amperometrischen NO_x-Sensors /Menesklou, 2007/

2.1 Aufbau der Messboxen

Aufbauend auf den Erfahrungen bei den vorangegangenen Prüfstandsmessungen und den Anforderungen an ein sehr mobiles, wartungsarmes und kompaktes Messsystem wurden für den Einsatz im Feldtest vier Messboxen mit folgender Konfiguration erstellt:

- **Sensoren:**
CarbonSen von ESUBE für Summenmessung CO+HC (brennbare Abgasbestandteile)
NO_x-Sensor von NGK Spark Plug Europe für NO_x und O₂
- **zusätzliche Parameter:**
Druckmessumformer der Serie PTSXR von Airflow (Messbereich 0-100 Pa)
NiCr-Ni Thermoelemente für Abgastemperatur und Außen- bzw. Raumtemperatur
- **Hardware, Software:**
Panel-PC mit Betriebssystem Windows XP und Messsoftware LabView
Netzteile für Sensoren
CAN-Bus-Empfänger
GSM-Modul (Modem) für den Datenversand
A/D-Wandler (8 Kanäle)
Thermoelement-Modul, Druckmessmodul
USB-Hub.

Sämtliche Anschlüsse (USB, Netzkabel, D-Sub 25 und Com 1, Thermoelemente, HC+CO und NO_x/O₂-Sensor sowie Druckmessdose) und die Antenne für das GSM-Modul sind auf der Vorderseite der Messboxen angebracht. Auf der Rückseite befindet sich nur der Anschluss für die Stromversorgung und ein Netzschalter. Das Blockschaltbild der Messboxen ist in **Bild 2-4**, die Ansichten von oben und vorne sind in **Bild 2-5** dargestellt.

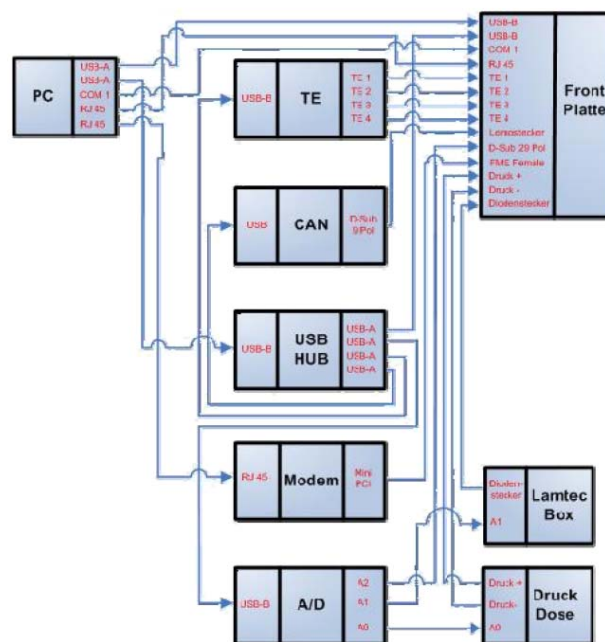


Bild 2-4 Blockschaltbild der Messboxen

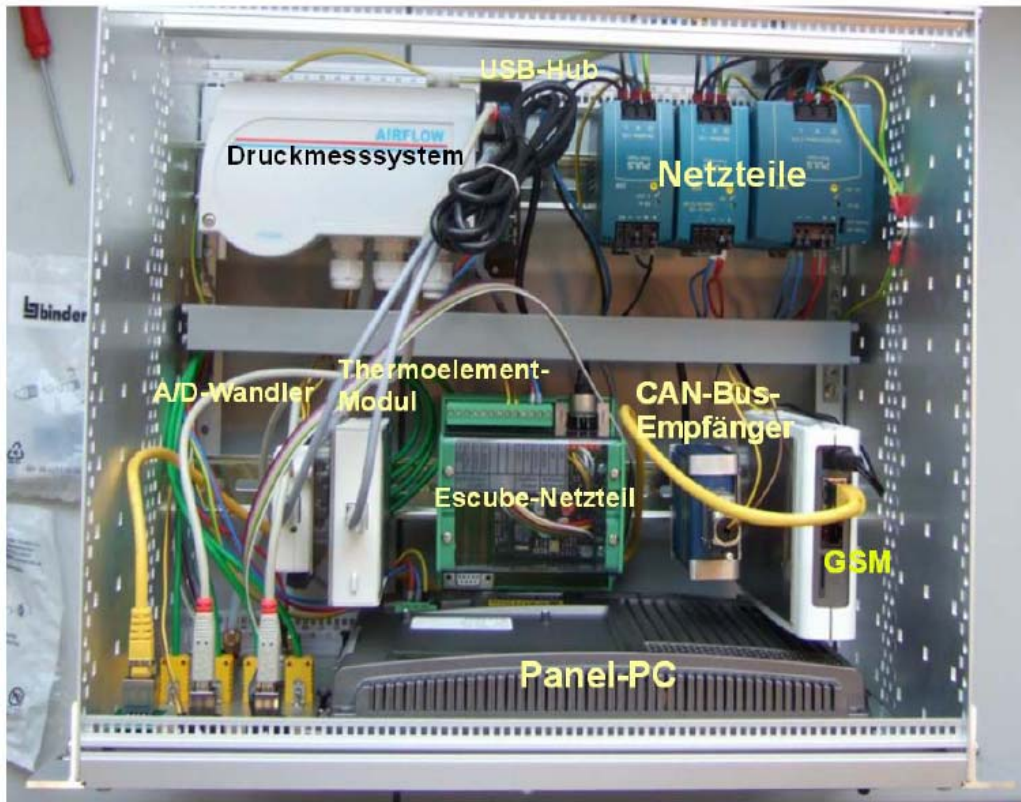


Bild 2-5 Ansichten der Box von oben und vorne

Die Messwerte der Abgassensoren, der Thermoelemente und des Druckmessumformers werden vom Messwerterfassungsprogramm im Sekundentakt abgefragt und als Minuten-Mittelwerte auf der Festplatte des PC abgelegt. Daraus werden 5-Minuten-Mittelwerte gebildet, die per Email täglich versendet werden. Durch den E-Mail-Versand sollte eine laufende Funktionskontrolle der Messboxen erreicht werden, andererseits war geplant, die Auswertungen anhand

der 5-Minuten-Mittelwerte parallel der Messungen vorzunehmen. Leider konnte an zwei Messstellen trotz einer Antennenverlängerung keine zuverlässige Verbindung zu Mobilfunknetzen aufgebaut werden, so dass eine regelmäßige Messwertübertragung nicht stattfand. Außerdem wurden zwei etwas unterschiedliche Anwenderversionen für den automatisierten E-Mail-Versand genutzt, bei der nur eine Version stabil funktionierte. Letztlich wurden nur von einer Messstelle zuverlässig Daten übertragen.

Die Messboxen sind so programmiert, dass nach einer Unterbrechung der Spannungsversorgung das Messwerterfassungs- und Datenübertragungsprogramm automatisch wieder gestartet wird. Die gestarteten Programme laufen passwortgeschützt, so waren Eingriffe durch die Betreiber ausgeschlossen.

Um die Datenmenge der Langzeitmessungen zu begrenzen war eigentlich geplant, die komplette Auswertung nur mit den 5-Minuten-Mittelwerte vorzunehmen. Ein Vergleich von 1- und 5-Minuten-Mittelwerten zeigte allerdings, dass doch zu viele Informationen über den aktuellen Betriebszustand der Feuerungsanlagen durch die längere Mittelwertszeit verloren gehen. Dies sind z.B. die erreichten Spitzenkonzentrationen bei bestimmten Betriebszuständen (z.B. bei Start- und Regelvorgängen) oder das Regelverhalten der Feuerungsanlage, was beispielhaft in **Bild 2-6** für die Messbox 2 für einige Stunden eines Messtages gezeigt wird. Deshalb wurden alle Auswertungen mit den 1-Minuten-Mittelwerten vorgenommen.

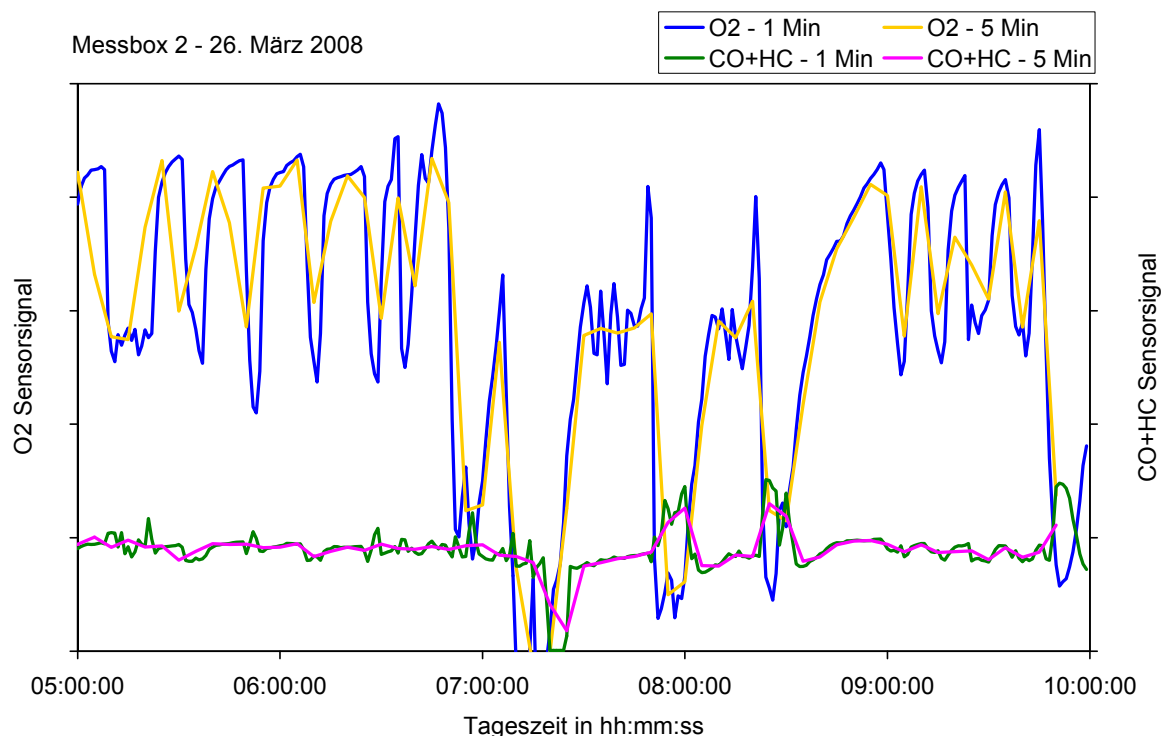


Bild 2-6 Beispielhafte Verläufe der 1- und 5-Minuten-Mittelwerte für die Sensorsignale O₂ und CO+HC bei der Messbox 2 am Messtag 26.3.2008

3 Für Feldtest ausgewählte Feuerungsanlagen

Für die Feldmessungen wurden vier Feuerungsanlagen als typische Vertreter für Pelletkessel, mechanisch beschickten Holzkessel im Holzver- und bearbeitenden Gewerbe, sowie handbeschickte Stückholzkessel und Einzelraumfeuerstätten (z.B. Kaminöfen) ausgewählt. An Brennstoffen wurden die von den Betreibern der Anlagen üblicherweise eingesetzten Heizmaterialien verwendet. Stichprobenartig wurden Proben entnommen und die Wassergehalte der Brennstoffe bestimmt (siehe Kapitel 4.3).

Der Betrieb der Feuerungsanlagen erfolgte in praxisüblicher Art und Weise entweder automatisch bei den mechanisch beschickten Anlagen oder durch die Betreiber bei den handbeschickten Anlagen. Mögliche Einflüsse auf das Betreiberverhalten durch die Messungen können als gering angesehen werden, da die Messboxen z.T. nicht im direkten Blickfeld der Betreiber installiert waren und der Bildschirm nach einer Aktivierung nach wenigen Minuten wieder abgeschaltet wird. Somit ist eine laufende Kontrolle der Anzeigenwerte durch die Betreiber kaum möglich.

Vor und nach dem Feldtest wurden mit den Messboxen Vergleichsmessungen mit Standardmessverfahren an Feuerungsanlagen im Technikum des IVD durchgeführt. Hierbei wurden die Abweichungen der Sensorsignale zu den Standardmessverfahren, die hier als Referenzmessverfahren verwendet wurden, ermittelt. Anhand der Abweichungen wurden Korrekturfaktoren berechnet, die zur Überarbeitung der Feldmessergebnisse herangezogen wurden. Die Messboxen 1 und 2 wurden bei den Vergleichsmessungen an einem Pelletofen und die Messboxen 3 und 4 an einem Kachelofen-Heizeinsatz eingesetzt.

3.1 Messbox 1 - Pelletfeuerung

Die Messbox 1 wurde an einer Pelletfeuerung (siehe **Bild 3-1**) in einem größeren Wohnobjekt installiert. Bei der Feuerung handelt es sich um eine Vorschub-Rostfeuerung, die eigentlich für Hackschnitzel entwickelt und jetzt für die Pelletverbrennung modifiziert wurde. Bei den Pellets handelte es sich um übliche Handelsware nach DIN 51 731 (1996) mit einem Wassergehalt von 6,9 %. Die Brennstoffbeschickung aus dem Vorratsraum erfolgt über 2 durch eine Zellrad-schleuse getrennte Förderschnecken.

Die zwei vorhandenen Heizkreise werden mit fest eingestellten Vorlauftemperaturen betrieben. Die Heizkreispumpen sind ganztätig in Betrieb und werden ggf. Außentemperaturabhängig ausgeschaltet. Warmwasser wird über einen Warmwasserspeicher bereitgestellt, die Warmwasserzirkulationspumpe ist ganztätig in Betrieb. Die Heizungsregelung kann auf Winterbetrieb (Heizkessel bleibt immer in Betrieb, ggf. im Gluterhalt bei sehr geringen Wärmeabnahmen) und Übergangs- und Sommerbetrieb (Heizkessel schaltet bei sehr geringem Wärmebedarf ab) eingestellt werden. Beide Betriebsmodi wurden während den Messungen erfasst.

Die Sensoren, das Thermoelement sowie der Anschluss für die Druckmessung im Abgasrohr wurden im Deckel einer Reinigungsöffnung in einem 90°-Bogen installiert. Der Bogen befand sich hinter einem dem Kessel nachgeschalteten Multizyklon, weshalb die Abgastemperaturen vergleichsweise niedrig waren. Aufgrund eines am Schornsteinkopf installierten Saugzuggebläses war der Unterdruck im Abgasrohr deutlich höher als bei einem Naturzugbetrieb.



Bild 3-1 Messbox 1 eingesetzt am Pelletkessel und Einbausituation der Sensoren im Abgasrohr sowie Sondenverschmutzung am Ende des Feldtests

Im folgenden sind wesentliche Angaben zum Heizkessel, dessen Einsatzzweck und die Messdauer aufgelistet:

Brennstoff:	Holzpellets
Objekt:	Mehrfamilienhaus
Einsatzzweck:	Heizung und Warmwassererzeugung
Hersteller der Feuerungsanlage:	Fröling
Feuerungstyp:	Turbomat 320
Baujahr:	2006
Nennwärmeleistung:	320 kW
Zulässiger Betriebsdruck:	6 bar
Zulässige Vorlauftemperatur:	110 °C
Wasserinhalt Heizkessel:	560 l
Speicher:	Pufferspeicher und Warmwasserspeicher
Betriebszeit:	ganzjährig
Vergleichsmessung I:	05.02.2008
Beginn Feldtest:	05.02.2008
Ende Feldtest:	03.06.2008
Messdauer:	120 Tage
Vergleichsmessung II:	26.06.2008

3.2 Messbox 2 - Feuerung für gewerbliche Holzreste

Die Messbox 2 wurde an einer Feuerung für gewerbliche Holzreste (siehe **Bild 3-2**) in einer Schreinerei installiert. Bei der Feuerung handelt es sich um eine Kombination aus Unterschub- und Stückholzfeuerung. Im mechanisch beschickten Unterschubteil des Kessels wurden Resthölzer aus den Absaugungen der Holzbearbeitungsmaschinen verfeuert. Die Brennstoffförderung erfolgte mittels Förderschnecken aus dem außen liegenden Brennstoffsilo. Stückiges Holz wurde bei höherem Wärmebedarf (meist morgens nach der Nachtabsenkung) zusätzlich vom Betreiber in die Feuerung gegeben. Hierbei fand dann in der Regel ein Parallelbetrieb von Unterschub- und Stückholzabbrand statt. Bei den Resthölzern handelte es sich vor allem um Rückstände und Verarbeitungsreste aus der laufenden Produktion der Schreinerei, in der im wesentlichen Holzwerkstoffe (Spanplatten mit und ohne Beschichtungen) verarbeitet werden. Größere Restholzstücke und naturbelassenes Holz (meist Laubhölzer) wurden von Hand entsprechend der maximalen Beschickungsgröße aufgearbeitet. Der Wassergehalt von Resthölzern liegt üblicherweise unter 10 %, das verfeuerte naturbelassene Stückholz wurde einige Jahre gelagert und war gut lufttrocken, d.h. der Wassergehalt war < 20 %.

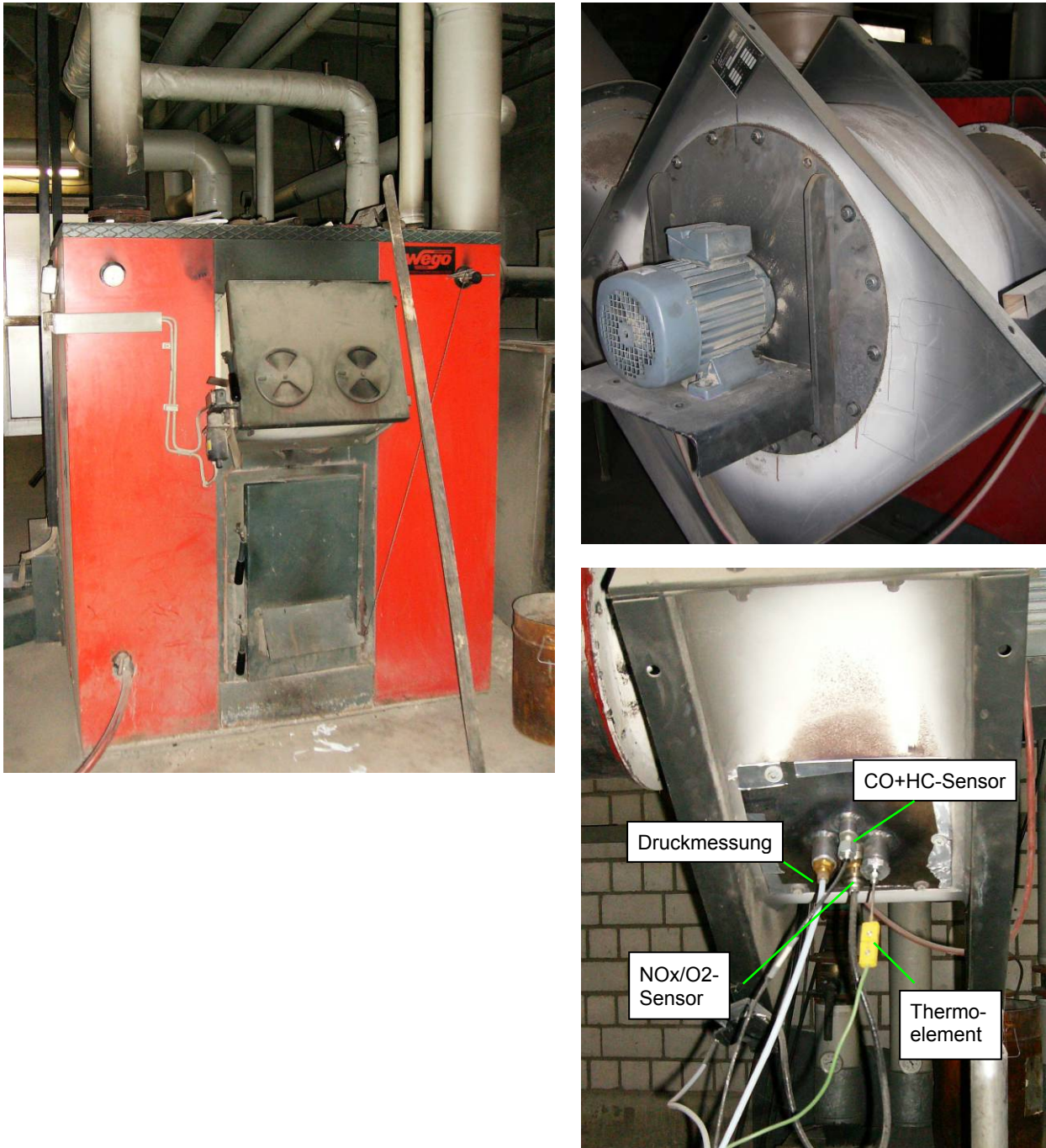


Bild 3-2 Messbox 2 eingesetzt an der gewerblichen Holzfeuerung, Saugzuggebläse am Kessel-
ausgang und Einbausituation der Sensoren an der Unterseite des Saugzuggebläses

Die Sensoren, das Thermoelement sowie der Anschluss für die Druckmessung im Abgasrohr wurden im Deckel einer Reinigungsöffnung an der Unterseite des Kessel-Saugzuggebläses im Bereich des Gebläseausgangs installiert. Aufgrund der Einbausituation, eine andere Einbaumöglichkeit war leider nicht vorhanden, lagen die Sensoren im Bereich hoher und turbulenter Strömungen, die durch das Laufrad des Gebläses verursacht wurden.

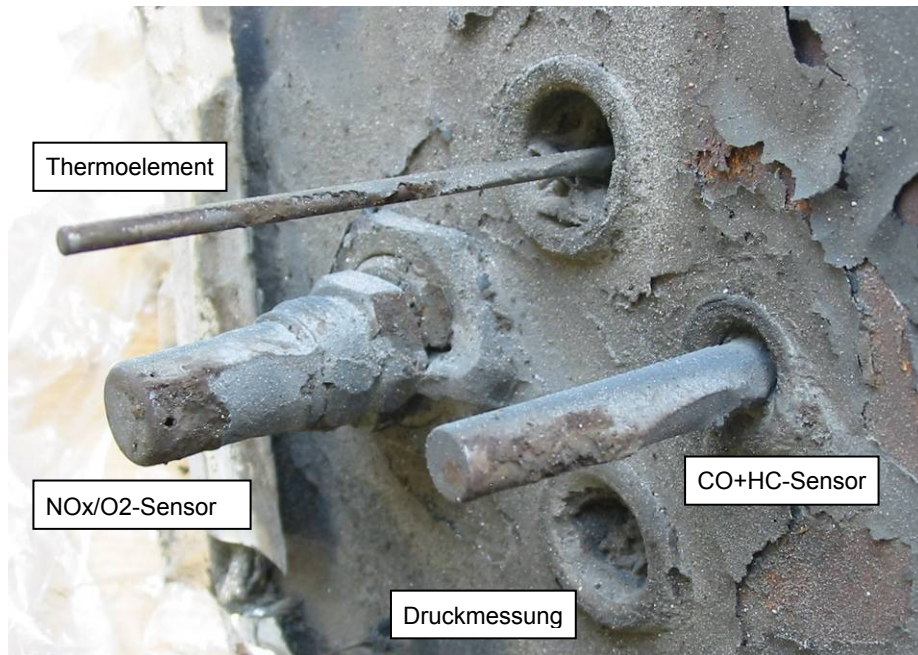


Bild 3-3 Zustand der Sonden von Messbox 2 am Ende des Feldtests

Im folgenden sind wesentliche Angaben zum Heizkessel, dessen Einsatzzweck und die Messdauer aufgelistet:

Brennstoff:	Resthölzer und Stückholz
Objekt:	Betriebsgebäude einer Schreinerei
Einsatzzweck:	Heizung
Hersteller der Feuerungsanlage:	Spänex
Feuerungstyp:	SRW-V-430
Baujahr:	1985
Nennwärmeleistung:	430 kW
Zulässiger Betriebsdruck:	3 bar
Zulässige Vorlauftemperatur:	95 °C
Wasserinhalt Heizkessel:	1.395 l
Speicher:	keine
Betriebszeit:	Heizperiode
<hr/>	
Vergleichsmessung I:	05.02.2008
Beginn der Messungen:	08.02.2008
Ende der Messungen:	03.06.2008
Messdauer:	117 Tage
Vergleichsmessung II:	25.07.2008

3.3 Messbox 3 - Stückholzkessel

Die Messbox 3 wurde an einem Stückholzkessel (siehe **Bild 3-4**) in einem Einfamilienhaus installiert. Bei der Feuerung handelt es sich um einen Naturzug-Stückholzkessel mit Rost und unterem hinterem Abbrand. Die Leistungsregelung des Heizkessels erfolgt eigentlich über einen Feuerzugregler, der in Abhängigkeit der Kesselwassertemperatur (Abweichung zwischen Ist- und Sollwert) die Primärluftmenge regelt. Feuerzugregler und Primärluftklappe sind über eine Zugkette verbunden. Wird die Kesselwasser-Solltemperatur erreicht, schließt die Primärluftklappe nahezu vollständig. Die Einstellung der Sekundärluft mittels eines Drehschiebers in der Füllraumbür muss vom Betreiber vorgenommen werden. Der Feuerzugregler wurde vom Betreiber außer Betrieb gesetzt, die Leistungsregelung erfolgte durch Betreibereingriffe. Als Brennstoff wurde lufttrockenes Stückholz (überwiegend Buchenholz) mit einem Wassergehalt von 12,8 % verfeuert.



Bild 3-4 Messbox 3 eingesetzt am Stückholzkessel und Einbausituation der Sensoren im Abgasrohr sowie Sondenverschmutzung am Ende des Feldtests

Die Sensoren, das Thermoelement sowie der Anschluss für die Druckmessung im Abgasrohr wurden im Deckel einer Reinigungsöffnung zwischen Kesselausgang und Schornsteinanschluss installiert.

Im folgenden sind wesentliche Angaben zum Heizkessel, dessen Einsatzzweck und die Messdauer aufgelistet.

Brennstoff:	Stückholz (Buchenholz)
Objekt:	Einfamilienhaus
Einsatzzweck:	Heizung und Warmwasser
Hersteller der Feuerungsanlage:	Windhager
Feuerungstyp:	FKU16
Baujahr:	2001
Nennwärmeleistung:	12,7 kW
Zulässiger Betriebsdruck:	3 bar
Zulässige Vorlauftemperatur:	90 °C
Wasserinhalt Heizkessel:	55 l
Speicher:	Kombispeicher
Betriebszeit:	ganzzjährig
<hr/>	
Vergleichsmessung I:	12.02.2008
Beginn der Messungen:	13.02.2008
Ende der Messungen:	06.06.2008
Messdauer:	115 Tage
Vergleichsmessung II:	21.08.2008

3.4 Messbox 4 - Kaminofen

Die Messbox 4 wurde an einem Kaminofen (siehe **Bild 3-5**) in einem Einfamilienhaus installiert. Bei der Feuerung handelt es sich um eine Durchbrandfeuerung mit Verbrennungsrost, die für Stückholz und Kohlenbrennstoffe geeignet ist. Der Kaminofen hat einen Primärluft- und einen Sekundärluftschieber sowie eine Drosselklappe im Abgasrohr. Die Wärmeabgabe an den Aufstellungsraum erfolgt über Konvektion und Strahlung. Typisch für Kaminöfen ist die große Sichtscheibe des Heizgerätes. Der Kaminofen wird als reine Zusatzfeuerung im Winter und der Übergangszeit, meist in den Abendstunden, betrieben. Als Brennstoff wird luftgetrocknetes Buchen- und Fichtenholz mit einem Wassergehalt im Bereich von 12 % verfeuert.

Die Sensoren, das Thermoelement sowie der Anschluss für die Druckmessung im Abgasrohr wurden im Deckel einer Reinigungsöffnung zwischen Ofenausgang und Schornsteinanschluss installiert.

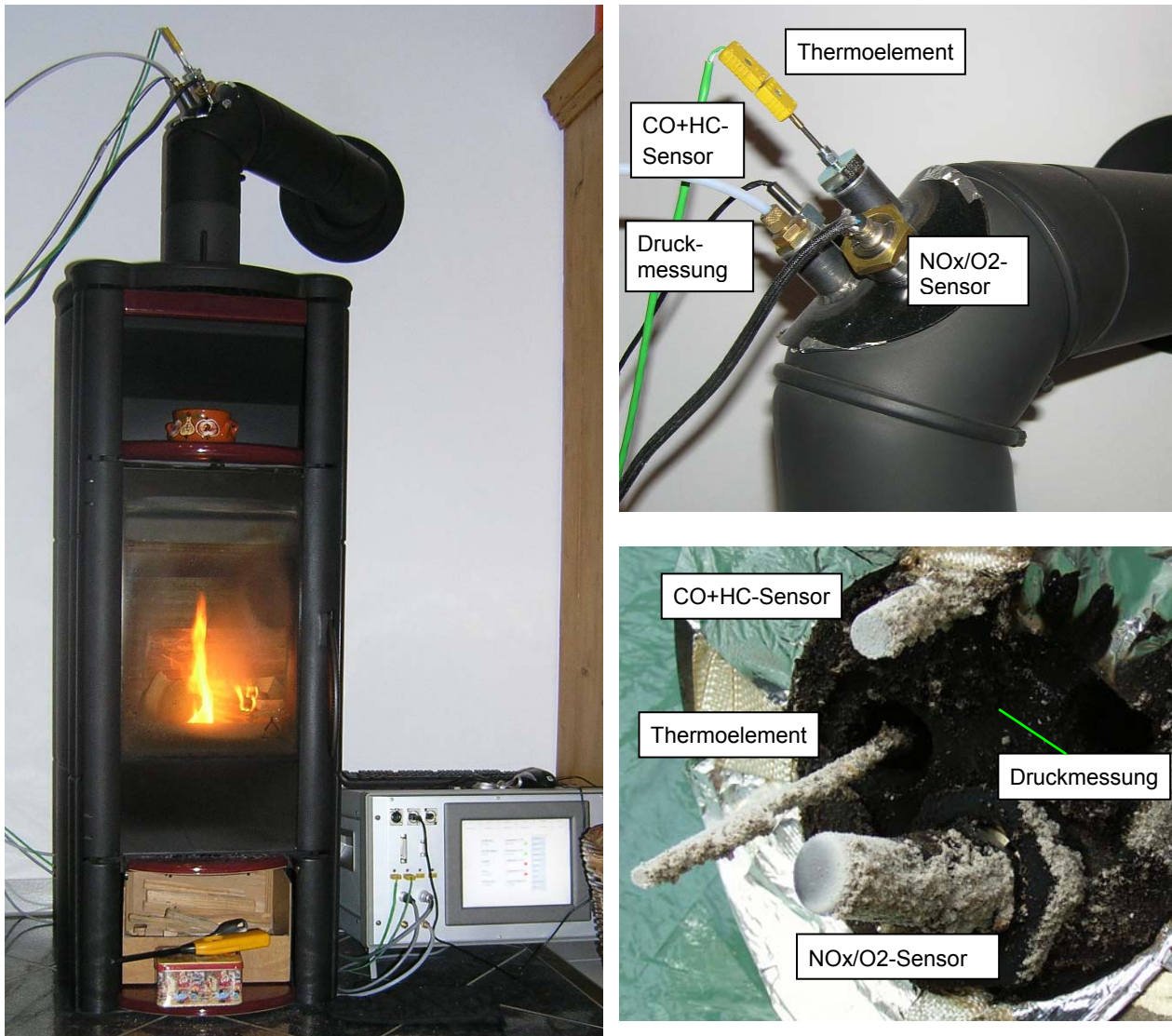


Bild 3-5 Messbox 4 eingesetzt am Kaminofen und Einbausituation der Sensoren im Abgasrohr sowie Sondenverschmutzung am Ende des Feldtests

Im folgenden sind wesentliche Angaben zum Kaminofen, dessen Einsatzzweck und die Messdauer aufgelistet:

Brennstoff:	Stückholz (Fichten- und Buchenholz)
Objekt:	Einfamilienhaus
Einsatzzweck:	Zusatzfeuerung
Hersteller der Feuerungsanlage:	Austroflamm
Feuerungstyp:	Kaminofen Stola
Baujahr:	1997
Nennwärmeleistung:	7 kW
Betriebszeit:	Heizperiode / Übergangszeit
<hr/>	
Vergleichsmessung I:	12.02.2008
Beginn der Messungen:	13.02.2008
Ende der Messungen:	21.05.2008
Messdauer:	99 Tage
Vergleichsmessung II:	21.08.2008

4 Vergleichsmessungen mit Standardmesstechnik

Zur Ermittlung von Abweichungen der Sensorsignale zu den Standardmessverfahren wurden vor und nach dem Feldtest mit den Messboxen Vergleichsmessungen mit konventioneller Messtechnik an Feuerungsanlagen im Technikum des IVD durchgeführt. Die hierbei eingesetzten Standardmessverfahren werden als Referenzmessverfahren verwendet.

Die ermittelten Abweichungen zwischen den Sensorsignalen der Messboxen und den Standardmessverfahren sollen zur Korrektur der Feldmessergebnisse herangezogen werden. Korrigiert werden können systematische Abweichungen und, eingeschränkt, auch Driften der Sensorsignale. Diese können u.U. vorliegen, wenn sich die Empfindlichkeit der Sensoren aufgrund von Abgasbestandteilen (z.B. Kalium) im Lauf der Zeit ändert. Eine Korrektur erfolgt dann unter der Voraussetzung, dass eine über die Feldtestzeit lineare Änderung der Empfindlichkeit erfolgt. Sprunghafte Änderungen können nachträglich nicht mehr korrigiert werden.

Außerdem soll mit den Vergleichsmessungen der Versuch unternommen werden, mit einem Näherungsverfahren das Summensignal des ESCUBE CarboSEN CO+HC-Sensors, welches als Spannungssignal in V vorliegt, in eine CO- und VOC-Konzentration umzurechnen. Der Sensor wurde für den Einsatz in sensorgesteuerten CO-Regelungen zur Optimierung der Verbrennungsprozesse entwickelt. Für dieses Regelkonzept ist es notwendig, dass CO (und organische Verbindungen) mit hoher Empfindlichkeit und zuverlässig detektiert werden. Hierbei wird die Feuerung nahe dem CO-Anstieg, der durch Luftmangel verursacht wird, betrieben. Der Sensor muss also so empfindlich sein, dass der Anstieg der CO-Konzentration bei Beginn des Luftmangelbetriebs erkannt wird. Hierbei ist allerdings die Konzentration der Stoffe zweitrangig, d.h. unterschiedliches Ansprechverhalten der Komponenten, Änderungen in der Empfindlichkeit oder im Ansprechverhalten des Sensors während seiner Einsatzzeit können in einem gewissen Rahmen toleriert werden.

Die Messboxen 1 und 2 wurden bei den Vergleichsmessungen an einem Pelletofen und die Messboxen 3 und 4 an einem Kachelofen-Heizeinsatz im Technikum des Instituts eingesetzt.

4.1 Vergleichsmessung von Messbox 1 und 2 am Pelletofen

Der eingesetzte Pelletofen gibt seine Wärme über Konvektion und Strahlung an den umgebenden Raum ab. Aus dem Vorratsbehälter werden die Pellets über eine Förderschnecke in einem Steigrohr bis zur Öffnung einer Fallstrecke gefördert, über welche sie in eine Brennschale gelangen (siehe **Bild 4-1**). Die Zündung erfolgt mit einem Heißluftgebläse. Verbrennungsluft wird über Luftdüsen in den Brennertopf zugeführt. Die Heizleistung des Gerätes kann in vier Stufen (1-kleinste Leistung bis 4-maximale Leistung) variiert werden (technische Daten siehe **Tabelle 4.1**). Jeder Leistungsstufe liegt ein fest eingestellter Wert für Verbrennungsluft- und Brennstoffmenge zugrunde.

Damit bei den Vergleichsmessungen möglichst unterschiedliche O₂-, CO- und VOC-Konzentrationen gemessen werden konnten, wurde der Pelletofen in den Leistungsstufen 1 und 4 sowie in der Leistungsstufe 4 mit verminderter Verbrennungsluft betrieben. Als Brennstoff wurden handelsübliche Holzpellets nach DIN 51 731 (1996) verwendet.

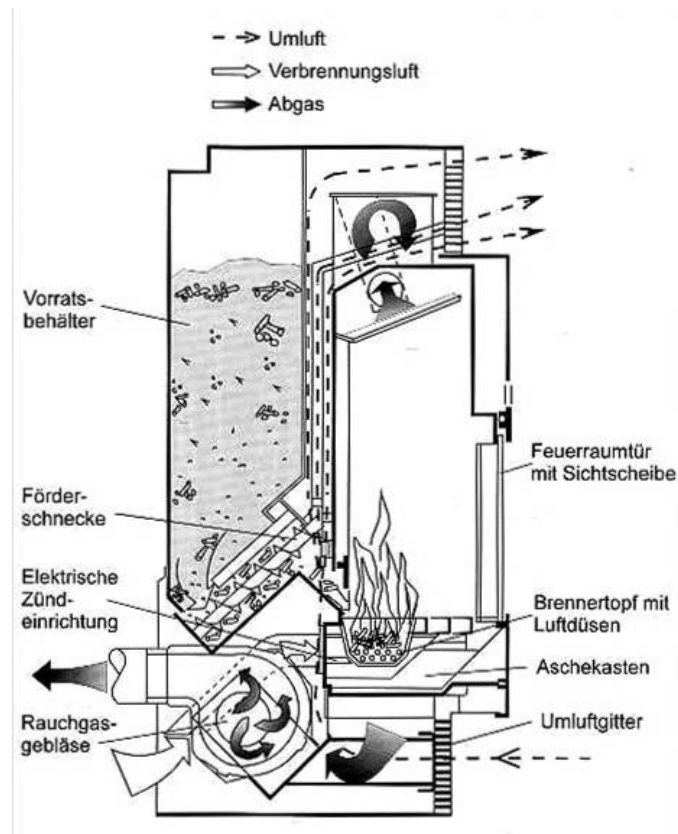


Bild 4-1 Beispielhafter Aufbau eines Pelletofens (FNR, 2007)

Tabelle 4.1 Technische Daten des eingesetzten Pelletofens

Hersteller	Buderus BBT Thermotechnik GmbH, Wetzlar
Typ	Blueline Pellet_1
Baujahr	2006
Nennwärmeleistung	2,9 kW – 7,6 kW
Inhalt Pellettank	41 l (26,5 kg Pellets)

4.2 Vergleichsmessung von Messbox 3 und 4 am Heizeinsatz

Bei dem für die Untersuchungen eingesetzten Kachelofen-Heizeinsatz (schematischer Aufbau und Frontseite siehe **Bild 4-2**) handelt es sich um eine relativ einfach aufgebaute Durchbrand-Feuerung. Zur Leistungsregelung sind ein Brennstoffwähler auf der Rückseite der Aschetür und drei Luftschieber in den beiden Fronttüren vorhanden. Der Feuerraum des Heizeinsatzes ist mit Schamotteplatten eingefasst. Die Abgase werden an der Feuerraumdecke durch eine schräg stehende Schamotteplatte umgelenkt und anschließend über ein Heizgasrohr zu einem Guss-eisen-Wärmetauscher (Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion) geführt. Der Wärmetauscher ist über ein Verbindungsstück an einen gemauerten, in der Versuchshalle stehenden Schornstein angeschlossen. Oberhalb der Schornsteinmündung ist eine Absaughaube montiert,

die an ein Saugzuggebläse angeschlossen ist. Zur groben Einstellung des gewünschten Unterdrucks im Verbindungsstück wurde eine vor dem Saugzuggebläse vorhandene Drosselklappe und der Abstand zwischen Absaughaube und Schornsteinmündung verwendet. Die Feineinstellung wurde dann mit einem Zugbegrenzer vorgenommen, der im Verbindungsstück montiert war. Die technischen Daten des Heizeinsatzes sind in **Tabelle 4.2** aufgeführt.

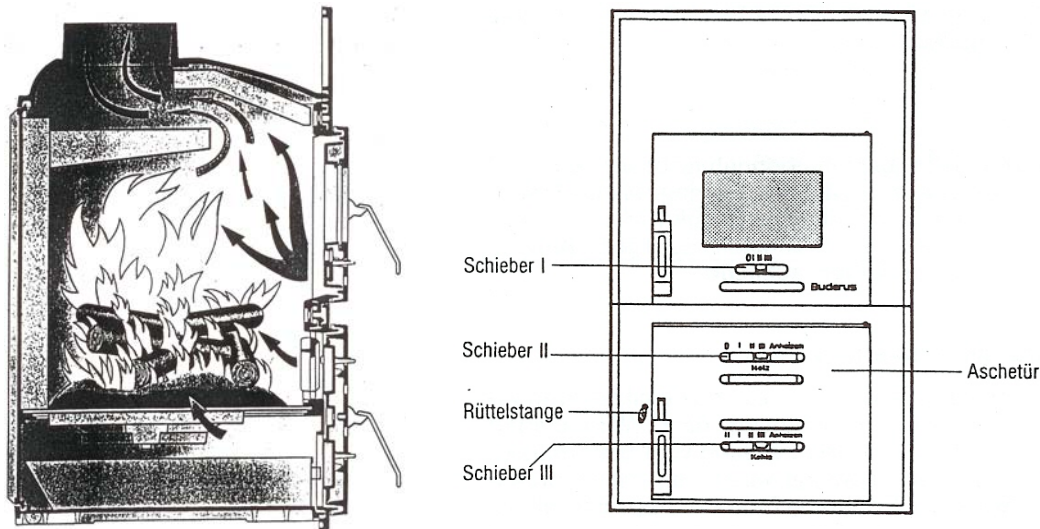


Bild 4-2 Schematischer Schnitt und Frontseite des Heizeinsatzes (Buderus, 1995)

Tabelle 4.2 Technische Daten des eingesetzten Heizeinsatzes

Hersteller	Buderus Heiztechnik GmbH
Typ	Kandern WB 25
Baujahr	1998
Nennwärmeleistung	8 kW
zugelassene Brennstoffe	Scheitholz, Holz – und Kohlebriketts
vorhandene Einstelleinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoffwähler (auf Holzbrennstoffe eingestellt) • Luftschieber I (in Fülltür, für Sekundärluft) • Luftschieber II (in Aschetür, für Holzabbrand) • Luftschieber III (in Aschetür, für Kohlenabbrand und zum Anfeuern)

Damit bei den Vergleichsmessungen möglichst unterschiedliche O_2 -, CO - und VOC -Konzentrationen gemessen werden konnten, wurde der Heizeinsatz bei unterschiedlichen Wärmeleistungen (im Bereich der Nennwärmeleistung und bei Teillast) sowie mit Stückholz und Holzbriketts betrieben.

Für die Vergleichsmessungen wurden die Abgassensoren der jeweiligen Messbox direkt in die das Abgasrohr der Feuerung eingebaut. An einen Messstutzen wurde die Druckmessdose der Messbox angeschlossen. Die Messstrecke ist in **Bild 4-3** beispielhaft für den Heizeinsatz dargestellt. Über einen weiteren Messstutzen erfolgte gleichzeitig die Entnahme der Abgasprobe für

die konventionelle Emissionsmessung. Kontinuierlich gemessen wurden die Konzentrationen an Sauerstoff (O_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), gasförmige Kohlenwasserstoffe (VOC) und Stickstoffoxiden (NO_x). Des Weiteren wurde der Unterdruck im Abgasrohr mit einer weiteren Druckmessdose gemessen.



- Absaugung konventionelle Messtechnik
- Anschluss Druckmessung IVD
- Abgassensoren
- Anschluss Druckmessung Messbox

Bild 4-3 Messstrecke beim Kachelofen-Heizeinsatz

Die Abgasprobe zur Messung der Kohlenwasserstoffkonzentration wurde über einen Quarzwattfilter (Vorabscheider), einen beheizten Filter und einer beheizten Pumpe abgesaugt und bis zum Messgerät gepumpt. Um eine Kondensation von Kohlenwasserstoffen und von Wasserdampf zu vermeiden, war hierbei der Probenahmeweg und das Messgerät auf ca. 160 °C beheizt. Das Probengas für die anderen Gasanalysatoren wurde zusätzlich über einen Messgaskühler zur Abscheidung des im Abgas enthaltenen Wasserdampfs den Messgeräten zugeführt. Die Abgaskonzentrationen von O_2 , CO_2 , CO und NO_x wurden somit im trockenen Abgas und die Konzentration an VOC im feuchten Abgas gemessen. Die verwendeten Messgeräte und Messprinzipien der konventionellen Messtechnik sowie die bei der Kalibrierung verwendeten Prüfgaskonzentrationen sind in **Tabelle 4.3** zusammengestellt.

Tabelle 4.3 Eingesetzte Messgeräte, deren Messprinzipien und verwendete Prüfgaskonzentrationen

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Prüfgaskonzentration	Messbereich
CO ₂ / CO	Binos, Fa. Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	CO ₂ : 12,0 u. 12,06 Vol% CO: 0,772 u. 0,798 Vol%	CO ₂ : 0-20 Vol% CO: 0-3 Vol%
CO	EL 3020, Fa. ABB	nicht dispersive Infrarotabsorption	193 u. 243 ppm v/v	0-3.000 ppm v/v
O ₂	EL 3020, Fa. ABB	Paramagnetismus	5,96 u. 8,12 Vol%	0-25 Vol%
VOC	FID123, Fa. Testa	Flammenionisation	80,7 ppm v/v (Propan)	0-1.000 ppm v/v
NO _x	CLD 700 EL ht, Fa. Tecan	Chemilumineszens	NO: 496 u. 492 ppm v/v	0-1.000 ppm v/v

Die Kalibrierung der Messgeräte erfolgte jeweils vor Beginn einer Messreihe. Sie wurde mittels Nullgas (Stickstoff) und Prüfgasen durchgeführt. Am Ende einer jeden Messreihe wurde eine Überprüfung (ohne Justierung) von Nullpunkt und Endpunkt vorgenommen. Gerätedriften wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Außerdem erfolgte eine Dichtigkeitsprüfung mit Nullgas (Stickstoff), um zu überprüfen, ob auf dem Weg zum Messgerät irgendwelche merklichen Konzentrationsänderungen auftreten. Dies konnte nicht festgestellt werden.

Die Ausgangssignale der Abgassensoren und des Druckmessumformers der Messbox sowie die Signale der konventionellen Messtechnik wurden mit einer Messwerterfassung als 10-Sekunden-Mittelwerte aufgezeichnet.

4.3 Versuchsdurchführung

Verfeuerte Brennstoffe

Bei den Verbrennungsversuchen mit dem Pelletofen wurden handelsübliche Pellets des Herstellers Hot'ts (A-5230 Mattighofen) nach DIN 51731 (Größenklasse HP5, Qualität DIN Plus) eingesetzt, die in 15 kg PE-Foliensäcke abgepackt waren (siehe **Bild 4-4a**). Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte nach dem Wärmeschränkverfahren gemäß DIN 52183 und ergab einen Wassergehalt von 8,1 %.

Am Heizeinsatz wurden Versuche mit abgelagertem Buchenholz durchgeführt (siehe **Bild 4-4c**). Der Wassergehalt des luftgetrockneten Buchenholzes betrug 14 %, was einer ca. 2-jährigen Lagerzeit entspricht. Außerdem wurden Holzbriketts befeuert, welche eine Brennstofffeuchte von 9 % hatten (siehe **Bild 4-4b**).

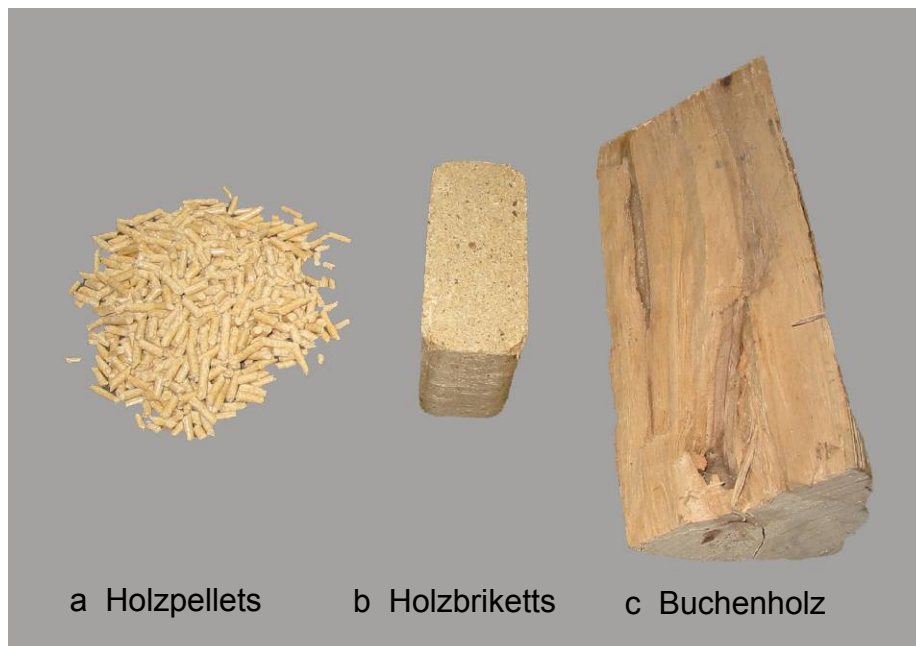


Bild 4-4 Brennstoffe bei Vergleichsmessungen

Durchgeführte Versuche

Der Pelletofen und der Heizeinsatz wurden bei normalen und geänderten Betriebsparametern betrieben, siehe **Tabelle 4.4**, wodurch eine große Bandbreite der praxisüblichen Emissionen abgedeckt wird.

Tabelle 4.4 Übersicht der durchgeführten Vergleichsmessungen

Feuerung	Versuchsparameter	
Pelletofen	Vergleichsmessung I und II mit Holzpellets	
	Leistungsstufe 4 (Nennwärmeleistung)	Wärmeleistung ca. 7,6 kW, normale und reduzierte Verbrennungsluftmenge
	Leistungsstufe 1 (kleinste Leistung)	Wärmeleistung ca. 2,9 kW, normale Verbrennungsluftmenge
Heizeinsatz	Vergleichsmessung I mit Holzbriketts und Vergleichsmessung II mit Stückholz und Holzbriketts	
	Nennwärmeleistung	Wärmeleistung ca. 8 kW, Lufteinstellung nach Herstellerangaben
	Teillast	Wärmeleistung ca. 4 kW, Lufteinstellung wie Nennwärmeleistung

5 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

Im folgendem werden die im Rahmen dieses Projektes am Pelletofen und am Heizeinsatz durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen konventioneller und Sonden-Messtechnik beschrieben, die jeweils vor und einmal nach der Langzeitmessung vorgenommen wurden.

5.1 Vergleichsmessungen am Pelletofen - Messboxen 1 und 2

Vergleichsmessung I

Die **Messbox 1** (kurz: **Mess1**) wurde bei der Langzeitmessung an einem Pelletkessel und die **Messbox 2** (kurz: **Mess2**) an einer gewerblichen Holzfeuerung eingesetzt. Die Vergleichsmessung I am Pelletofen vor der Langzeitmessung dauerte für Mess1 und Mess2 insgesamt rund 1 Stunde, mit folgenden Betriebszuständen:

	Vergleichsmessung I (vor Langzeitmessung)
Datum des Versuchs	05.02.08
Messboxen	Mess1 und Mess2
Feuerung	Pelletofen - Buderus
Brennstoff	Holzpellets
Versuchszeit	01:00 Std.
davon Volllast	00:30 Std.
davon Teillast	00:30 Std.

Nach Erreichen des stationären Zustandes der Feuerung wurden die Messungen mit der Leistungsstufe 4 (Nennwärmeleistung) gestartet, nach ca. 30 Minuten wurde der Pelletofen auf die kleinste Leistungsstufe (Teillast, Stufe 1) gestellt. In **Bild 5-1** sind die mit konventioneller Messtechnik gemessenen Verläufe der Gaskonzentrationen von O₂, CO, VOC und NO_x dargestellt.

Durch die diskontinuierliche Brennstoffbeschickung schwanken die gemessenen Gaskonzentrationen, vor allem im Teillastbetrieb. Hier liegt die O₂-Konzentration auch deutlich höher als bei Nennwärmeleistung.

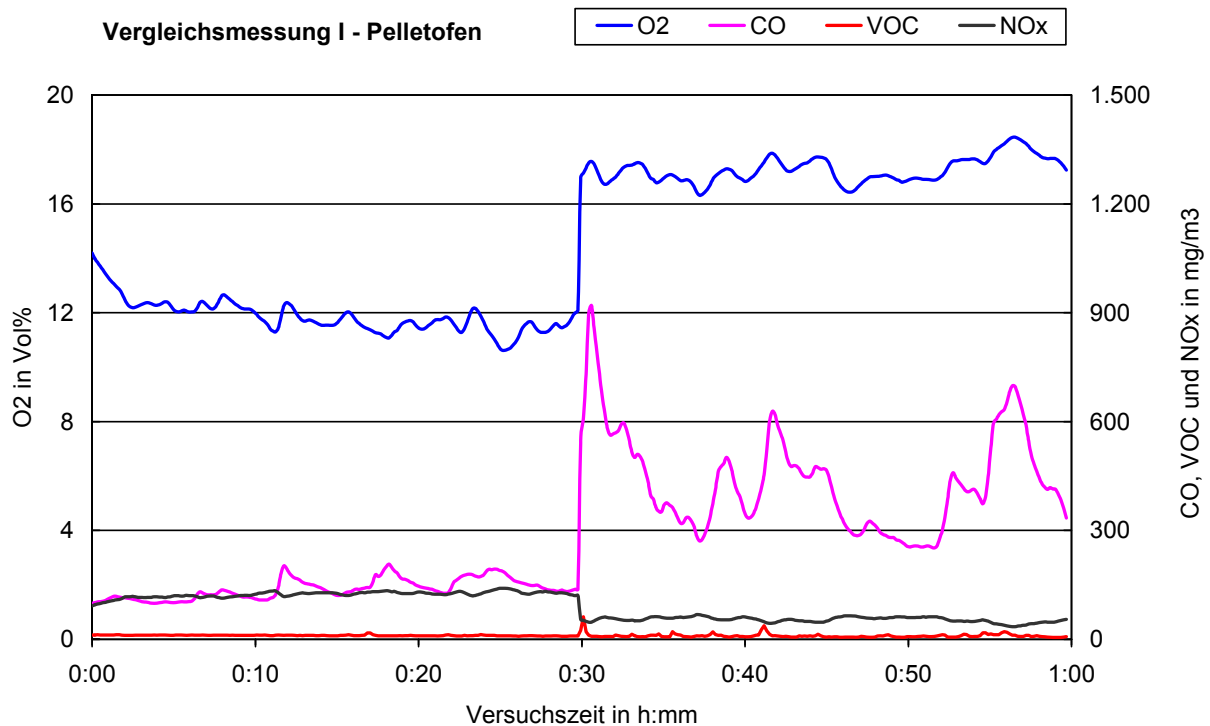


Bild 5-1 Verlauf der Gaskonzentrationen (konventionelle Messtechnik) beim Pelletofen für die Vergleichsmessung I

In **Tabelle 5.1** sind die mit konventioneller Messtechnik gemessenen mittleren Abgaskonzentrationen und -temperaturen sowie die Unterdrücke im Abgasrohr für den Pelletofen bei den Leistungsstufen 1 und 4 aufgelistet. Hierbei wurden die Konzentrationen von CO_2 , O_2 , CO und NO_x im trockenen Abgas gemessen.

Tabelle 5.1 Mittelwerte von Abgasparametern beim Pelletofen für die Leistungsstufe 1 und 4 (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung I

Leistungsstufe	Temperatur [°C]	Unterdruck [Pa]	CO_2 [Vol%]	O_2 [Vol%]	CO [mg/m ³]	VOC [mgC/m ³]	NO_x [mgNO ₂ /m ³]
Stufe 4	171	5,5	8,6	11,9	139	11	124
Stufe 1	143	5,4	3,4	17,3	434	10	54

Die Abgassonden messen allerdings im feuchten Abgas. Damit die Messwerte vergleichbar sind, wurden die O_2 -, CO- und NO_x -Messwerte von der konventionellen Messtechnik auf feuchtes Abgas umgerechnet, siehe **Tabelle 5.2**.

Tabelle 5.2 Mittelwerte von O₂, CO und NO_x beim Pelletofen für die Leistungsstufe 1 und 4 für feuchtes Abgas (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung I

Leistungsstufe	λ [-]	V _{tr} / V _{fe} [-]	O ₂ _feucht [Vol%]	CO_feucht [mg/m ³]	NO _x _feucht [mgNO ₂ /m ³]
Stufe 4	2,4	0,93	11,1	130	115
Stufe 1	6,1	0,97	16,8	422	53

Im Vergleich hierzu sind in **Tabelle 5.3** die Mittelwerte der Messgrößen der Messboxen 1 und 2 aufgelistet.

Tabelle 5.3 Mittelwerte der Messgrößen für Mess1 und Mess2 beim Pelletofen für die Leistungsstufen 1 und 4 (Sensormesstechnik) – Vergleichsmessung I

Mess1					
Leistungsstufe	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Stufe 4	100	10,9	2,1	2,30	9,0
Stufe 1	37	16,7	5,3	2,36	8,1

Mess2					
Leistungsstufe	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Stufe 4	105	11,3	2,3	3,66	8,9
Stufe 1	38	16,8	5,5	3,84	7,7

In **Bild 5-2** sind die Verläufe der O₂- und NO_x-Konzentrationen bei den Vergleichsmessungen I (vor den Langzeitmessungen) für die konventionelle Messtechnik und die Sensoren der Messboxen 1 und 2 gezeigt. Aufgrund unterschiedlicher Totzeiten der Messverfahren (konventionelle Messtechnik mit Pumpen, Messgaskühler und Schläuchen, Sonden direkt im Abgas) sind die Verläufe nicht exakt deckungsgleich, auch unterscheidet sich das Niveau bei beiden Komponenten geringfügig.

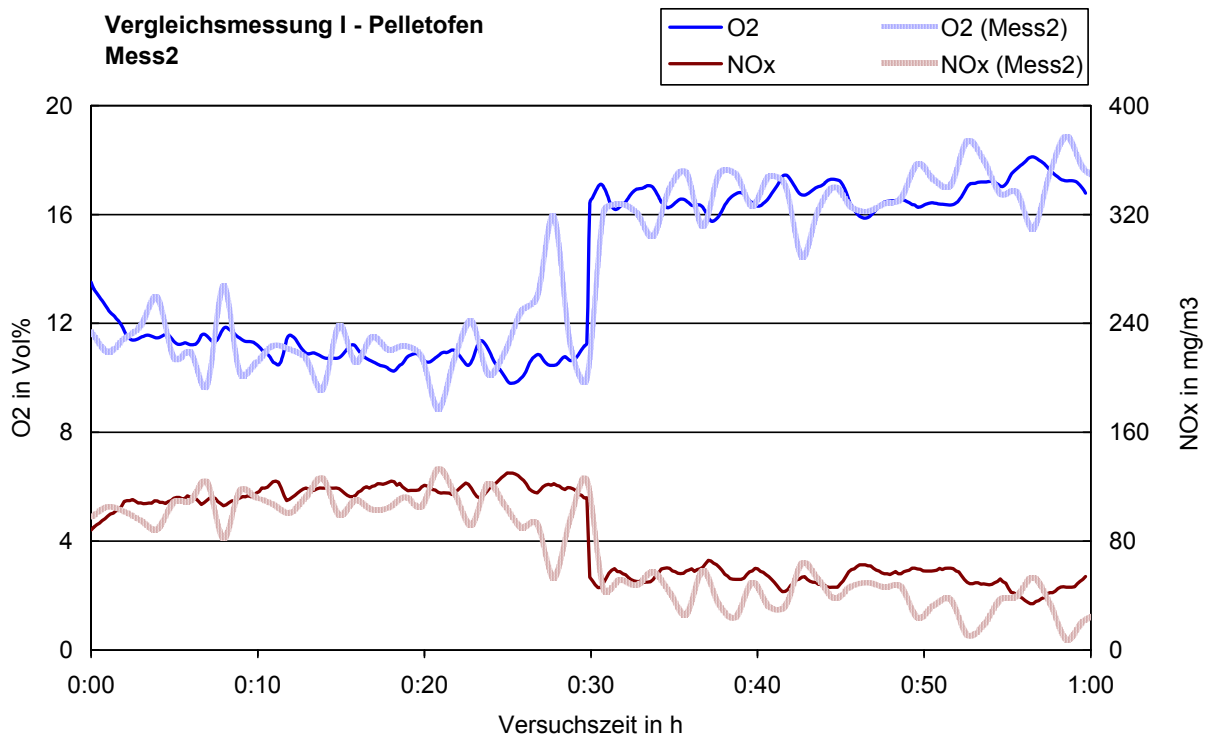
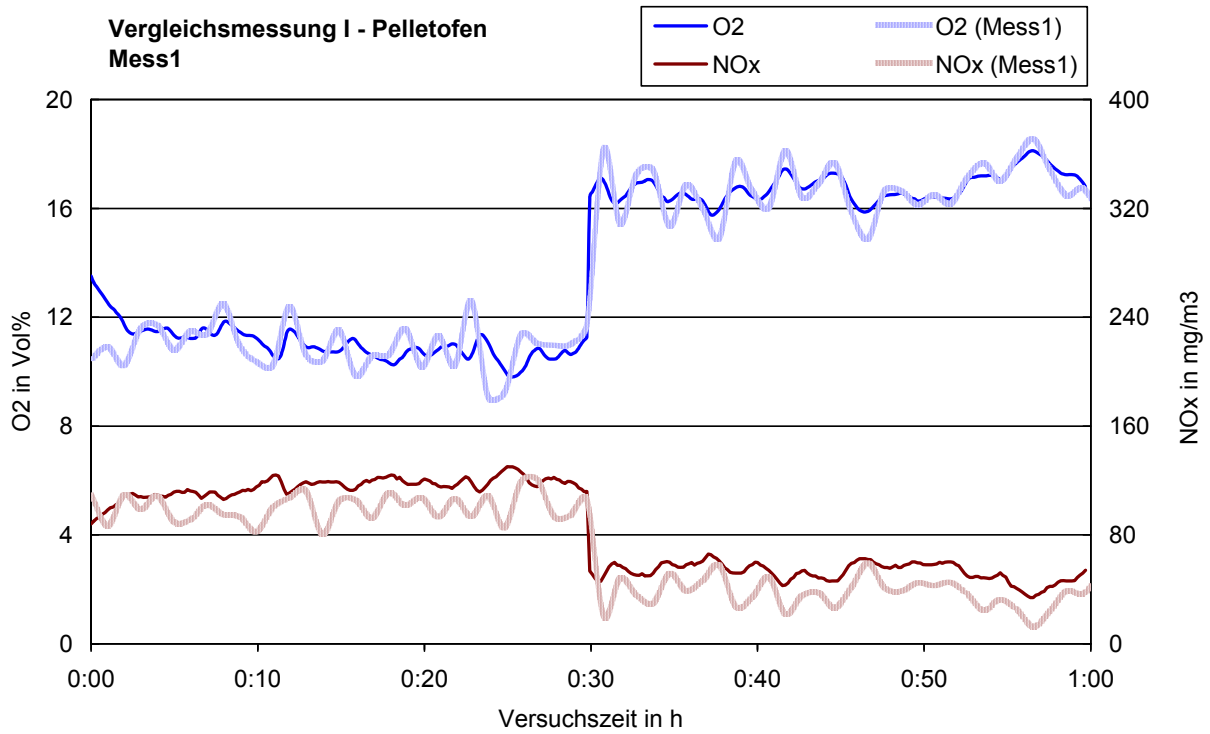


Bild 5-2 Konzentrationsverläufe für O₂ und NO_x bei der Vergleichsmessung I am Pelletofen für die Messboxen 1 und 2 im Vergleich zur konventionellen Messtechnik

Vergleichsmessung II

Nach der Langzeitmessung wurde mit den beiden Messboxen wiederum eine Vergleichsmessung (II) mit konventioneller Messtechnik am Pelletofen durchgeführt. Hierdurch sollten Änderungen von Nullpunkten, der Empfindlichkeit und Sondenfehlfunktionen ermittelt werden.

Gegenüber der Vergleichsmessung I wurde die Versuchszeit am Pelletofen verlängert und es wurden zusätzliche Versuche mit reduzierter Verbrennungsluft und damit schlechteren Verbrennungsbedingungen durchgeführt. Bei den schlechteren Verbrennungsbedingungen wurden im Abgas des Pelletofens höhere CO- und VOC-Konzentrationen gemessen. Die Vergleichsmessung II dauerte für Mess1 und Mess2 jeweils etwas mehr als 2 Stunden, mit folgenden Betriebszuständen:

	Vergleichsmessung II (nach Langzeitmessung)
Datum des Versuches	26.06.08
Betroffene Messboxen	Mess1
Vergleichsmessungsfeuerung	Pelletofen - Buderus
Brennstoff	Holzpellets
Versuchszeit	02:54 Std.
davon Volllast	00:56 Std.
davon Volllast mit reduzierter Luft	01:05 Std.
davon Teillast	00:53 Std.

	Vergleichsmessung II (nach Langzeitmessung)
Datum des Versuches	25.07.08
Betroffene Messboxen	Mess2
Vergleichsmessungsfeuerung	Pelletofen - Buderus
Brennstoff	Pellets
Versuchszeit	02:22 Std.
davon Volllast	01:08 Std.
davon Volllast mit reduzierter Luft	00:54 Std.
davon Teillast	00:20 Std.

Beispielhaft für die Vergleichsmessungen II sind in **Bild 5-3** die mit konventioneller Messtechnik gemessenen Verläufe der Gaskonzentrationen von O₂, CO, VOC und NO_x dargestellt. Nach einem stationären Betrieb der Feuerung für rund 50 Minuten mit der Leistungsstufe 4 (Nennwärmeleistung) wurde die Verbrennungsluftmenge reduziert. Hierdurch steigen die CO- und VOC-Konzentrationen deutlich an. Nach knapp einer Stunde Betriebszeit mit reduzierter Verbrennungsluft wurde der Ofen auf die kleinste Leistungsstufe (Teillast, Stufe 1) eingestellt.

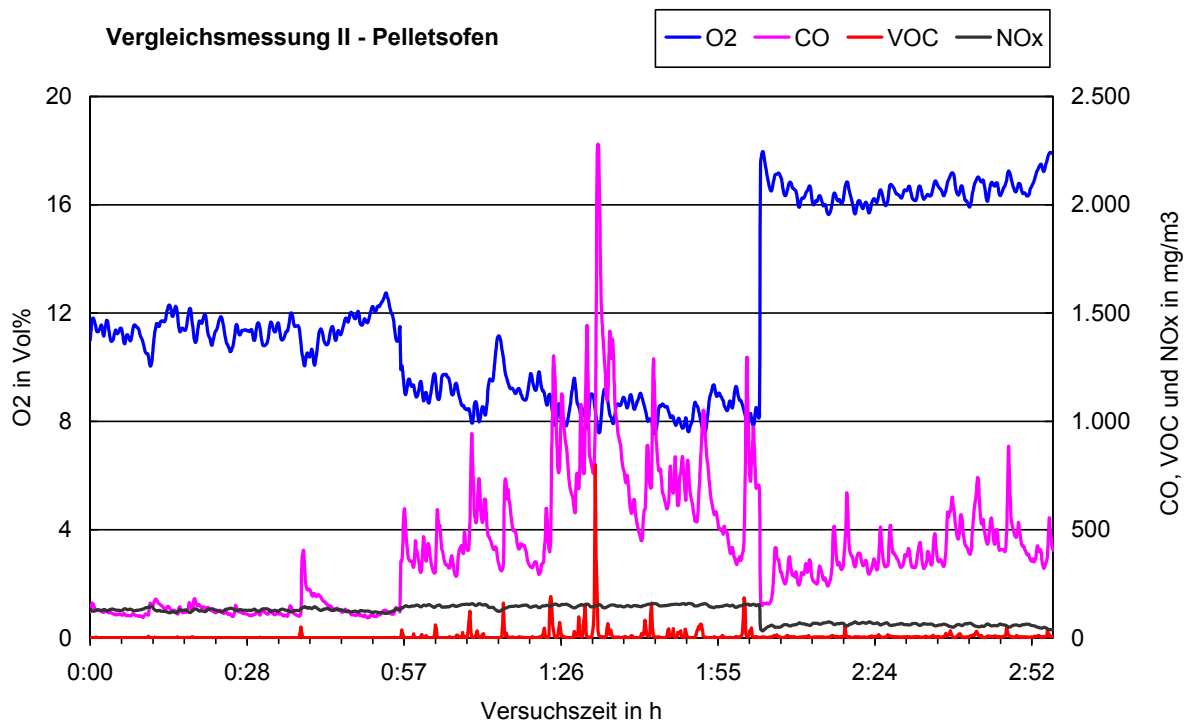


Bild 5-3 Verlauf der Gaskonzentrationen (konventionelle Messtechnik) beim Pelletofen für die Vergleichsmessung II mit der Messbox 1

In **Tabelle 5.4** sind die mit konventioneller Messtechnik gemessenen mittleren Abgaskonzentrationen und -temperaturen sowie die Unterdrücke im Abgasrohr für den Pelletofen bei den Leistungsstufen 1 und 4 aufgelistet.

Tabelle 5.4 Mittelwerte von Abgasparametern beim Pelletofen für die Leistungsstufe 1 und 4 (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung II

Versuche mit Mess1							
Leistungsstufe	Temperatur [°C]	Unterdruck [Pa]	CO ₂ [Vol%]	O ₂ [Vol%]	CO [mg/m ³]	VOC [mgC/m ³]	NO _x [mgNO ₂ /m ³]
Stufe 4	218	14	9,2	11,4	130	2	128
Stufe 4 (reduzierte Luft)	204	13	11,7	8,7	647	18	149
Stufe 1	187	12	3,8	16,5	388	6	60

Versuche mit Mess2							
Leistungsstufe	Temperatur [°C]	Unterdruck [Pa]	CO ₂ [Vol%]	O ₂ [Vol%]	CO [mg/m ³]	VOC [mgC/m ³]	NO _x [mgNO ₂ /m ³]
Stufe 4	-	13	9,9	10,2	166	3	127
Stufe 4 (reduzierte Luft)	-	12	11,9	8,2	1.568	104	144
Stufe 1	-	12	6,1	13,8	770	4	89

Die auf feuchtes Abgas umgerechneten O₂-, CO- und NO_x-Messwerte sind in **Tabelle 5.5** aufgelistet.

Tabelle 5.5 Mittelwerte von O₂, CO und NO_x beim Pelletofen für die Leistungsstufe 1 und 4 für feuchtes Abgas (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung II

Versuche mit Mess1					
Leistungsstufe	λ [-]	V_{tr} / V_{fe} [-]	O ₂ _feucht [Vol%]	CO_feucht [mg/m ³]	NO _x _feucht [mgNO ₂ /m ³]
Stufe 4	2,2	0,93	10,6	120	119
Stufe 4 (reduzierte Luft)	1,7	0,91	8,0	588	135
Stufe 1	5,3	0,97	16,0	376	58

Versuche mit Mess2					
Leistungsstufe	λ [-]	V_{tr} / V_{fe} [-]	O ₂ _feucht [Vol%]	CO_feucht [mg/m ³]	NO _x _feucht [mgNO ₂ /m ³]
Stufe 4	2,1	0,92	9,4	153	117
Stufe 4 (reduzierte Luft)	1,7	0,91	7,4	1.423	131
Stufe 1	6,8	0,95	13,1	723	84

Im Vergleich zu den Ergebnissen die mit konventioneller Messtechnik ermittelt wurden, sind in **Tabelle 5.6** die Mittelwerte der Messgrößen für die Messboxen 1 und 2 aufgelistet.

Tabelle 5.6 Mittelwerte der Messgrößen für Mess1 und Mess2 beim Pelletofen für die Leistungsstufen 1 und 4 (Sensormesstechnik) – Vergleichsmessung II

Mess1					
Leistungsstufe	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Stufe 4	88	11,6	2,3	2,26	14,4
Stufe 4 (reduzierte Luft)	112	8,0	1,7	2,52	12,9
Stufe 1	43	15,9	4,4	2,29	12,0

Mess2					
Leistungsstufe	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Stufe 4	229	9,2	1,8	2,54	12,1
Stufe 4 (reduzierte Luft)	200	6,4	1,5	2,82	11,5
Stufe 1	113	14,7	3,6	2,29	11,5

Bild 5-4 zeigt die Verläufe der O₂- und NO_x-Konzentrationen bei den Vergleichsmessungen II (nach den Langzeitmessungen) für die konventionelle Messtechnik und die Sensoren der Messboxen 1 und 2.

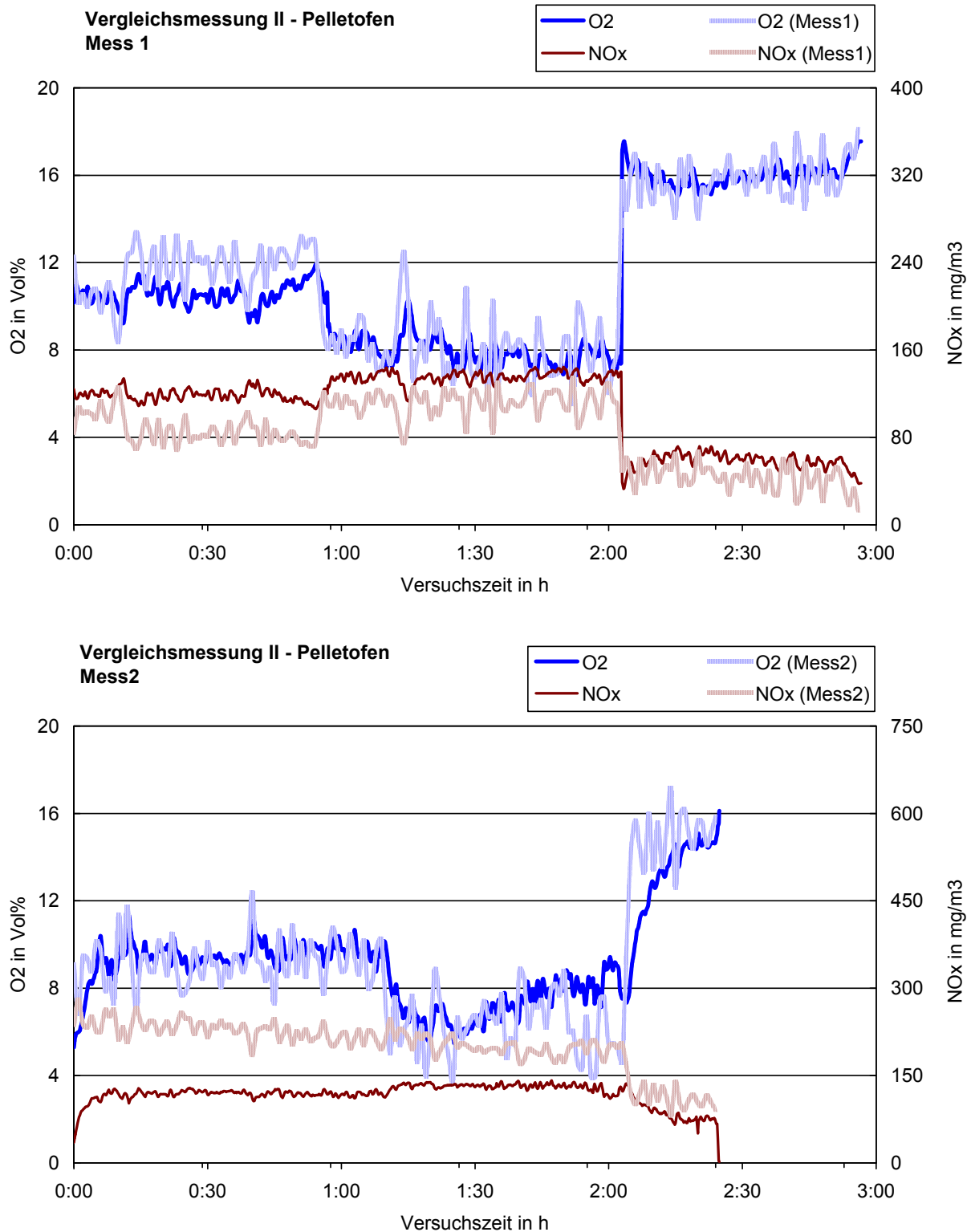


Bild 5-4 Konzentrationsverläufe für CO und NO_x bei der Vergleichsmessung II am Pelletofen für die Messboxen 1 und 2 im Vergleich zur konventionellen Messtechnik

Korrekturfaktoren

Je nach Komponente und Messbox ergeben sich unterschiedliche Abweichungen bei den Vergleichsmessungen zwischen konventioneller und Sensormesstechnik. Die konventionelle Messtechnik wurde als Referenzverfahren festgelegt und deren Ergebnisse für die Justierung der Sensoren verwendet. D.h. die Signale der eingesetzten Sensoren wurden mit Hilfe von Korrekturfaktoren so korrigiert, dass diese möglichst gut die Ergebnisse des Referenzverfahrens wiedergeben. Für die beiden Vergleichsmessungen wurden jeweils mehr oder weniger unterschiedliche Faktoren ermittelt. Dies liegt zum Teil an einer Drift der Sensoren während der Langzeitmessungen. Die Sensordriften wurden gleichmäßig über den Zeitraum der Langzeitmessungen verteilt berücksichtigt.

Die Korrekturfaktoren für die beiden Vergleichsmessungen wurden mit Hilfe von Regressionskurven (Annahme: linearer Zusammenhang) auf Basis der Daten für die Vergleichsmessungen ermittelt. Die berechneten Faktoren a und b geben die Steigung einer Geraden und den y -Achsenabschnitt wieder. Die allgemeine Korrekturformel lautet somit:

$$y_{\text{korrigierter Messwert}} = a \times \text{Messwert} \pm b.$$

Mit den Daten aus den Vergleichsmessungen wurde auch der Versuch unternommen, das Summensignal des CO+HC-Sensors in eine CO- und VOC-Konzentration auf zu splitten. Das Summensignal wird als Spannungssignal ausgegeben und ist u.a. von der Sauerstoffkonzentration, dem Feuchtegehalt und von den jeweiligen (organischen) Komponenten im Messgas abgänglich, siehe **Bild 5-5** (Teichler, 2008).

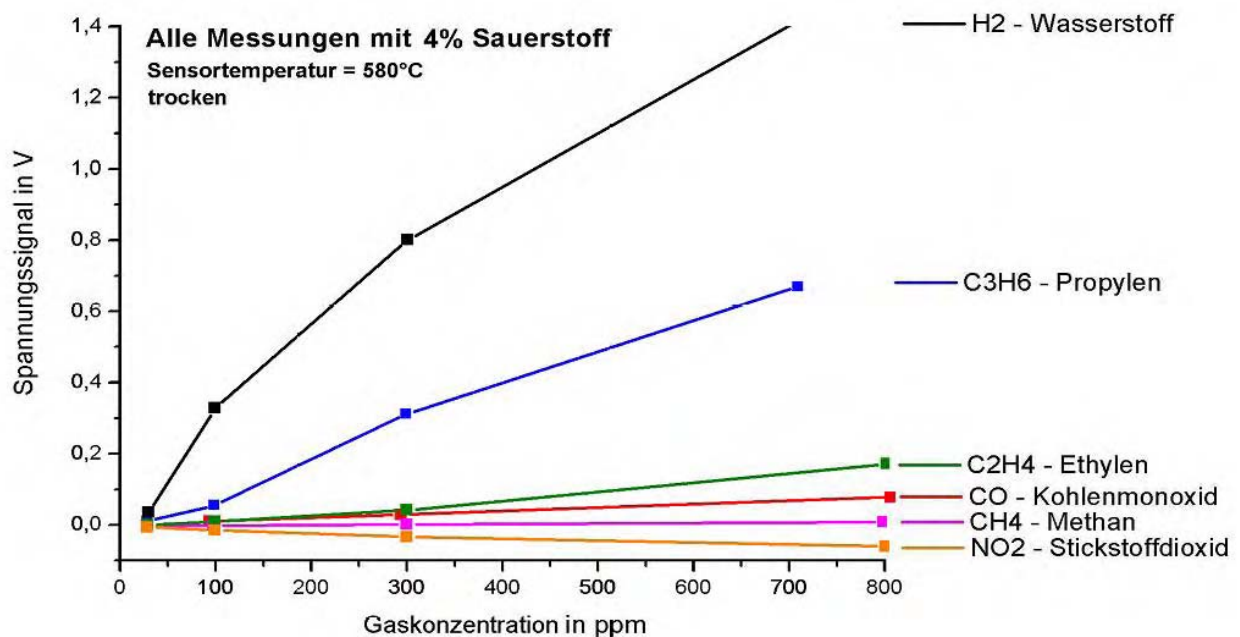


Bild 5-5 Zusammenhang zwischen Spannungssignal und Messkomponenten im Prüfgas bei 4 % Sauerstoff für den ESCUBE CO+HC-Sensor (Teichler, 2008)

So besitzt der Sensor z.B. eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber H_2 und gewissen organischen Verbindungen (z.B. Propylen), die deutlich über der von CO liegt. Andere Verbindungen (z.B. CH_4) werden, im Vergleich zum CO, deutlich geringer empfindlich detektiert. Darüber hinaus hängt die Höhe des Messsignals auch von der Sauerstoffkonzentration im Messgas ab. Mit zunehmender Sauerstoffkonzentration nimmt in der Regel ab die Empfindlichkeit des Sensors ab. Auch die Feuchte im Messgas hat einen gewissen Einfluss auf das Messsignal, je nach Komponente nimmt hierbei die Empfindlichkeit des Sensors etwas ab oder auch zu, siehe **Bild 5-6** (Teichler, 2008).

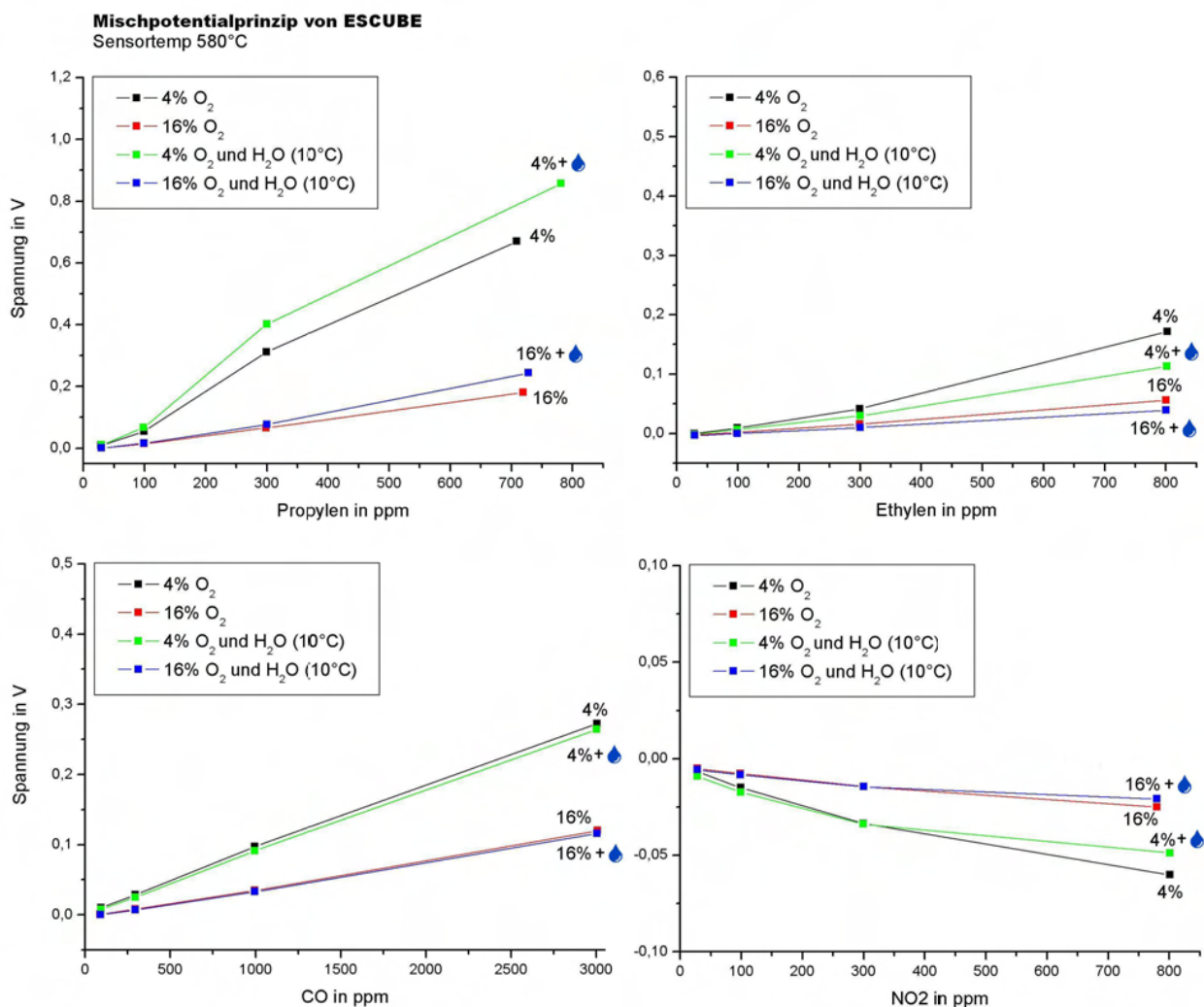


Bild 5-6 Sauerstoff- und Feuchteinfluss auf das Messsignal des ESCUBE CO+HC-Sensors (Teichler, 2008)

Bisher kann das Summensignal für Produkte unvollständiger Verbrennung (CO+HC) nicht nach CO und organischen Komponenten aufgeschlüsselt werden. Im Abgas der untersuchten Biomassefeuerungen treten, je nach Verbrennungs- und Betriebszustand sowie je nach eingesetztem Brennstoff, die unterschiedlichsten organischen Verbindungen auf. Auch ändern sich die O₂-Konzentrationen und die Abgasfeuchten in einem weiten Bereich.

Somit stellt die CO- und HC-Konzentrationsberechnung aus dem Summensignal nur eine erste Näherung dar, die vor allem auf ein zusätzliches Potenzial des Sensors hinweisen soll. Gelänge durch eine erweiterte Auswertung der Sensorreaktionen auf CO und HC eine in der Größenordnung verlässliche Konzentrationsbestimmung (zumindest für CO), so würde die Aussagekraft der Messergebnisse und mögliche Anwendungen der Messboxen (z.B. bei Beschwerdeverfahren oder zur Ermittlung von aussagekräftigen Emissionsfaktoren für installierte Anlagen) deutlich erhöht werden.

Bei der CO- und HC-Konzentrationsberechnung wurde so vorgegangen, dass bei den Vergleichsmessungen jeweils für 2 Sauerstoffbereiche (höher und niedriger) entsprechende Korrekturfaktoren ermittelt wurden. Hierbei wurde das Messsignal des Sensors als CO+VOC-Konzentration (CO-Äquivalente) interpretiert. Mit der Annahme, dass die HC-Konzentration in einem festen Verhältnis (z.B. 10 %) zur CO-Konzentration steht, wurde diese aus den CO-Äquivalenten abgeleitet. Die Differenz von CO-Äquivalenten – HC-Konzentration ergibt dann die im Bericht angegebene CO-Konzentration aus dem CO+HC-Summensignal des ESCUBE-Sensors.

Bei diesem Ansatz zur Berechnung der HC-Konzentration wird somit im Prinzip davon ausgegangen, dass der Sensor auf die Summe der vielen organischen Verbindungen im Abgas mit der selben Empfindlichkeit reagiert, in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt, wie auf CO.

Für die Berechnung von den Korrekturfaktoren für die Messgrößen O_2 , NO_x und Schornsteinzug (Unterdruck im Abgasrohr) wird nicht nach Leistungsstufen unterschieden.

Messbox 1 - O_2

Am Beispiel für die O_2 -Korrektur der Sonde in Messbox 1 soll die Vorgehensweise detaillierter erläutert werden. Ausgehend von den Messwertepaaren der O_2 -Messung aus konventioneller und Sondenmesstechnik für die Vergleichsmessungen I und II werden lineare Korrekturfunktionen ermittelt, siehe **Bild 5-7**. Aufgrund der Lage der einzelnen Punkte der beiden Messsignale und einer möglichen Sondendrift unterscheiden sich die beiden Korrekturfunktionen (Faktoren a und b).

Diese Unterschiede werden linear über den Messzeitraum der Langzeitversuche verteilt, siehe **Tabelle 5.7**. Zusätzlich erfolgte für die Langzeitmessung noch eine Korrektur von Nullpunktdriften (für NO_x , CH+HC) bzw. eine Korrektur für Abweichungen der gemessenen O_2 -Konzentration vom Luftsauerstoffgehalt. Diese Korrekturwerte wurden, soweit möglich und notwendig, wöchentlich angepasst. Eine Anpassung konnte nur dann vorgenommen werden, wenn in den Feuerungsanlagen für längere Zeit keine Verbrennungsvorgänge stattfanden.

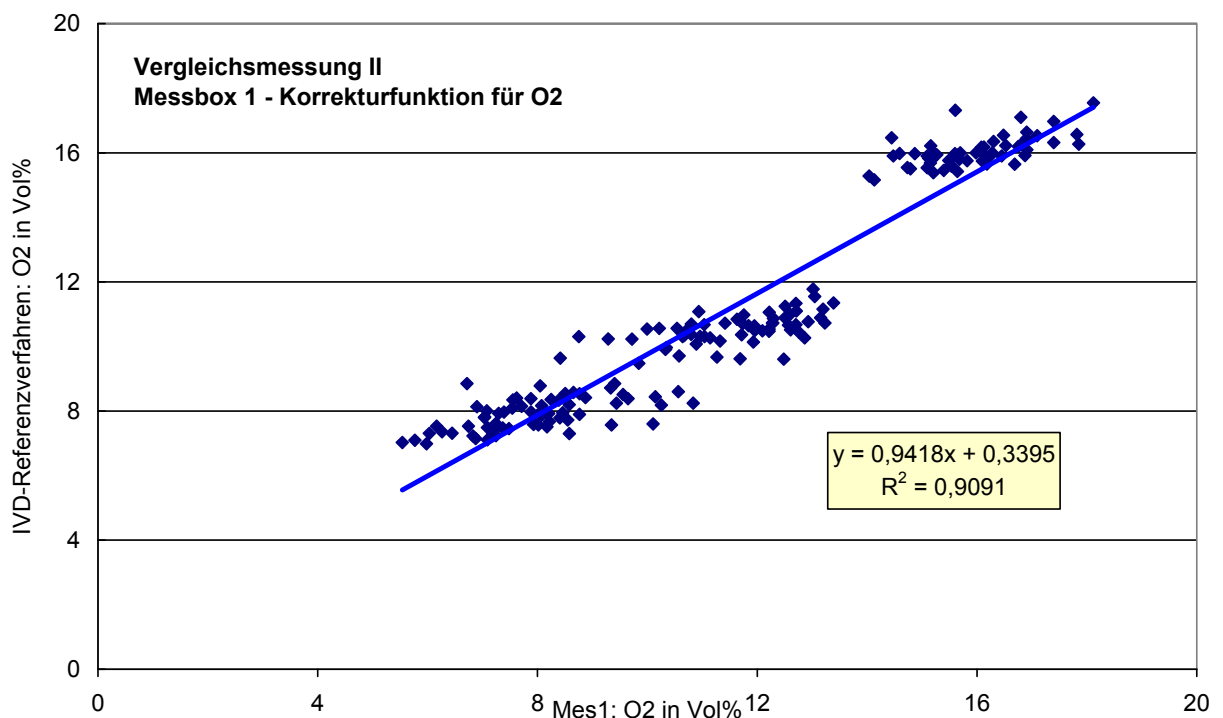
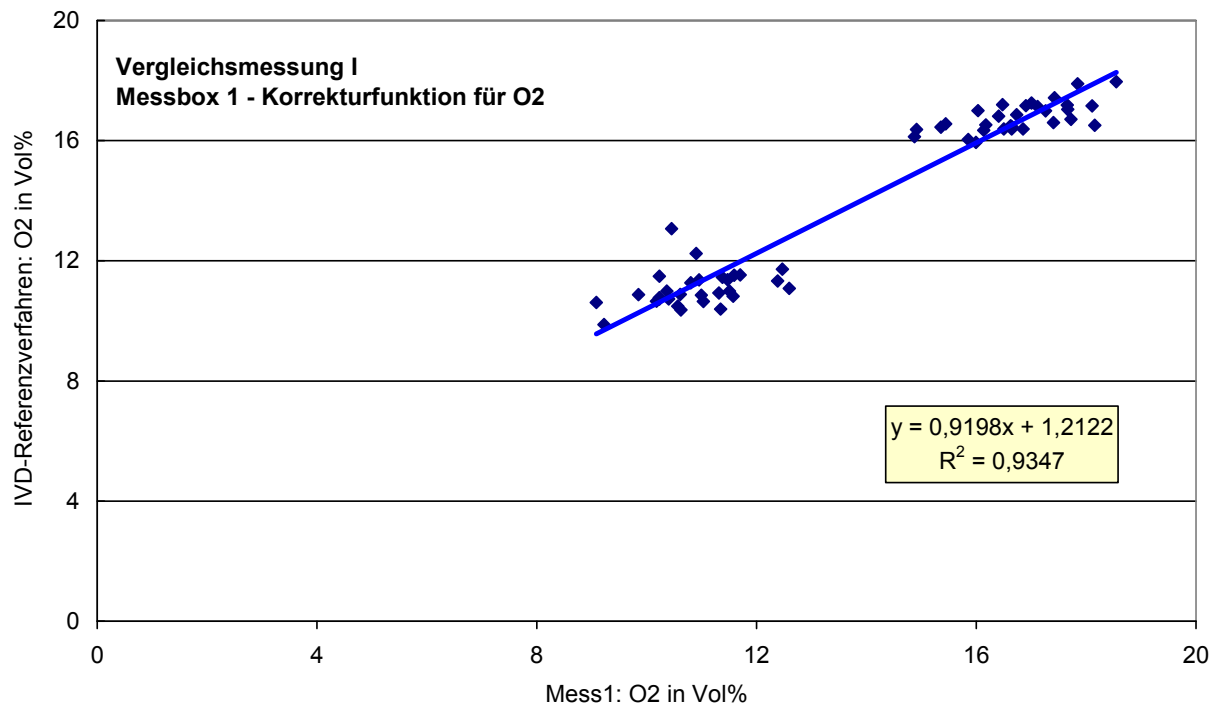


Bild 5-7 Korrekturfunktionen für O₂ der Vergleichsmessung I und II für Messbox1

Tabelle 5.7 Korrekturfunktionen für O₂-Sonde der Messbox1 für die Vergleichsmessungen I und II und jede Woche der Langzeitmessungen

Korrekturfunktionen für O ₂ - Mess1	
Vergleichsm. I	y = 0,9198 x + 1,2122
Feb 08 KW 6	y = 0,9198 x + 1,2122
KW 7	y = 0,9212 x + 1,1577
KW 8	y = 0,9226 x + 1,1031
KW 9	y = 0,9239 x + 1,0486
Mrz 08 KW10	y = 0,9253 x + 0,9940
KW11	y = 0,9267 x + 0,9395
KW12	y = 0,9281 x + 0,8849
KW13	y = 0,9294 x + 0,8304
Apr 08 KW14	y = 0,9308 x + 0,7759
KW15	y = 0,9322 x + 0,7213
KW16	y = 0,9336 x + 0,6668
KW17	y = 0,9349 x + 0,6122
Mai 08 KW18	y = 0,9363 x + 0,5577
KW19	y = 0,9377 x + 0,5031
KW20	y = 0,9391 x + 0,4486
KW21	y = 0,9404 x + 0,3940
Jun 08 KW22	y = 0,9418 x + 0,3395
Vergleichsm. II	y = 0,9418 x + 0,3395

In **Bild 5-8** sind die O₂-Verläufe bei der Vergleichsmessung I mit dem Referenzverfahren und der O₂-Sonde von Messbox1 sowie die korrigierten O₂-Verläufe für Messbox1 dargestellt. Mit angegeben sind die Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox1. Durch die Korrektur der Sonden-Messwerte wird im Mittel die Konzentration des Referenzmessverfahrens erreicht.

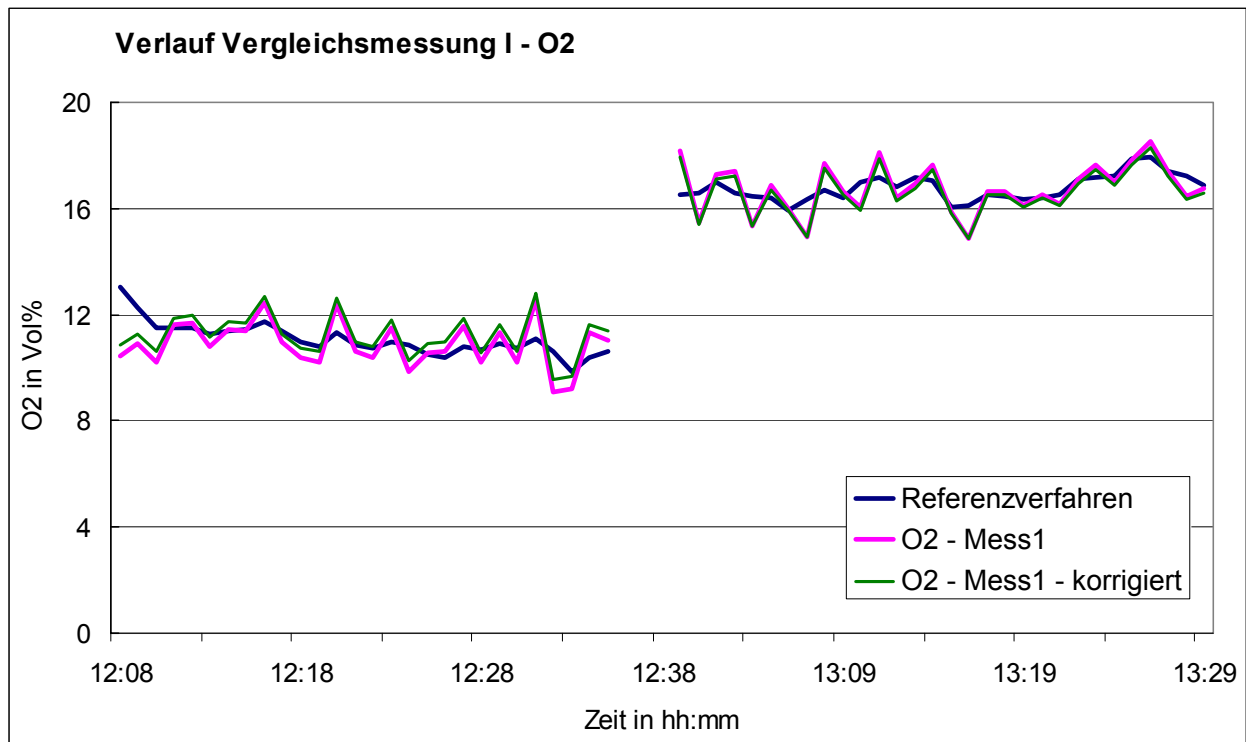


Bild 5-8 O₂-Verläufe bei Vergleichsmessung I mit dem Referenzverfahren und der O₂-Sonde von Messbox1 wie gemessen und korrigiert

In **Tabelle 5.8** sind die Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox1 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.8 Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox1 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox1		Messbox1	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
O2 in Vol%		O2 in Vol%	
Referenzverfahren	13,9	Referenzverfahren	11,5
O2 - Mess1	13,8	O2 - Mess1	11,9
O2 - Mess1 - korrigiert	13,9	O2 - Mess1 - korrigiert	11,5

Korrekturfunktionen für O2

$$y = 0,9198 x + 1,2122$$

$$y = 0,9418 x + 0,3395$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens.

Messbox 1 – NO_x

In **Tabelle 5.9** sind die Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox1 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.9 Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox1 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox1		Messbox1	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
NOx in mg/m3		NOx in mg/m3	
Referenzverfahren	84	Referenzverfahren	104
NOx - Mess1	69	NOx - Mess1	81
NOx - Mess1 - korrigiert	77	NOx - Mess1 - korrigiert	108

Korrekturfunktionen für NOx

$$y = 0,8590 x + 17,4820$$

$$y = 1,0747 x + 21,1010$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens.

Messbox 1 – CO-Äquivalente

In **Tabelle 5.10** sind die Mittelwerte für die Summe von CO und VOC für die Referenzmessverfahren und das Summensignal des CO+HC-Sensors angegeben. Aus dem Summensignal wurden die CO-Äquivalente für die Messbox1 berechnet. Unter der Annahme, dass alle organischen Verbindungen im Abgas im Mittel am Sensor die gleiche Empfindlichkeit wie CO bewirkt, können diese dann aus den CO-Äquivalenten, mit einer Annahme zum %-Anteil für HC, angegeben werden.

Tabelle 5.10 Mittelwerte für CO+VOC für die Referenzmessverfahren und CO-Äquivalente für Messbox1 (CO - Mess1- korrigiert) sowie des Summensignals des Sensors

Messbox1		Messbox1	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
CO+VOC in mg/m3		CO+VOC in mg/m3	
Referenzverfahren	286	Referenzverfahren	370
CO+HC in V - Mess1	2,3	CO+HC in V - Mess1	2,4
CO - Mess1 - korrigiert	264	CO - Mess1 - korrigiert	347

Korrekturfunktionen für CO – Teillast

$$y = 743,31 x - 1365,70$$

$$y = 712,00 x - 1251,20$$

Korrekturfunktionen für CO – Nennwärmeleistung

$$y = 440,95 x - 874,91$$

$$y = 641,23 x - 1329,20$$

Korrekturfunktionen für CO – Nennwärmeleistung und schlechte Verbrennung

$$y = 1264,70 x + 2739,20$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den CO-Äquivalenten der CO+HC-Sonde und den Werten der Referenzverfahren. Für die Auswertung der Langzeitmessungen wurden nur die Korrekturfunktionen bei Nennwärmeleistung und Teillast verwendet.

In **Bild 5-9** ist der CO+VOC-Verlauf bei der Vergleichsmessung I mit den Referenzverfahren und der Verlauf für die CO-Äquivalente für die ESCUBE CO+HC- Sonde dargestellt.

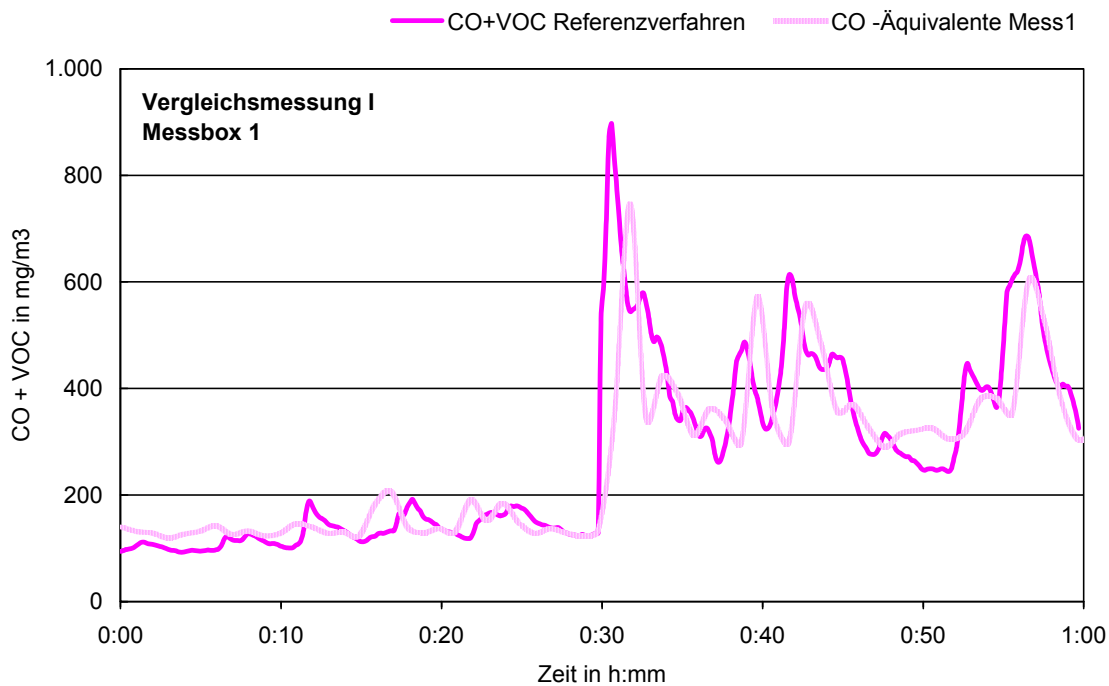


Bild 5-9 CO+VOC-Verläufe bei Vergleichsmessung I mit dem Referenzverfahren und aus dem Summensignal des CO+HC-Sensors berechnete CO-Äquivalente für Messbox1

Messbox 1 – Schornsteinzug (Unterdruck im Abgasrohr)

In **Tabelle 5.11** sind die Mittelwerte für den Schornsteinzug für das Referenzmessverfahren und die Messbox1 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.11 Mittelwerte für den Schornsteinzug mit Referenzmessverfahren und für Messbox1 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox1		Messbox1	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
Zug in Pa		Zug in Pa	
Referenzverfahren	5,4	Referenzverfahren	12,8
Zug - Mess1	8,5	Zug - Mess1	13,1
Zug - Mess1 - korrigiert	5,4	Zug - Mess1 - korrigiert	12,8

Korrekturfunktionen für Schornsteinzug

$$y = 0,1851 x + 3,8133$$

$$y = 0,9267 x + 0,6794$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens.

Messbox 2 - O₂

In **Tabelle 5.12** sind die Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox2 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.12 Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox2 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox2		Messbox2	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
O ₂ in Vol%		O ₂ in Vol%	
Referenzverfahren	13,9	Referenzverfahren	10,0
O ₂ - Mess2	14,0	O ₂ - Mess2	10,1
O ₂ - Mess2 - korrigiert	14,0	O ₂ - Mess2 - korrigiert	10,0

Korrekturfunktionen für O₂

$$y = 0,8499 x + 2,0541$$

$$y = 0,6379 x + 3,5063$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens.

Messbox 2 – NO_x

In **Tabelle 5.13** sind die Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox2 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.13 Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox2 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox2		Messbox2	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
NO _x in mg/m ³		NO _x in mg/m ³	
Referenzverfahren	84	Referenzverfahren	111
NO _x - Mess2	71	NO _x - Mess2	181
NO _x - Mess2 - korrigiert	83	NO _x - Mess2 - korrigiert	112

Korrekturfunktionen für NO_x

$$y = 0,7710 x + 27,7570$$

$$y = 0,2523 x + 66,5290$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens.

Messbox 2 – CO-Äquivalente

In **Tabelle 5.14** sind die Mittelwerte für die Summe CO und VOC für das Referenzmessverfahren und das Summensignal des CO+HC-Sensors angegeben. Aus dem Summensignal wurden die CO-Äquivalente für die Messbox2 berechnet. Unter der Annahme, dass alle organischen Verbindungen im Abgas im Mittel am Sensor die gleiche Empfindlichkeit wie CO bewirkt, können diese dann aus den CO-Äquivalenten, mit einer Annahme zum %-Anteil für HC, angegeben werden.

Tabelle 5.14 Mittelwerte für CO+VOC für die Referenzmessverfahren und CO-Äquivalente für die Messbox2 (CO – Mess2- korrigiert) sowie des Summensignals des Sensors

Messbox2		Messbox2	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
CO+VOC in mg/m ³		CO+VOC in mg/m ³	
Referenzverfahren	286	Referenzverfahren	803
CO+HC in V - Mess2	3,7	CO+HC in V - Mess2	2,5
CO - Mess2 - korrigiert	722	CO - Mess2 - korrigiert	1.005

Korrekturfunktionen für CO – Teillast

$$y = 2643,00 x - 5330,40$$

Korrekturfunktionen für CO – Nennwärmeleistung

$$y = 466,35 x - 1025,50$$

Korrekturfunktionen für CO – Nennwärmeleistung und schlechte Verbrennung

$$y = 2769,90 x - 6397,60$$

Bei der Messbox 2 ergaben die Daten aus der Vergleichsmessung I keine sinnvolle Korrekturfunktion. Deshalb wurde die Korrekturfunktion aus Vergleichsmessung II für die gesamte Langzeitmessung verwendet. Bei der Vergleichsmessung II ergibt sich keine so gute Übereinstimmung zwischen der CO+VOC-Konzentration und den CO-Äquivalenten der CO+HC-Sonde wie bei Messbox 1.

Messbox 2 – Schornsteinzug (Unterdruck im Abgasrohr)

In **Tabelle 5.15** sind die Mittelwerte für den Schornsteinzug für das Referenzmessverfahren und die Messbox2 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Werten der Messbox2 und den Werten des Referenzverfahrens.

Tabelle 5.15 Mittelwerte für den Schornsteinzug mit Referenzmessverfahren und für Messbox2 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox2		Messbox2	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
Zug in Pa		Zug in Pa	
Referenzverfahren	5,4	Referenzverfahren	12,3
Zug - Mess2	8,3	Zug - Mess2	11,7
Zug - Mess2 - korrigiert	5,3	Zug - Mess2 - korrigiert	12,3

Korrekturfunktionen für Schornsteinzug

$$y = 0,1331 x + 4,2964$$

$$y = 0,8282 x + 2,5867$$

5.2 Vergleichsmessungen am Heizeinsatz - Messboxen 3 und 4

Vergleichsmessung I

Die **Messbox 3** (kurz: **Mess3**) wurde bei der Langzeitmessung an einem Stückholzkessel und die **Messbox 4** (kurz: **Mess4**) an einem Kaminofen eingesetzt. Die Vergleichsmessung I am Heizeinsatz vor die Langzeitmessung dauerte für Mess3 und Mess4 insgesamt rund 3,5 Stunden, mit folgenden Betriebszuständen:

	Vergleichsmessung I (vor Langzeitmessung)
Datum des Versuches	12.02.08
Betroffene Messboxen	Mess3 und Mess4
Vergleichsmessungsfeuerung	Kachelofenheizeinsatz - Buderus
Brennstoff	Holzbriketts
Versuchszeit	03:28 Std.
1. Abbrand	01:46 Std.
2. Abbrand	01:42 Std.

Es wurden zwei Abbrände durchgeführt, in **Bild 5-10** sind die mit konventioneller Messtechnik gemessenen Verläufe der Gaskonzentrationen von O₂, CO, VOC und NO_x dargestellt.

In **Tabelle 5.16** sind die mit konventioneller Messtechnik gemessenen mittleren Abgaskonzentrationen und -temperaturen sowie die Unterdrücke im Abgasrohr für den Heizeinsatz aufgelistet.

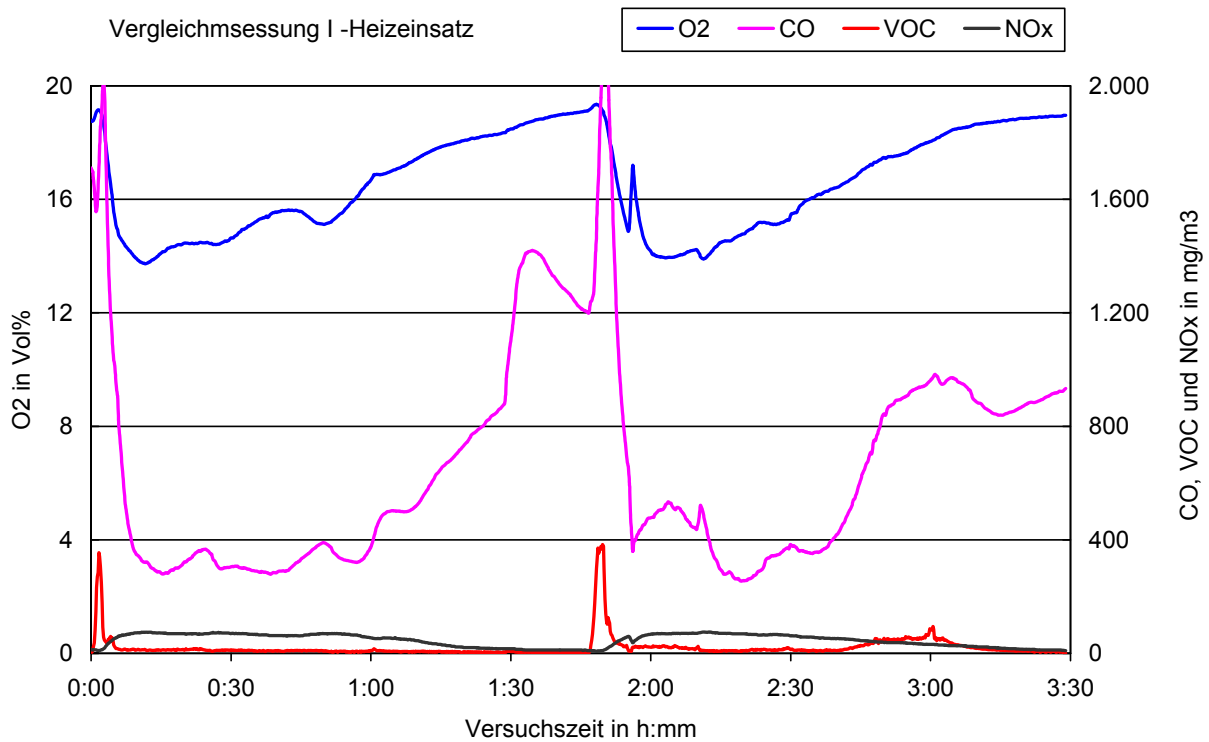


Bild 5-10 Verlauf der Gaskonzentrationen (konventionelle Messtechnik) beim Heizeinsatz für die Vergleichsmessung I

Tabelle 5.16 Mittelwerte von Abgasparametern beim Heizeinsatz für die beiden Abbrände (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung I

Abbrand	Temperatur [°C]	Unterdruck [Pa]	CO ₂ [Vol%]	O ₂ [Vol%]	CO [mg/m ³]	VOC [mgC/m ³]	NO _x [mgNO ₂ /m ³]
Abbrand 1	331	20,4	4,3	16,5	2.058	30	47
Abbrand2	370	20,2	4,6	16,1	2.046	35	52

Hierbei wurden die Konzentrationen von CO₂, O₂, CO und NO_x im trockenen Abgas gemessen. Die Abgassonden messen allerdings im feuchten Abgas. Damit die Messwerte vergleichbar sind, wurden die O₂-, CO- und NO_x-Messwerte von der konventionellen Messtechnik auf feuchtes Abgas umgerechnet, siehe **Tabelle 5.17**.

Tabelle 5.17 Mittelwerte von O₂, CO und NO_x beim Heizeinsatz für die beiden Abbrände für feuchtes Abgas (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung I

Abbrand	λ [-]	V _{tr} / V _{fe} [-]	O ₂ _feucht [Vol%]	CO_feucht [mg/m ³]	NO _x _feucht [mgNO ₂ /m ³]
Abbrand 1	5,8	0,96	15,9	2.000	45
Abbrand2	5,2	0,96	15,5	1.979	49

Im Vergleich hierzu sind in **Tabelle 5.18** die Mittelwerte der Messgrößen der Messboxen 3 und 4 aufgelistet.

Tabelle 5.18 Mittelwerte der Messgrößen für Mess3 und Mess4 beim Heizeinsatz für die beiden Abbrände (Sensormesstechnik) – Vergleichsmessung I

Mess3					
Abbrand	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Abbrand 1	70	16,1	5,2	2,36	48,5
Abbrand2	66	16,3	5,6	2,39	47,8

Mess4					
Abbrand	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Abbrand 1	215	16,0	5,2	2,43	47,9
Abbrand2	207	16,3	5,7	2,52	47,1

In **Bild 5-11** sind die Verläufe der O₂- und NO_x-Konzentrationen bei der Vergleichsmessung I (vor den Langzeitmessungen) für die konventionelle Messtechnik und die Sensoren der Messboxen 3 und 4 gezeigt. Aufgrund unterschiedlicher Totzeiten der Messverfahren (konventionelle Messtechnik mit Pumpen, Messgaskühler und Schläuchen, Sonden direkt im Abgas) sind die Verläufe nicht exakt deckungsgleich, auch unterscheidet sich das Niveau beim O₂ geringfügig und beim NO_x etwas (Mess3) bzw. sehr stark (Mess4).

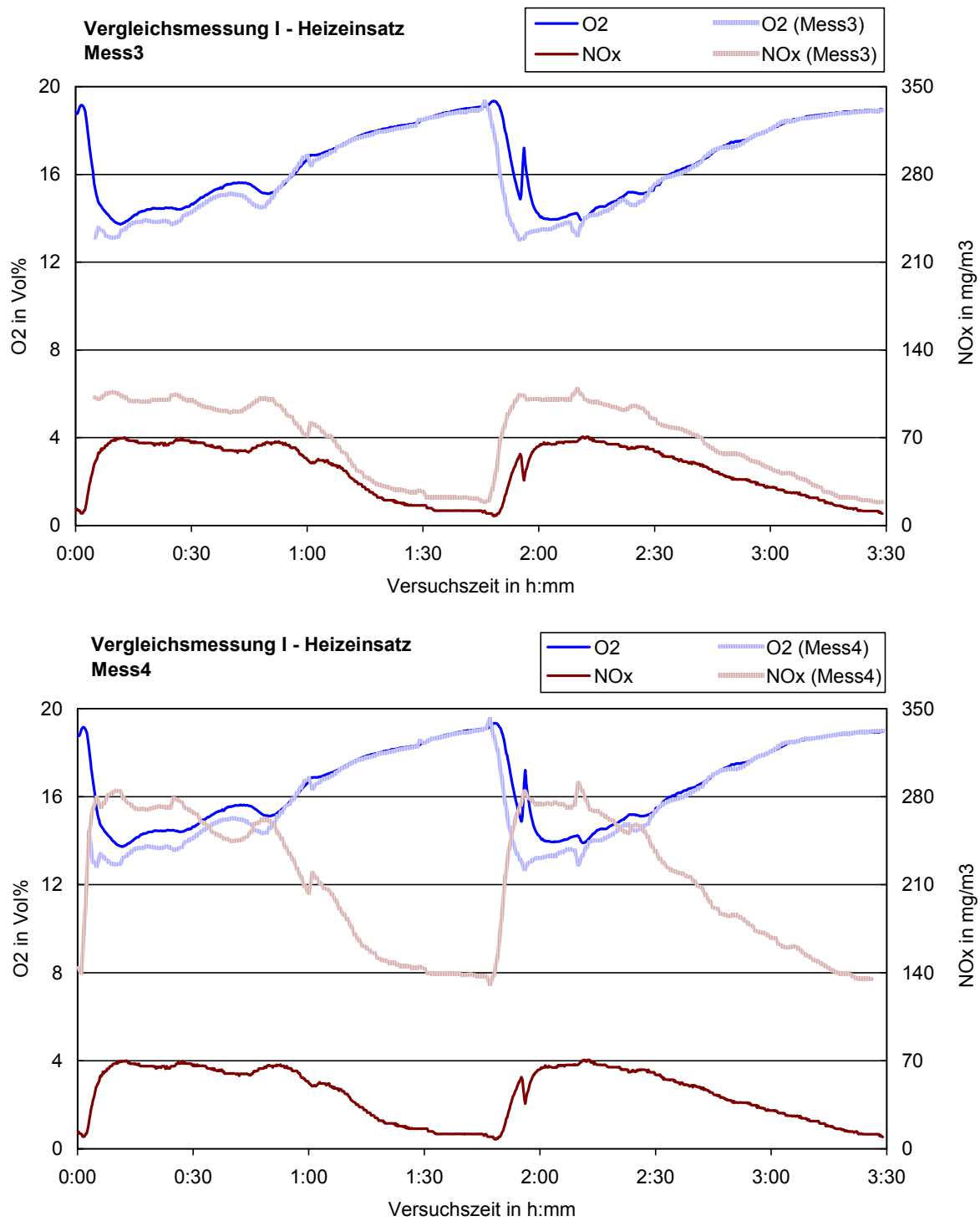


Bild 5-11 Konzentrationsverläufe für O₂ und NO_x bei der Vergleichsmessung I am Heizeinsatz für die Messboxen 3 und 4 im Vergleich zur konventionellen Messtechnik

Vergleichsmessung II

Nach der Langzeitmessung wurde mit den beiden Messboxen wiederum eine Vergleichsmessung (II) mit konventioneller Messtechnik am Heizeinsatz durchgeführt. Hierdurch sollten Änderungen von Nullpunkten, der Empfindlichkeit und Sondenfehlfunktionen ermittelt werden.

Gegenüber der Vergleichsmessung I wurde die Versuchszeit am Heizeinsatz um einen Abbrand mit Buchenholz verlängert. Die Vergleichsmessung II dauerte für Mess3 und Mess4 insgesamt mehr als 4 Stunden, mit folgenden Betriebszuständen:

	Vergleichsmessung II (nach Langzeitmessung)
Datum des Versuches	21.08.08
Betroffene Messboxen	Mess3 und Mess4
Vergleichsmessungsfeuerung	Kachelofenheizeinsatz - Buderus
Brennstoff	Holzbriketts und Buchenholz
Versuchszeit	04:32 Std.
1. Abbrand	01:40 Std.
2. Abbrand	01:07 Std.
3. Abbrand	01:45 Std.

Beispielhaft für die Vergleichsmessungen II sind in **Bild 5-12** die mit konventioneller Messtechnik gemessenen Verläufe der Gaskonzentrationen von O₂, CO, VOC und NO_x dargestellt.

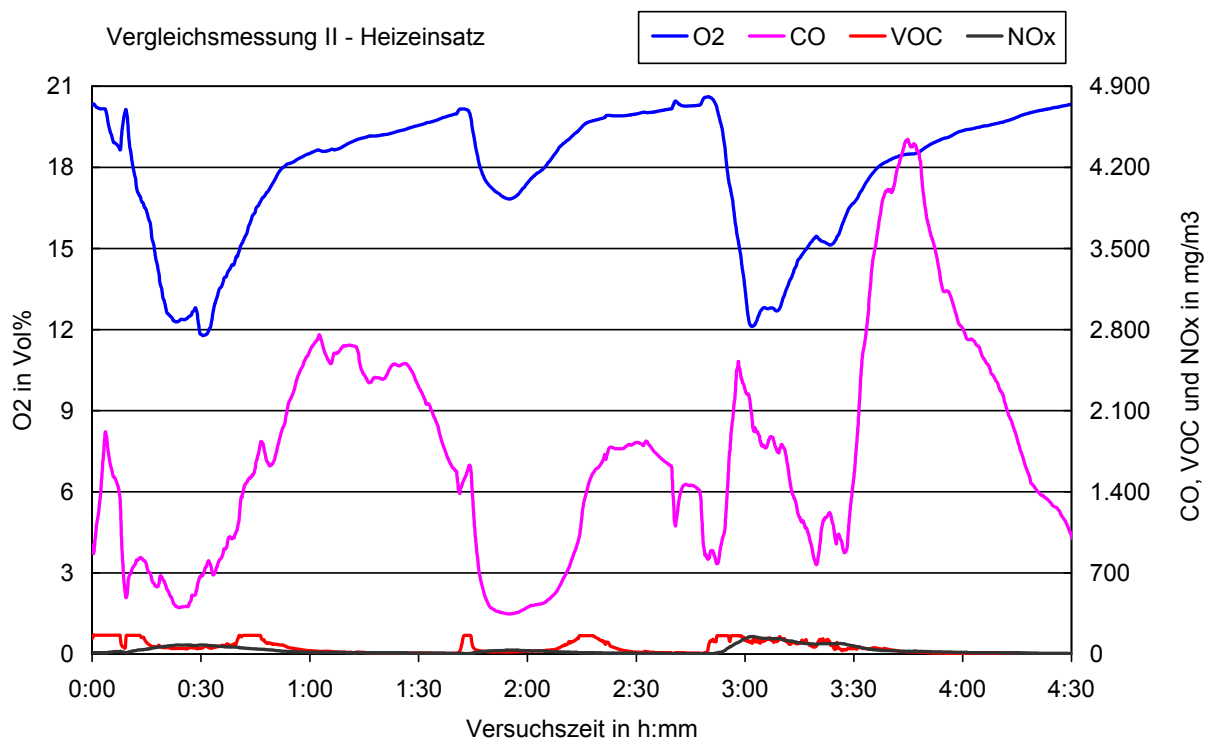


Bild 5-12 Verlauf der Gaskonzentrationen (konventionelle Messtechnik) beim Heizeinsatz für die Vergleichsmessung II mit den Messboxen 3 und 4

In **Tabelle 5.19** sind die mit konventioneller Messtechnik gemessenen mittleren Abgaskonzentrationen und -temperaturen sowie die Unterdrücke im Abgasrohr für den Heizeinsatz bei den 3 Abbränden aufgelistet.

Tabelle 5.19 Mittelwerte von Abgasparametern beim Heizeinsatz für die 3 Abbrände mit Holzbriketts und Buchenholz (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung II

Abbrand	Temperatur [°C]	Unterdruck [Pa]	CO ₂ [Vol%]	O ₂ [Vol%]	CO [mg/m ³]	VOC [mgC/m ³]	NO _x [mgNO ₂ /m ³]
Abbrand 1	-	22,9	3,5	17,3	1.659	61	40
Abbrand 2	-	22,2	1,9	19,1	1.128	48	21
Abbrand 3	-	23,1	3,2	17,7	2.130	50	42

Abbrand 1 und 2 mit Holzbriketts und Abbrand 3 mit Buchenscheitholz

Die auf feuchtes Abgas umgerechneten O₂-, CO- und NO_x-Messwerte sind in **Tabelle 5.20** aufgelistet. Im Vergleich hierzu sind in **Tabelle 5.21** die Mittelwerte der Messgrößen für die Messboxen 3 und 4 aufgelistet.

Tabelle 5.20 Mittelwerte von O₂, CO und NO_x beim Heizeinsatz für die 3 Abbrände mit Holzbriketts und Buchenholz für feuchtes Abgas (konventionelle Messtechnik) – Vergleichsmessung II

Abbrände	λ [-]	V _{tr} / V _{fe} [-]	O ₂ _feucht [Vol%]	CO_feucht [mg/m ³]	NO _x _feucht [mgNO ₂ /m ³]
Abbrand 1	8,9	0,97	16,8	1.622	38
Abbrand 2	14,7	0,98	18,8	1.114	21
Abbrand 3	11,4	0,97	17,3	2.076	40

Abbrand 1 und 2 mit Holzbriketts und Abbrand 3 mit Buchenscheitholz

Tabelle 5.21 Mittelwerte der Messgrößen für Mess3 und Mess4 beim Heizeinsatz für 3 Abbrände mit Holzbriketts und Buchenholz (Sensormesstechnik) – Vergleichsmessung II

Mess3					
Abbrände	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Abbrand 1	226	16,2	6,0	2,33	23,0
Abbrand 2	219	18,1	8,6	2,25	5,7
Abbrand 3	227	16,6	7,2	2,36	23,4

Mess4					
Abbrände	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [Vol%]	Lambda [-]	CO+HC [VDC]	Unterdruck [Pa]
Abbrand 1	231	16,6	7,0	2,21	21,0
Abbrand 2	164	18,5	10,6	2,19	3,0
Abbrand 3	247	17,0	8,9	2,21	20,8

Bild 5-13 zeigt die Verläufe der O₂- und NO_x-Konzentrationen bei den Vergleichsmessungen II (nach den Langzeitmessungen) für die konventionelle Messtechnik und die Sensoren der Messboxen 3 und 4.

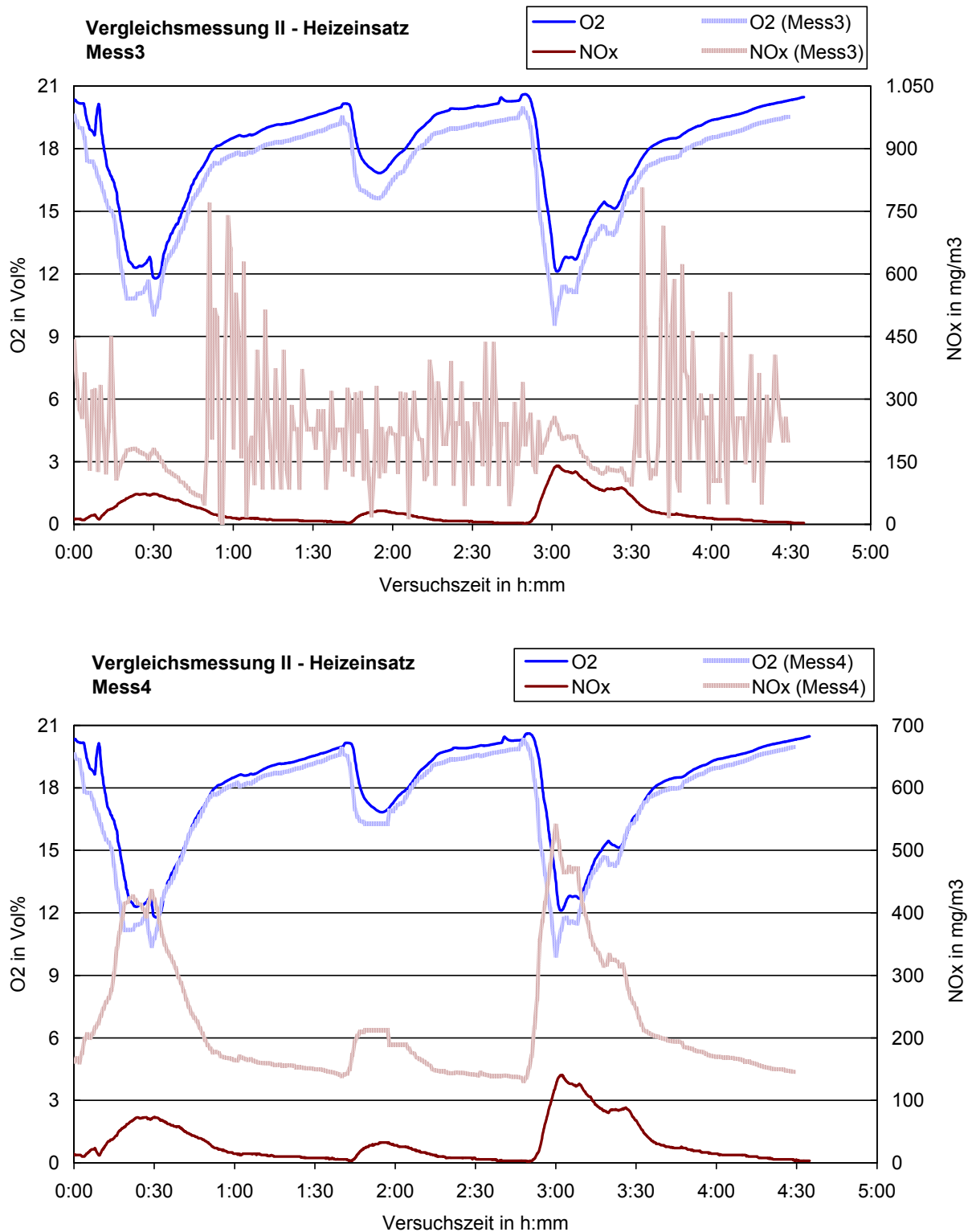


Bild 5-13 Konzentrationsverläufe für CO und NO_x bei der Vergleichsmessung II am Heizeinsatz für die Messboxen 3 und 4 im Vergleich zur konventionellen Messtechnik

Die Sauerstoffkonzentrationen bei den Messboxen 3 und 4 und die NO_x-Konzentration bei der Messbox 4 zeigen einen ähnlichen Unterschied zur konventionellen Messtechnik wie bei den Vergleichsmessungen I. Auch die Verläufe der Sondensignale sind plausibel und folgen den Konzentrationen der konventionellen Messtechnik. Im Gegensatz hierzu folgt der NO_x-Sensor von Messbox 3 der tatsächlichen NO_x-Konzentration im Abgas nur zeitweise. Meist werden nur Störsignale von der Sonde ausgegeben, die mit den tatsächlichen Gaskonzentrationen in keinem Zusammenhang stehen. Die NO_x-Sonde ist demnach defekt, was bereits während den Langzeitmessungen erkennbar wurde.

Korrekturfaktoren

Das Vorgehen zur Ermittlung der Korrekturfaktoren bzw. der Korrekturfunktionen erfolgte in gleicher Art und Weise wie bei den Messboxen 1 und 2.

Messbox 3 - O₂

In **Tabelle 5.22** sind die Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox3 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.22 Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox3 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox3		Messbox3	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
O2 in Vol%		O2 in Vol%	
Referenzverfahren	15,7	Referenzverfahren	17,6
O2 - Mess3	16,2	O2 - Mess3	17,0
O2 - Mess3 - korrigiert	16,0	O2 - Mess3 - korrigiert	17,6

Korrekturfunktionen für O2

$$y = 0,9481 x + 0,6436$$

$$y = 0,9229 x + 1,9642$$

Sowohl bei der Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens.

Messbox 3 – NO_x

In **Tabelle 5.23** sind die Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox3 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Bei der Vergleichsmessung I ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens. Aufgrund der Sondenfehlfunktion, die im Laufe der Langzeitmessung auftrat, konnte bei der Vergleichsmessung II keine gute Übereinstimmung mehr zwischen Referenzverfahren und Sondensignal ermittelt werden.

Tabelle 5.23 Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox3 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox3		Messbox3	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
NOx in mg/m3		NOx in mg/m3	
Referenzverfahren	47	Referenzverfahren	33
NOx - Mess3	68	NOx - Mess3	224
NOx - Mess3 - korrigiert	45	NOx - Mess3 - korrigiert	44

Korrekturfunktionen für NOx

$$y = 0,6743 x - 0,7704$$

$$y = 0,0908 x - 23,6750$$

Messbox 3 – CO-Äquivalente

In **Tabelle 5.24** sind die Mittelwerte für die Summe von CO und VOC für die Referenzmessverfahren und das Summensignal des CO+HC-Sensors angegeben. Aus dem Summensignal wurden die CO-Äquivalente für die Messbox3 berechnet. Unter der Annahme, dass alle organischen Verbindungen im Abgas im Mittel am Sensor die gleiche Empfindlichkeit wie CO bewirkt, können diese dann aus den CO-Äquivalenten, mit einer Annahme zum %-Anteil für HC, angegeben werden.

Tabelle 5.24 Mittelwerte für CO+VOC für die Referenzmessverfahren und CO-Äquivalente für die Messbox3 (CO – Mess3- korrigiert) sowie des Summensignals des Sensors

Messbox3		Messbox3	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
CO+VOC in mg/m3		CO+VOC in mg/m3	
Referenzverfahren	1.990	Referenzverfahren	1.604
CO+HC in V - Mess3	2,4	CO+HC in V - Mess3	2,3
CO - Mess3 - korrigiert	2.192	CO - Mess3 - korrigiert	1.543

Korrekturfunktionen für CO – Teillast

$$y = 5463,40 x - 10775$$

$$y = 5463,40 x - 10775$$

Korrekturfunktionen für CO – mittlere Leistung

$$y = 7339,70 x - 15445$$

$$y = 7339,70 x - 15445$$

Sowohl für Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich bei Messbox3 eine gute Übereinstimmung zwischen den CO-Äquivalenten der CO+HC- Sonde und den Referenzmessverfahren.

Messbox 3 – Schornsteinzug (Unterdruck im Abgasrohr)

In **Tabelle 5.25** sind die Mittelwerte für den Schornsteinzug für das Referenzmessverfahren und die Messbox3 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.25 Mittelwerte für den Schornsteinzug mit Referenzmessverfahren und für Messbox3 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox3		Messbox3	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
Zug in Pa		Zug in Pa	
Referenzverfahren	20,3	Referenzverfahren	22,7
Zug - Mess3	48,1	Zug - Mess3	17,4
Zug - Mess3 - korrigiert	20,3	Zug - Mess3 - korrigiert	20,8

Korrekturfunktionen für Schornsteinzug

$$y = 0,2566 x + 7,9205$$

$$y = 0,3764 x + 14,2160$$

Bei der Vergleichsmessung I ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Werten der Messbox3 und den Werten des Referenzverfahrens. Bei der Vergleichsmessung II konnte keine so gute Übereinstimmung zwischen den Werten mehr ermittelt werden.

Messbox 4 - O₂

In **Tabelle 5.26** sind die Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox4 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.26 Mittelwerte für O₂ für das Referenzmessverfahren und die Messbox4 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox4		Messbox4	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
O2 in Vol%		O2 in Vol%	
Referenzverfahren	15,7	Referenzverfahren	17,6
O2 - Mess4	16,1	O2 - Mess4	17,4
O2 - Mess4 - korrigiert	16,0	O2 - Mess4 - korrigiert	17,6

Korrekturfunktionen für O₂

$$y = 0,9315 x + 1,0041$$

$$y = 0,9493 x + 1,1409$$

Bei der Vergleichsmessung II ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens, bei der Vergleichsmessung I ist die Übereinstimmung nicht so gut.

Messbox 4 – NO_x

In **Tabelle 5.27** sind die Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox4 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.27 Mittelwerte für NO_x für das Referenzmessverfahren und die Messbox4 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox4		Messbox4	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
NO _x in mg/m ³		NO _x in mg/m ³	
Referenzverfahren	47	Referenzverfahren	33
NO _x - Mess4	211	NO _x - Mess4	214
NO _x - Mess4 - korrigiert	46	NO _x - Mess4 - korrigiert	29

Korrekturfunktionen für NO_x

$$y = 0,3861 x + 35,9580$$

$$y = 0,3123 x + 37,8220$$

Bei der Vergleichsmessung I ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Sondenwerten und den Werten des Referenzverfahrens. Für die Vergleichsmessung II wurde keine so gute Übereinstimmung mehr zwischen Referenzverfahren und Sondenwert erreicht.

Messbox 4 – CO-Äquivalente

In **Tabelle 5.28** sind die Mittelwerte für die Summe von CO und VOC für die Referenzmessverfahren und das Summensignal des CO+HC-Sensors angegeben. Aus dem Summensignal wurden die CO-Äquivalente für die Messbox4 berechnet. Unter der Annahme, dass alle organischen Verbindungen im Abgas im Mittel am Sensor die gleiche Empfindlichkeit wie CO bewirkt, können diese dann aus den CO-Äquivalenten, mit einer Annahme zum %-Anteil für HC, angegeben werden.

Tabelle 5.28 Mittelwerte für CO+VOC für die Referenzmessverfahren und CO-Äquivalente für die Messbox4 (CO – Mess4- korrigiert) sowie des Summensignals des Sensors

Messbox4		Messbox4	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
CO+VOC in mg/m ³		CO+VOC in mg/m ³	
Referenzverfahren	2.027	Referenzverfahren	1.657
CO+HC in V - Mess4	2,5	CO+HC in V - Mess4	2,2
CO - Mess4 - korrigiert	1.958	CO - Mess4 - korrigiert	1.751

Korrekturfunktionen für CO – Teillast

$$y = 3601,20 x - 7083$$

$$y = 41778,00 x - 90225$$

Korrekturfunktionen für CO – mittlere Leistung

$$y = 2795,70 x - 4958$$

$$y = 41675,00 x - 90357$$

Sowohl für Vergleichsmessung I als auch II ergibt sich bei Messbox4 eine gute Übereinstimmung zwischen den CO-Äquivalenten der CO+HC- Sonde und den Referenzmessverfahren.

Messbox 4 – Schornsteinzug (Unterdruck im Abgasrohr)

In **Tabelle 5.29** sind die Mittelwerte für den Schornsteinzug für das Referenzmessverfahren und die Messbox4 mit den Messwerten und den korrigierten Werten für die Vergleichsmessungen I und II aufgelistet.

Tabelle 5.29 Mittelwerte für den Schornsteinzug mit Referenzmessverfahren und für Messbox4 (Messwerte und korrigierte Werte) für die Vergleichsmessungen I und II

Messbox4		Messbox4	
Mittelwerte für Vergleichsmessung I		Mittelwerte für Vergleichsmessung II	
Zug in Pa		Zug in Pa	
Referenzverfahren	20,3	Referenzverfahren	22,7
Zug - Mess4	47,5	Zug - Mess4	14,9
Zug - Mess4 - korrigiert	20,3	Zug - Mess4 - korrigiert	22,9

Korrekturfunktionen für Schornsteinzug

$$y = 0,1979 x + 10,8520$$

$$y = -0,004 x + 23,0080$$

Bei der Vergleichsmessung I ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den korrigierten Werten der Messbox4 und den Werten des Referenzverfahrens. Bei der Vergleichsmessung II konnte keine ganz so gute Übereinstimmung zwischen den Werten mehr ermittelt werden.

6 Ergebnisse der Langzeitmessungen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Langzeitmessungen an den verschiedenen Feuerungsanlagen beschrieben. Die Aufarbeitung der Rohdaten der vier Messboxen wurde in folgenden Schritten vorgenommen: Plausibilitätsprüfung und Prüfung auf Vollständigkeit – Aussortieren von nicht plausiblen Messdaten – Einarbeitung der Korrekturfunktionen in die Zusammenstellungen für jede Messwoche – Sortierung der Werte nach Betriebszuständen und Berechnung von mittleren Wochenwerten für die einzelnen Betriebszustände. Die Zuordnung der Messwerte auf die einzelnen Betriebszustände erfolgt anhand der gemessenen Sauerstoffkonzentrationen, die Festlegung der jeweiligen O₂-Sortiergrenzen erfolgte anlagenspezifisch.

Die gasförmigen Emissionen werden als Messwerte und bezogen auf 13 Vol% O₂ angegeben. Für die Betriebszustände Teil- und Volllast werden darüber hinaus die Abgasverluste berechnet. Die Berechnung des Abgasverlustes erfolgte nach der ÖNORM 7510-4 (Vorschlag, 2007). Hier wird ein vereinfachtes Berechnungsverfahren entsprechend der Siegertschen Formel in der 1. BImSchV (2001) vorgeschlagen, wobei die Konstanten A2 und B entsprechend dem Wassergehalt im Brennstoff gewählt werden.

6.1 Pelletkessel - Messbox 1

Mit der Messbox1 wurden am Pelletkessel für insgesamt 120 Tage Messungen durchgeführt. Zu Beginn der Langzeitmessungen gab es einige Probleme, die zu Messwertausfällen geführt haben. So wurden in den ersten drei Messtagen nur für wenige Stunden Messwerte aufgezeichnet, da die Stromversorgung an der verwendeten Steckdose mit dem Lichtschalter des Heizraumes gekoppelt war. Wurde das Licht ausgeschaltet, wurde auch die Steckdose stromlos geschaltet. Weiterhin gab es geringfügige Datenausfälle bei Kesselwartungen, Unterbrechungen der Stromversorgung oder Schreibfehler der Software. Für die Endauswertung wurden nur vollständige Datensätze verwendet.

Während der Langzeitmessung wurde der Kessel dreimal auf Grund von Pelletlieferungen, einmal auf Grund eines Versuchs mit der Förderschnecke für Pellets und zweimal aus anderen technischen Gründen ausgeschaltet. Bei der Messbox1 trat nur einmal eine kleinere Störung bei der Messwertaufzeichnung in der KW 16 auf.

In der KW 12 wurde die Anlage vom Heizbetrieb (d.h. Kessel schaltet nie vollständig ab, bei geringem Wärmebedarf geht die Anlage in den Gluthaltebetrieb) auf Übergangsbetrieb (Anlage schaltet bei geringem Wärmebedarf ganz ab) umgeschaltet. Die beiden Betriebsarten sind in den Ergebnissen deutlich sichtbar.

Da die automatische Datenübertragung per Mail aufgrund von Empfangsproblemen im Heizraum und der Softwareprogrammierung nicht zuverlässig funktioniert hatte, wurden die Daten regelmäßig abgeholt.

Im Heizraum wurde die Raumtemperatur nur sporadisch erfasst, hier wurde für die Abgasverlustberechnung eine Temperatur von 30 °C angesetzt. Die Abgastemperatur wurde bei diesem Kessel hinter einem Zyklon gemessen. Deshalb wurde bei der Wirkungsgradberechnung davon ausgegangen, dass die Temperatur im Abgas direkt hinter dem Kessel bei Volllast um 10 und bei Teillast um 15 K höher liegt als an der Temperaturmessstelle.

Für die Berechnung der HC-Konzentrationen aus den CO-Äquivalenten wurde beim Pelletkessel angenommen, dass 10 % des Summensignals auf HC entfallen.

Beim Pelletkessel wurden die Betriebszustände An- und Abschaltvorgänge, Gluthaltebetrieb sowie Teil- und Volllastbetrieb unterschieden. In **Tabelle 6.1** sind die O₂-Sortiergrenzen für die jeweiligen Betriebszustände aufgeführt.

Tabelle 6.1 O₂-Sortiergrenzen für die beim Pelletkessel betrachteten Betriebszustände – Messbox1

Betriebszustände Pelletkessel Messbox1	O ₂ – Sortiergrenzen in Vol%
An- und Abschaltvorgänge	> = 19
Gluthaltebetrieb	> = 17 < 19
Teillastbetrieb	> 13 < 17
Volllastbetrieb	< = 13

Im folgenden **Bild 6-1** wird das Betriebsverhalten des Pelletkessels beispielhaft anhand von jeweils 2 Betriebstagen bei höherem (mittlere Außentemperatur ~ 2°C) und geringerem Wärmebedarf (mittlere Außentemperatur ~ 22 °C) gezeigt. In der KW 7 wechselt der Heizkessel ständig zwischen Gluthalt und Voll- bzw. Teillastbetrieb, trotz der relativ geringen Außentemperaturen wird kein stabiler Teillastbetrieb erreicht. Die CO+HC-Emissionen (dargestellt als CO-Äquivalente) liegen auf relativ geringem Niveau. Bei geringerem Wärmebedarf und der Betriebsart „Übergangsbetrieb“ in der KW 22 schaltet der Heizkessel immer wieder für längere Zeit komplett ab. Während der Betriebsphasen treten erhöhte CO+HC-Konzentrationen aufgrund des Anfahrbetriebs und der kurzen Phasen im Leistungsbetrieb (bei noch kalten Brennkammer) auf.

In **Tabelle 6.2** sind für den Pelletkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Volllast aufgeführt.

Tabelle 6.3 enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste (Wassergehalt der Holzpellets 6,8 Massen-%).

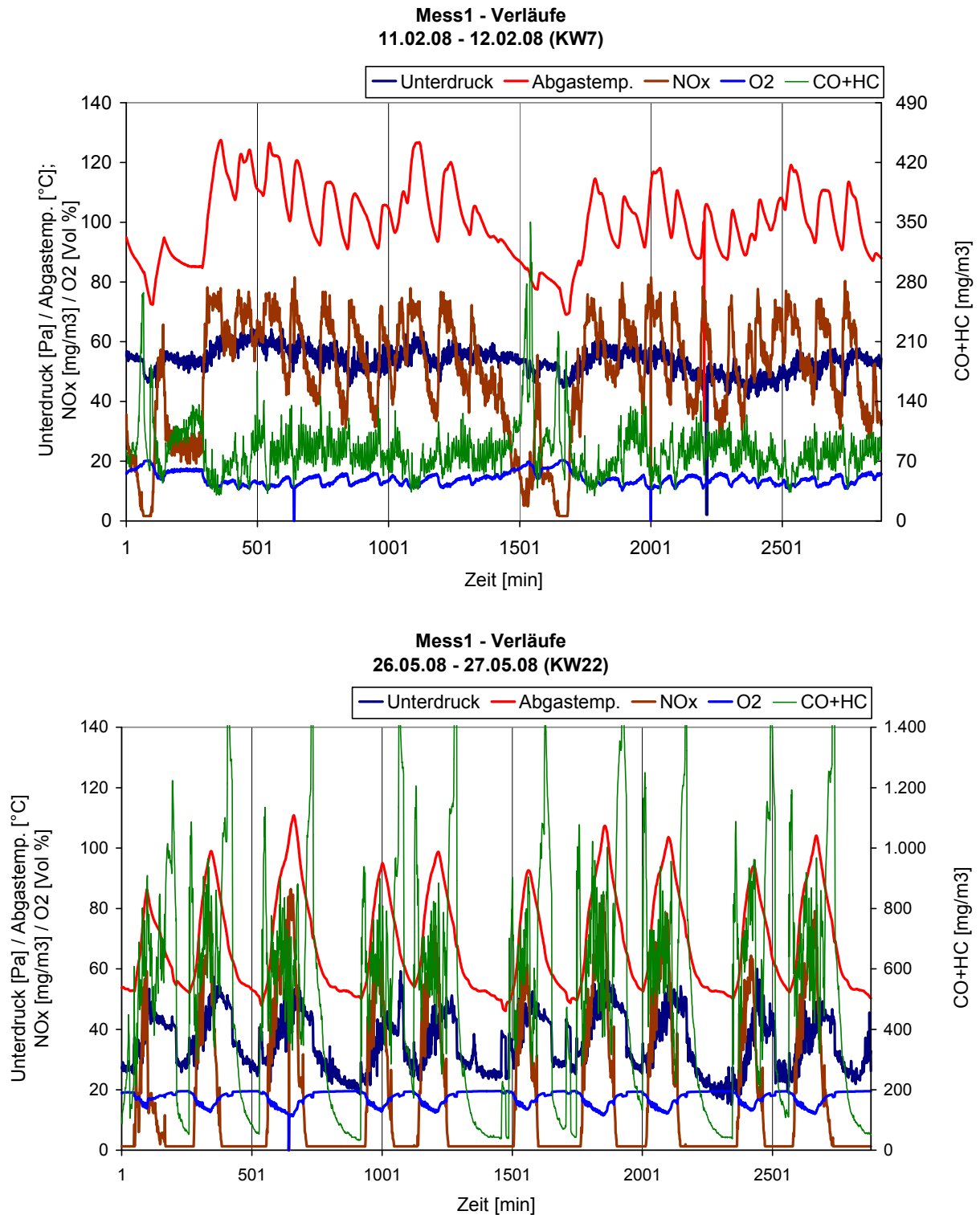


Bild 6-1 Betriebsverhalten des Pelletkessels an jeweils 2 Tagen bei höherer (KW7) und geringerer (KW22) Wärmeleistung - Messbox1

Tabelle 6.2 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Volllast beim Pelletkessel - Mess1

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	12,1	12,3	12,5	12,5	12,6	11,9	11,7	12,1	12,1	12,0	11,9	11,8	12,0	12,2	11,8	12,3	
Max O2	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	
Min O2	5,3	9,6	11,4	9,5	2,4	10,2	1,4	10,8	10,7	7,5	10,4	10,3	10,5	7,3	9,9	10,8	
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	61	77	134	119	164	154	173	205	173	201	247	291	369	414	420	547	
Max CO	158	258	393	360	464	480	465	449	426	526	556	819	748	735	786	961	
Min CO	23	25	43	12	24	18	26	58	47	42	56	64	154	156	113	259	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	7	9	15	13	18	17	19	23	19	22	27	32	41	46	47	61	
Max HC	18	29	44	40	52	53	52	50	47	58	62	91	83	82	87	107	
Min HC	3	3	5	1	3	2	3	6	5	5	6	7	17	17	13	29	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	69	67	68	68	70	90	100	100	103	104	105	108	104	101	84	74	
Max NOx	106	94	84	82	81	116	118	117	117	117	119	199	119	119	113	91	
Min NOx	40	58	61	60	61	63	1	84	84	39	84	87	89	87	63	59	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	58,4	54,2	53,1	59,8	57,1	63,7	56,3	56,5	58,2	59,2	54,7	54,4	54,0	51,4	58,0	45,9	
Max Unterdruck	64,7	66,6	68,6	70,4	72,4	74,2	73,7	71,1	77,0	78,0	68,6	73,5	75,4	66,1	82,7	59,6	
Min Unterdruck	2,1	35,3	38,9	39,5	43,0	39,1	1,5	39,3	41,1	42,4	39,1	19,9	39,7	35,6	39,5	32,3	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	0,2	4,2	8,9	3,9	8,6	2,5	4,8	7,3	2,1	7,9	11,1	12,1	13,6	15,0	13,3	11,5	
Max Aus.Temp.	10,6	18,1	16,7	12,5	15,5	6,3	22,2	15,2	2,1	19,3	20,4	17,3	25,1	23,9	22,7	29,3	
Min Aus.Temp.	-8,8	-7,3	-0,1	-6,3	4,6	-2,5	-1,3	0,8	2,1	0,9	3,8	6,6	4,6	8,4	8,7	0,0	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	115	115	115	123	116	122	113	112	113	113	111	110	108	109	111	102	
Max Ab.Temp.	139	137	131	140	133	144	130	126	127	127	128	126	123	123	129	118	
Min Ab.Temp.	34	90	94	64	96	65	89	92	90	91	91	91	91	92	91	81	
Betriebszeit																	
Zeit in min	4.045	2.738	1.413	2.080	1.598	2.549	2.945	2.225	2.252	2.210	1.916	1.538	809	763	1.100	397	
Zeit in h	67,4	45,6	23,6	34,7	26,6	42,5	49,1	37,1	37,5	36,8	31,9	25,6	13,5	12,7	18,3	6,6	

Tabelle 6.3 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen (für feuchtes Abgas) und der Abgasverluste der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Vollast beim Pelletkessel – Mess1

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO		55	71	127	112	155	136	148	184	155	178	218	253	329	376	364	502
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC		6	8	14	12	17	15	16	20	17	20	24	28	37	42	40	56
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x		62	61	64	64	66	80	86	90	92	93	93	93	93	92	73	68
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A		8,2	8,4	8,5	9,2	8,6	8,6	7,6	7,9	7,9	7,9	7,6	7,5	7,5	7,7	7,5	7,2

* Abgasverluste sind etwas zu hoch, da mit O₂ bezogen auf feuchtes Abgas berechnet

In **Bild 6-2** bis **Bild 6-4** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen bei Volllast dargestellt.

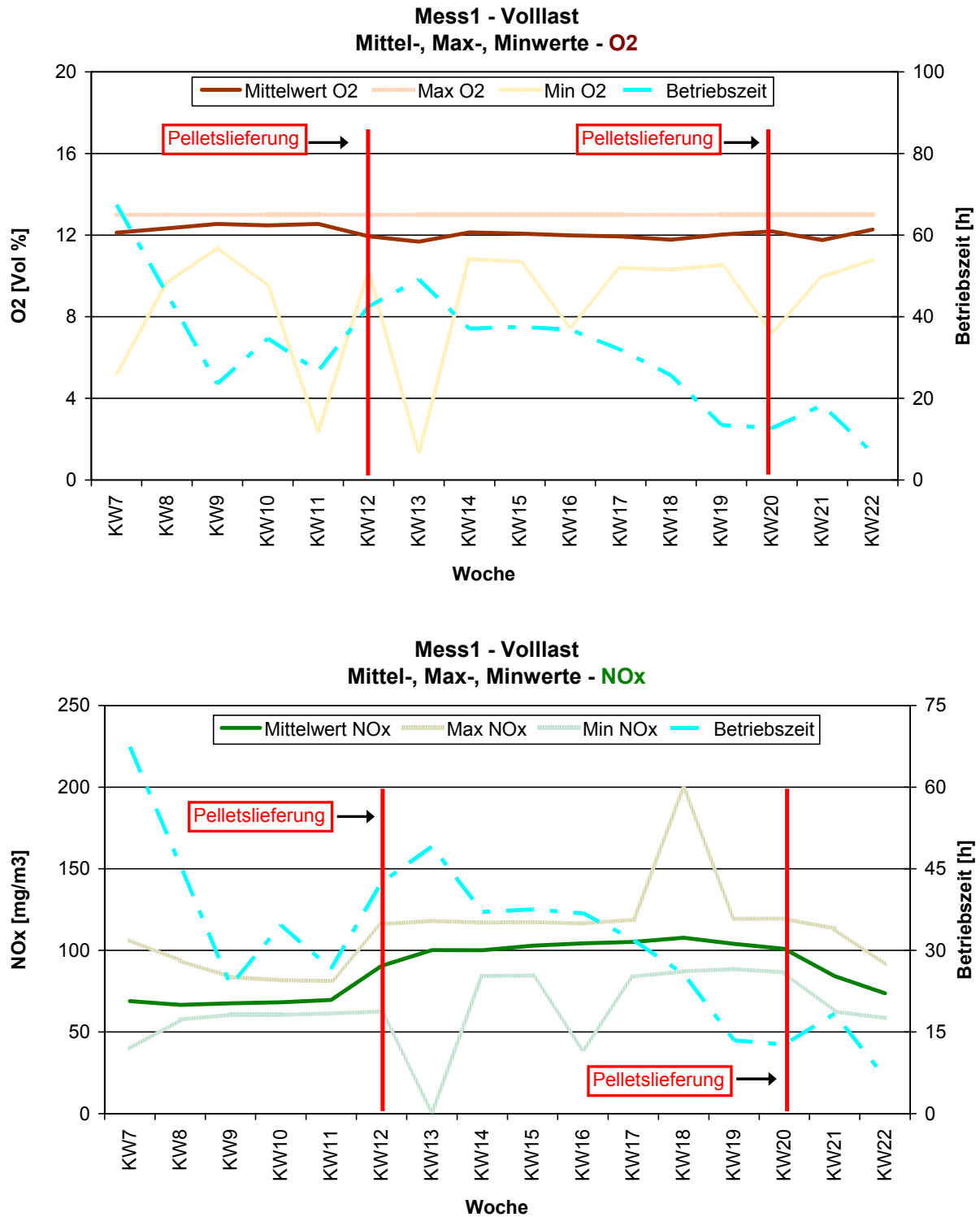


Bild 6-2 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Pelletkessel für O₂ und NO_x - Messbox1

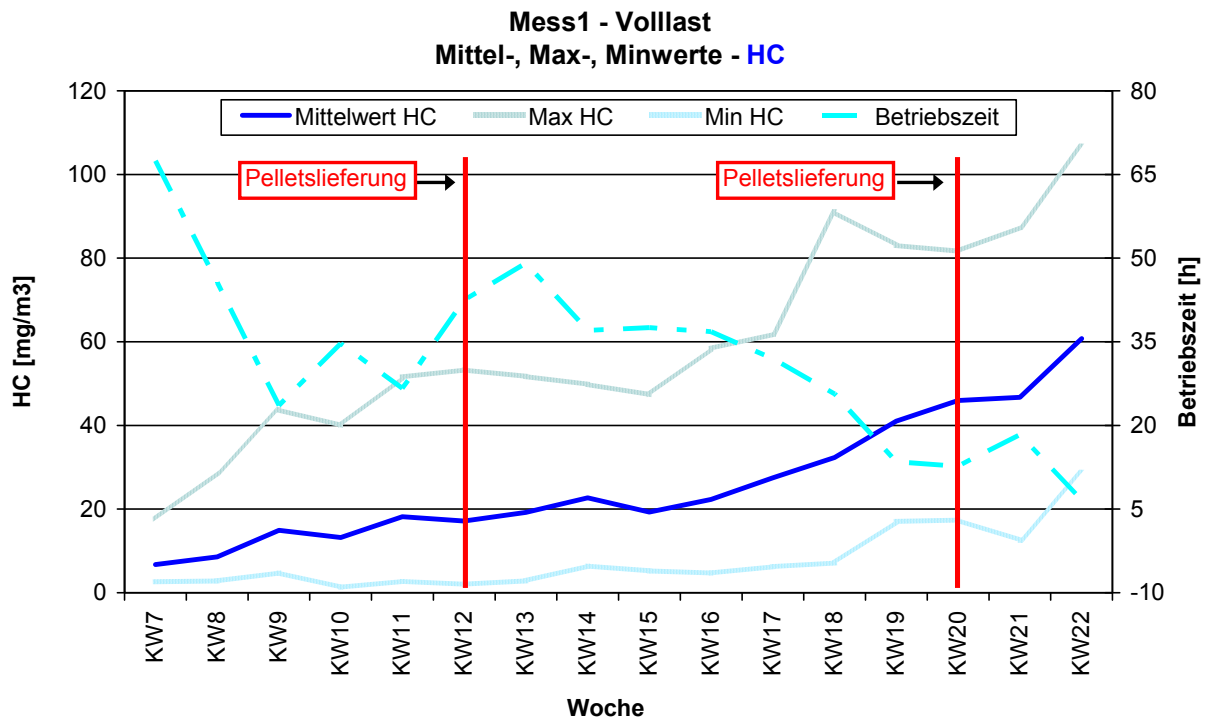
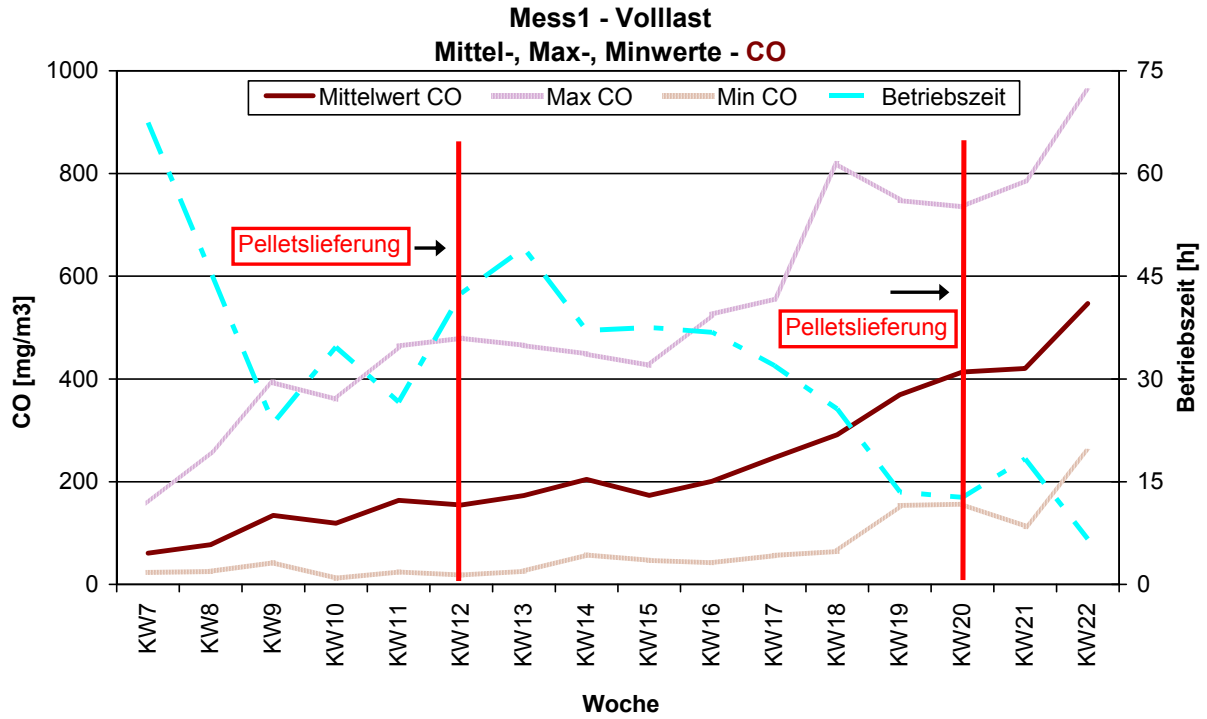


Bild 6-3 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Pelletkessel für CO und HC - Messbox1

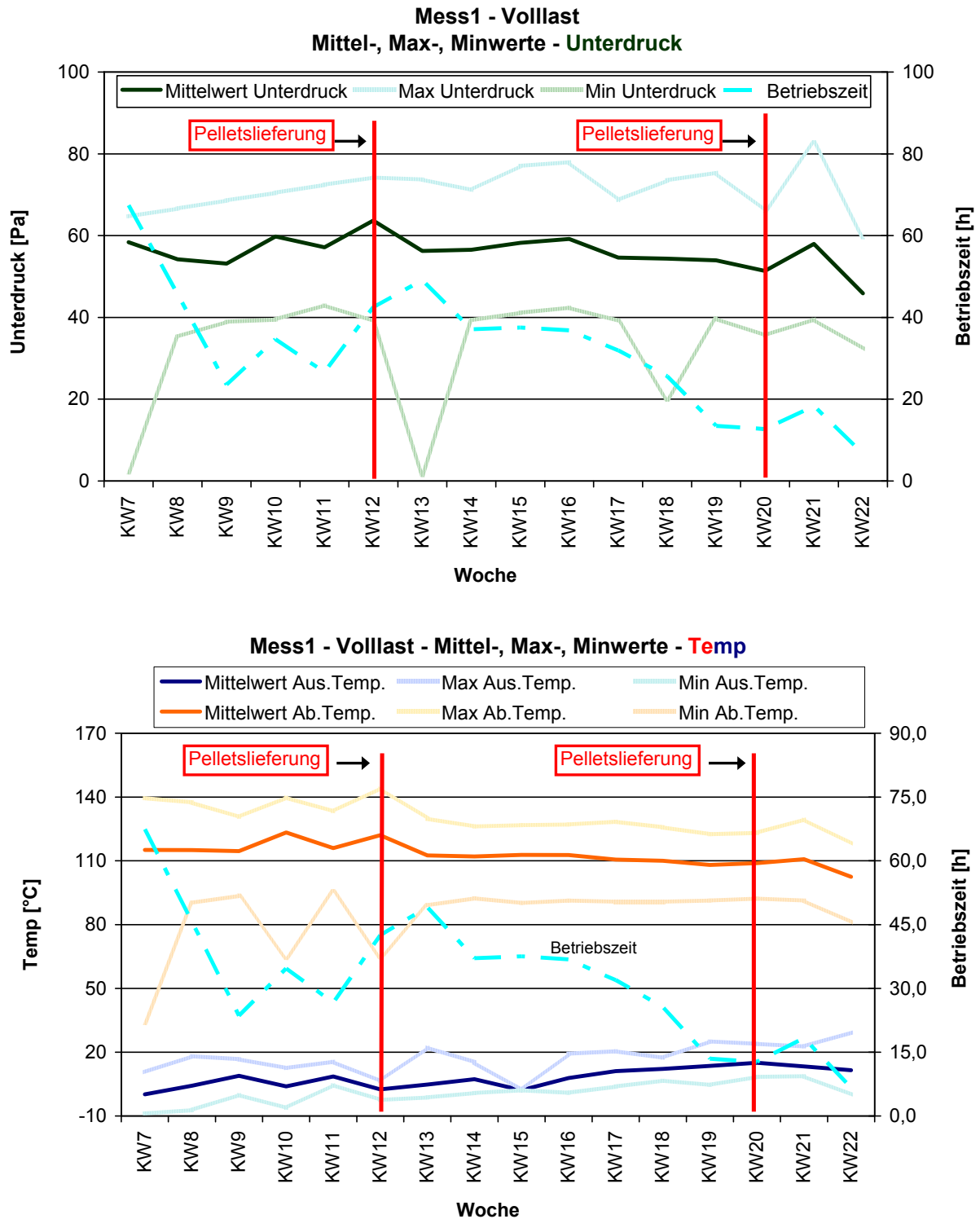


Bild 6-4 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Pelletkessel für Schornsteinzug (Unterdruck) und Temperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) - Messbox1

Die mittlere O₂-Konzentration bei Volllast war während der ganzen Messperiode nahezu konstant und unabhängig von den wöchentlichen Betriebszeiten. Bei den CO- und HC-Emissionen ergab sich allerdings eine deutlich Abhängigkeit von der Betriebszeit. Mit abnehmendem Anteil des wöchentlichen Volllastbetriebs nehmen die CO- und HC-Konzentrationen zu. Die mittleren NO_x-Konzentrationen für die einzelnen Betriebswochen sind etwas von der Dauer der Betriebszeiten bei Volllast abhängig. Der größte Zusammenhang zeigt sich allerdings zur jeweiligen Pelletqualität. Nach der ersten Pelletlieferung in der KW 12 nimmt die NO_x-Konzentration im Abgas deutlich zu, nach der zweiten Pelletlieferung in der KW 20 nimmt die mittlere NO_x-Konzentration im Abgas wieder ab. Der geregelte Schornsteinzug ist etwas von der Betriebszeit des Kessels abhängig. Mit abnehmendem Anteil des Volllastbetriebs nimmt auch der mittlere Schornsteinzug ab. Die Abgastemperatur nimmt ebenfalls mit der Betriebszeit bei Volllast ab.

In **Tabelle 6.4** sind für den Pelletkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Teillast aufgeführt.

Tabelle 6.5 enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste.

Tabelle 6.4 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Teillast beim Pelletkessel - Mess1

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	14,5	14,6	14,9	14,6	14,6	14,6	14,6	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,0	15,1	15,2
Max O2	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Min O2	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	72	88	135	130	194	240	283	266	270	283	347	345	384	426	439	512	
Max CO	131	266	478	433	499	559	546	539	546	586	784	742	842	793	870	957	
Min CO	34	25	15	1	13	22	67	53	55	39	78	64	82	97	89	94	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	8	10	15	14	22	27	31	30	30	31	39	38	43	47	49	57	
Max HC	15	30	53	48	55	62	61	60	61	65	87	82	94	88	97	106	
Min HC	4	3	2	0	1	2	7	6	6	4	9	7	9	11	10	10	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	48	46	46	49	49	54	63	63	64	63	61	61	61	60	44	40	
Max NOx	69	89	70	101	77	98	101	100	112	120	103	189	132	102	88	79	
Min NOx	22	15	18	18	18	18	28	27	28	26	25	24	20	21	15	12	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	57,0	51,8	51,0	58,8	55,9	61,8	52,5	51,4	53,5	55,0	50,2	48,4	47,4	43,9	50,3	39,5	
Max Unterdruck	64,6	66,3	68,6	70,6	72,4	74,3	73,3	72,2	74,9	80,6	79,1	70,6	80,8	64,5	90,4	60,0	
Min Unterdruck	2,1	33,6	33,2	37,4	38,9	35,5	22,1	27,6	32,6	34,1	30,0	1,1	20,8	17,3	27,4	15,1	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	0,3	6,5	9,5	4,1	9,5	2,8	5,3	7,6	2,1	7,9	11,7	12,1	16,0	15,9	14,6	13,6	
Max Aus.Temp.	10,6	18,1	16,7	12,6	15,6	8,4	22,3	16,1	2,1	19,4	20,4	20,4	25,1	25,6	24,1	31,6	
Min Aus.Temp.	-8,8	-7,3	-0,1	-6,6	4,6	-3,4	-1,3	0,8	2,1	0,9	3,2	4,2	3,8	6,4	7,8	0,0	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	97	102	100	107	105	106	92	91	93	93	90	89	86	86	87	82	
Max Ab.Temp.	141	138	128	138	129	145	131	125	125	124	125	124	120	120	126	116	
Min Ab.Temp.	0	70	71	68	71	54	60	59	58	62	58	56	55	54	52	53	
Betriebszeit																	
Zeit in min	5.167	6.051	6.807	6.186	6.589	4.687	2.984	2.974	2.734	2.670	2.890	2.276	2.800	2.757	2.478	2.471	
Zeit in h	86,1	100,9	113,5	103,1	109,8	78,1	49,7	49,6	45,6	44,5	48,2	37,9	46,7	46,0	41,3	41,2	

Tabelle 6.5 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen und der Abgasverluste der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Teillast beim Pelletkessel – Mess1

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO		89	111	175	162	242	297	378	356	363	383	471	467	511	566	599	702
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC		10	12	19	18	27	33	42	40	40	43	52	52	57	63	67	78
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x		59	58	59	61	61	67	84	85	86	85	83	83	81	79	60	55
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A		9,3	10,0	10,2	10,6	10,3	10,4	9,4	9,4	9,6	9,6	9,4	9,1	8,7	8,7	8,9	8,4

* Abgasverluste sind etwas zu hoch, da mit O₂ bezogen auf feuchtes Abgas berechnet

In **Bild 6-5** bis **Bild 6-7** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen bei Teillast dargestellt.

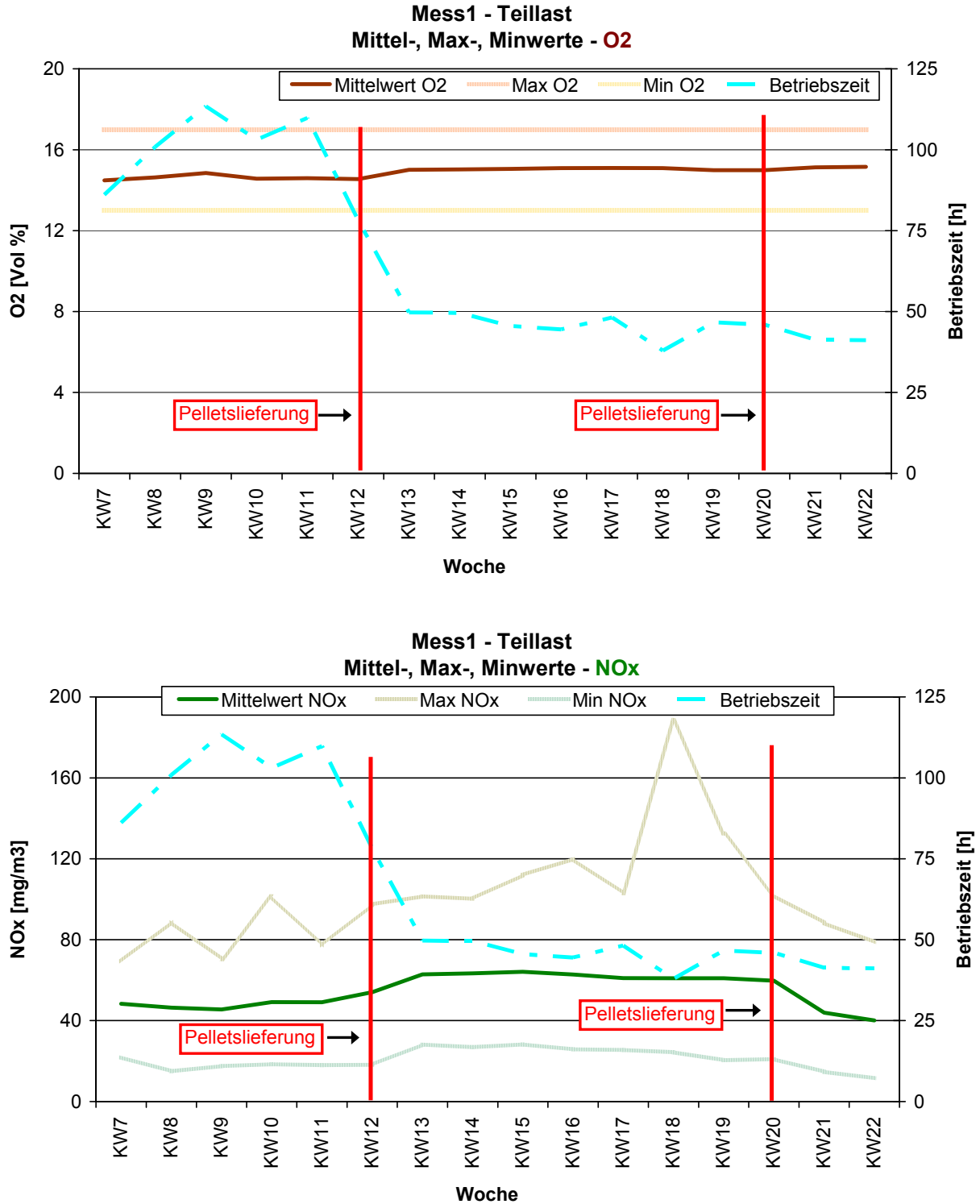


Bild 6-5 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Pelletkessel für O₂ und NO_x - Messbox1

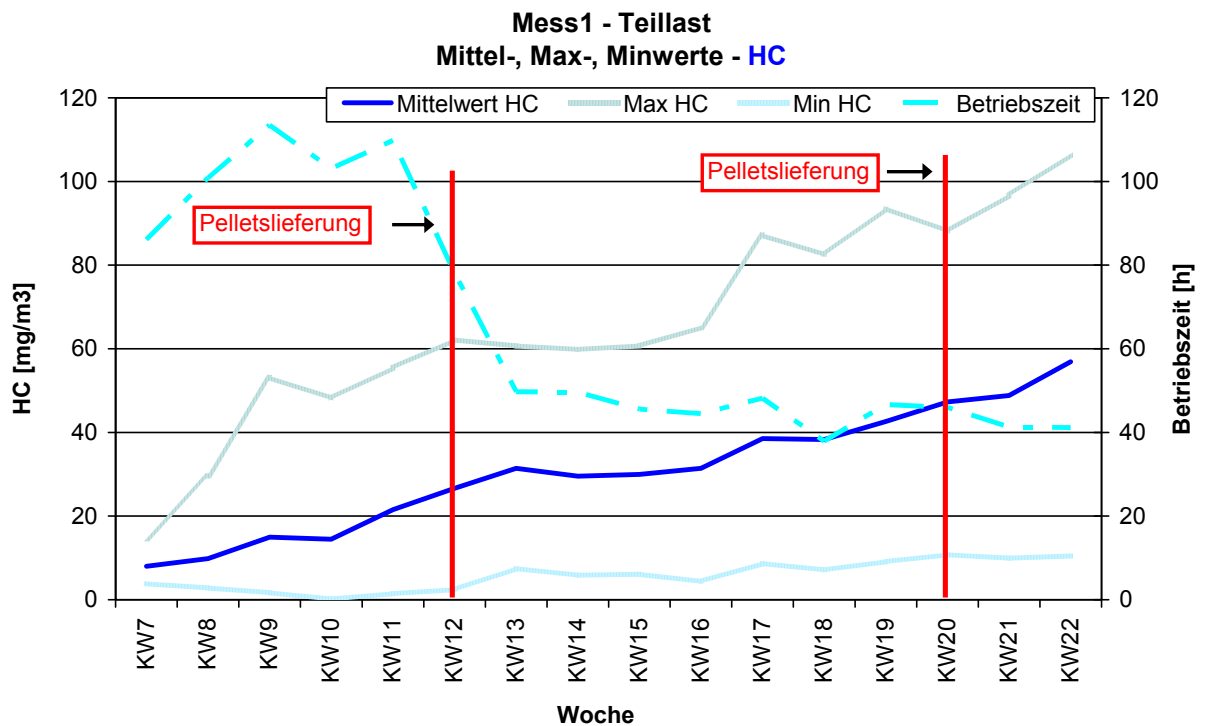
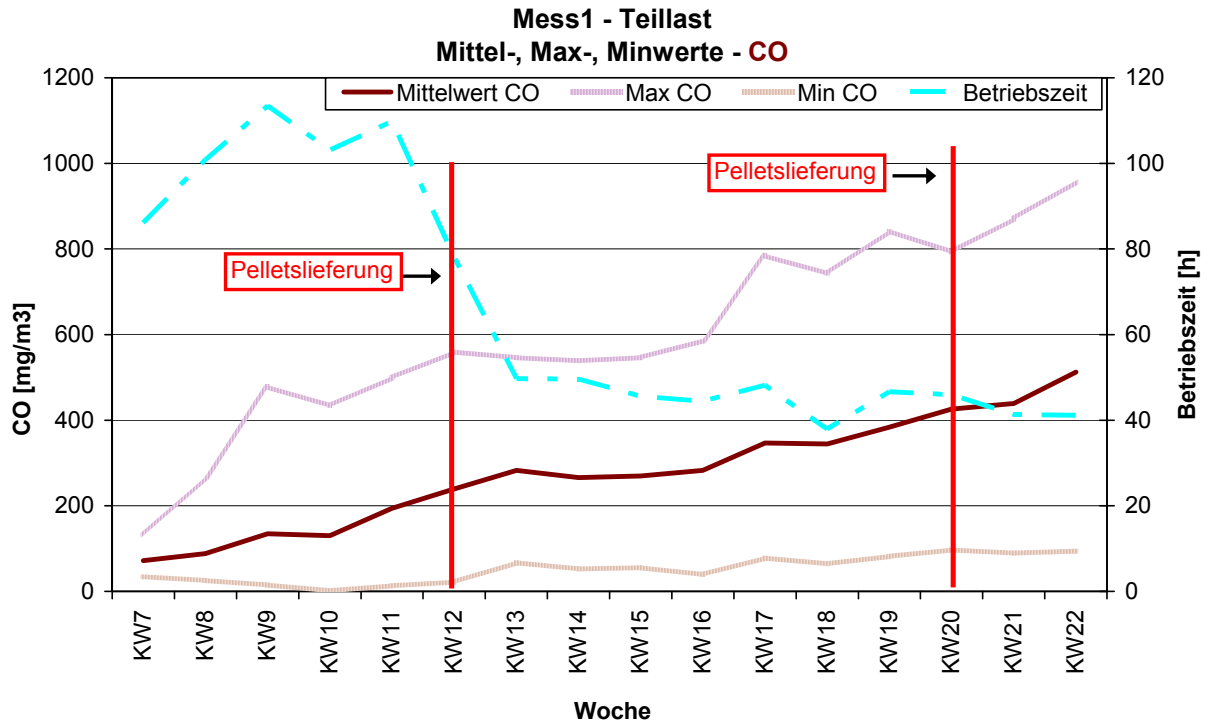


Bild 6-6 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Pelletkessel für CO und HC - Messbox1

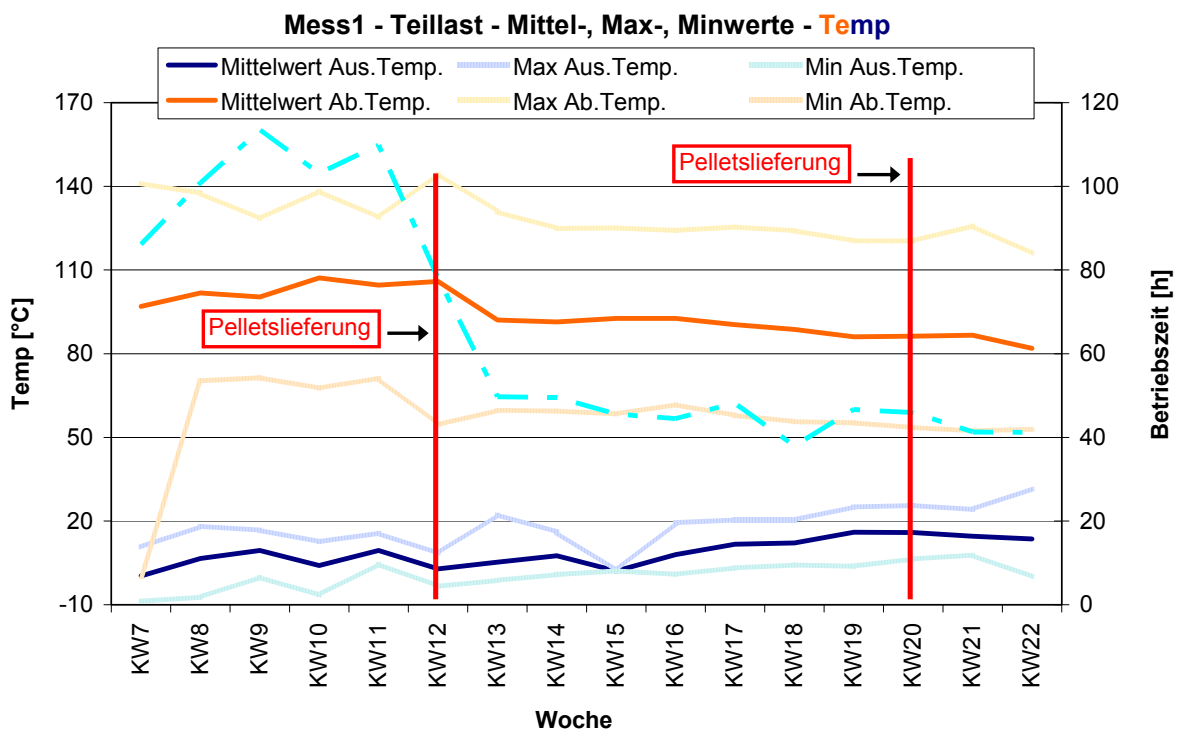
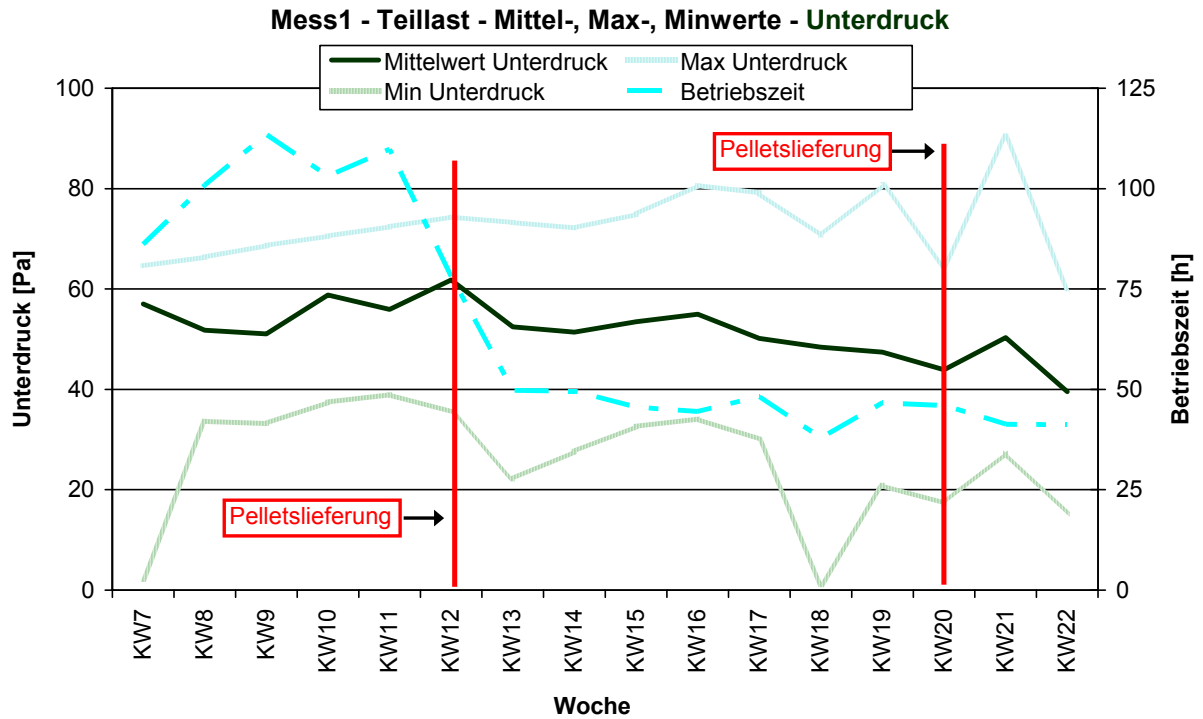


Bild 6-7 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Pelletkessel für Schornsteinzug (Unterdruck) und Temperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) - Messbox1

Die mittlere O_2 -Konzentration bei Teillast war während der ganzen Messperiode nahezu konstant und unabhängig von den wöchentlichen Betriebszeiten. Bei den CO- und HC-Emissionen ergab sich allerdings eine deutlich Abhängigkeit von der Betriebszeit. Mit abnehmendem Anteil des wöchentlichen Teillastbetriebs nehmen die CO- und HC-Konzentrationen zu. Die mittleren NO_x -Konzentrationen für die einzelnen Betriebswochen sind etwas von der Dauer der Betriebszeiten bei Teillast abhängig. Der größte Zusammenhang zeigt sich allerdings zur jeweiligen Pelletqualität. Nach der ersten Pelletlieferung in der KW 12 nimmt die NO_x -Konzentration im Abgas deutlich zu, nach der zweiten Pelletlieferung in der KW 20 nimmt die mittlere NO_x -Konzentration im Abgas wieder ab. Der geregelte Schornsteinzug ist, deutlicher als beim Volllastbetrieb, von der Kessellast abhängig. Mit abnehmendem Anteil des Teillastbetriebs nimmt auch der mittlere Schornsteinzug merklich ab. Die Abgastemperatur nimmt ebenfalls mit der Betriebszeit bei Teillast ab.

In **Tabelle 6.6** sind für den Pelletkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Gluterhalt aufgeführt. Bei relativ konstanten mittleren O_2 -Konzentrationen während der Messperiode nehmen bei diesem Betriebszustand die mittleren CO-Konzentrationen bei abnehmender Betriebszeit deutlich zu.

Tabelle 6.7 enthält für den Pelletkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand An- und Abschalten. Bei relativ konstanten mittleren O_2 -Konzentrationen während der Messperiode nehmen die mittleren CO-Konzentrationen bei abnehmender Betriebszeit deutlich zu.

Tabelle 6.6 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand Gluterhalt beim Pelletkessel - Mess1

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	17,8	17,8	17,9	17,8	18,0	18,0	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,2	18,1	18,3
Max O2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
Min O2	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	108	128	184	202	288	358	332	321	349	373	481	534	676	782	655	725	
Max CO	315	331	422	553	713	714	745	790	805	833	954	1.151	1.330	1.413	1.619	1.499	
Min CO	59	41	22	16	48	11	77	34	42	37	29	12	23	42	31	79	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	12	14	20	22	32	40	37	36	39	41	53	59	75	87	73	81	
Max HC	35	37	47	61	79	79	83	88	89	93	106	128	148	157	180	167	
Min HC	7	5	2	2	5	1	9	4	5	4	3	1	3	5	3	9	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	17	16	15	15	13	14	14	14	14	14	12	12	9	7	6	3	
Max NOx	30	42	29	27	28	34	37	42	39	51	37	194	116	30	27	21	
Min NOx	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	53,5	48,0	47,8	53,4	51,6	58,1	52,1	50,7	52,7	53,6	49,2	47,7	48,7	44,9	49,1	39,3	
Max Unterdruck	61,2	57,0	62,6	66,2	68,3	70,3	71,6	73,7	73,8	76,2	72,3	70,4	79,7	59,7	92,0	61,5	
Min Unterdruck	45,0	37,8	35,4	38,1	37,3	38,5	22,6	29,9	32,6	10,0	26,6	10,3	21,2	15,2	22,6	11,8	
Ausstemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	-1,6	5,7	8,1	3,5	8,3	2,0	6,0	7,7	2,1	8,2	12,1	12,4	15,9	15,7	15,2	11,4	
Max Aus.Temp.	-0,2	16,9	16,4	10,1	15,3	8,4	23,1	16,1	2,1	19,4	20,4	18,7	25,1	26,1	24,1	30,4	
Min Aus.Temp.	-3,7	-3,1	0,3	-5,6	5,1	-3,4	-1,2	1,5	2,1	0,5	3,2	4,2	3,8	5,1	0,0	0,0	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	84	84	82	86	86	85	80	78	79	79	75	74	73	72	72	63	
Max Ab.Temp.	93	99	104	101	100	135	105	107	107	102	101	98	96	95	99	92	
Min Ab.Temp.	69	33	64	64	65	50	55	51	56	53	54	48	50	49	35	45	
Betriebszeit																	
Zeit in min	494	1.056	1.253	1.341	1.302	1.288	1.979	1.962	1.757	1.727	1.932	1.646	1.893	1.896	2.001	3.388	
Zeit in h	8,2	17,6	20,9	22,4	21,7	21,5	33,0	32,7	29,3	28,8	32,2	27,4	31,6	31,6	33,4	56,5	

Tabelle 6.7 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand An- und Abschalten beim Pelletkessel - Mess1

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	19,7	19,6	19,7	19,7	19,6	19,7	19,6	19,7	19,6	19,7	19,7	19,6	19,5	19,6	19,6	19,4	19,4
Max O2	20,4	20,2	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,2	20,1	20,2	20,1	20,0	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8
Min O2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	120	150	207	206	300	267	321	255	283	255	253	238	198	163	224	166	
Max CO	252	329	520	559	713	858	747	794	824	917	915	1.040	992	1.080	1.211	1.000	
Min CO	43	43	23	11	29	15	19	13	7	11	12	5	13	14	10	9	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	13	17	23	23	33	30	36	28	31	28	28	26	22	18	25	18	
Max HC	28	37	58	62	79	95	83	88	92	102	102	116	110	120	135	111	
Min HC	5	5	3	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	
Max NOx	22	5	5	5	5	5	6	5	7	7	4	188	2	2	23	1	
Min NOx	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	49,7	44,8	43,3	46,9	46,2	50,3	45,8	41,0	44,6	44,5	38,9	37,2	35,4	30,1	40,0	28,0	
Max Unterdruck	56,1	53,9	55,1	59,0	63,8	67,8	69,9	61,2	71,5	69,5	64,1	62,0	71,8	55,0	68,3	47,0	
Min Unterdruck	44,6	33,7	30,4	37,8	34,1	27,1	22,7	24,7	32,2	22,5	26,0	1,1	16,8	14,7	3,9	7,9	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	-1,5	5,7	7,9	4,9	8,4	1,6	6,0	7,6	2,1	6,4	10,9	11,9	15,4	16,1	12,9	13,0	
Max Aus.Temp.	-0,2	10,6	11,6	9,9	12,5	8,2	23,1	16,3	2,1	19,4	20,4	20,4	25,1	26,1	24,1	30,4	
Min Aus.Temp.	-3,0	-2,6	0,3	0,2	5,1	-3,4	-1,2	0,0	2,1	0,0	3,2	4,5	3,8	5,1	0,0	0,0	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	78	78	75	77	76	71	67	64	66	64	61	60	57	55	57	53	
Max Ab.Temp.	85	85	86	89	89	114	85	83	85	84	82	80	78	78	80	73	
Min Ab.Temp.	69	68	64	64	64	50	55	51	56	52	54	48	47	46	33	42	
Betriebszeit																	
Zeit in min	152	229	603	466	587	1.547	2.170	2.916	2.138	2.457	3.340	3.727	4.574	4.658	4.498	3.820	
Zeit in h	2,5	3,8	10,1	7,8	9,8	25,8	36,2	48,6	35,6	41,0	55,7	62,1	76,2	77,6	75,0	63,7	

6.2 Gewerbliche Holzfeuerung - Messbox2

Mit Messbox2 wurden an der gewerblichen Holzfeuerung für insgesamt 117 Tage Messungen durchgeführt. Wie bei Messbox1 sind auch hier die selben Probleme mit der Stromversorgung aufgetreten, die in der KW 8 behoben wurden.

Aufgrund des weiteren Weges zum Anlagenstandort wurden weniger Kontrollen der Messeinrichtung und Datensicherungen vorgenommen. In der KW 9 erfolgte ein Softwareupdate, durch den eine zuverlässige automatische Datenübertragung erreicht werden sollte. Dies gelang leider nicht zufriedenstellend. Trotz guten Netzempfangs wurden Messdaten nur sporadisch per Email übertragen. Die Messbox2 wies in KW 12 eine Störung unbekannter Ursache auf, hierbei wurden weder die Daten des Schornsteinzugs noch des CO+HC-Sensors aufgezeichnet. In der KW 19 und KW 20 war die Anlage außer Betrieb, es wurden Wartungsarbeiten (teilweiser Austausch des Feuerraumes im Unterschubbereich) durchgeführt. Ab der KW 22 wurde die Anlage witterungsbedingt außer Betrieb genommen.

Im Heizraum wurde die Raumtemperatur nur sporadisch erfasst, hier wurde für die Abgasverlustberechnung eine Temperatur von 20 °C angesetzt. Für die Berechnung der HC-Konzentrationen aus den CO-Äquivalenten wurde bei der gewerblichen Holzfeuerung angenommen, dass 10 % des Summensignals auf HC entfallen. Bei dieser Feuerung traten beim O₂ und CO+HC-Sensor regelmäßig, allerdings ohne erkennbares Verteilungsmuster, negative Messwerte auf. Diese wurden für die Auswertung ausgefiltert.

Bei der gewerblichen Holzfeuerung wurden die Betriebszustände An- und Abschaltvorgänge, Gluthalbetrieb sowie Teil- und Volllastbetrieb unterschieden. In **Tabelle 6.8** sind die O₂-Sortiergrenzen für die jeweiligen Betriebszustände aufgeführt.

Tabelle 6.8 O₂-Sortiergrenzen für die bei der gewerblichen Holzfeuerung betrachteten Betriebszustände – Messbox2

Betriebszustände gew. Holzfeuerung Messbox2	O ₂ – Sortiergrenzen in Vol%
An- und Abschaltvorgänge	> = 19
Gluthalbetrieb	> = 18 < 19
Teillastbetrieb	> 15 < 18
Volllastbetrieb	< = 15

In **Bild 6-8** wird das Betriebsverhalten der gewerblichen Holzfeuerung beispielhaft anhand von jeweils 2 Betriebstagen bei höherem (mittlere Außentemperatur ~ 3 °C) und mittlerem Wärmebedarf (mittlere Außentemperatur ~ 6 °C) gezeigt. In der KW 7 war die Messwerterfassung nur während der täglich Arbeitszeit (für ca. 12 h) am Stromnetz. Der Heizkessel ist ständig in Betrieb und wechselt permanent zwischen Last- und Gluthalbetrieb. Die CO+HC-Emissionen (dargestellt als CO-Äquivalente) liegen im mittleren Bereich. Bei geringerem Wärmebedarf geht der Heizkessel immer wieder für kurze Zeiten in Gluthalbetrieb, wobei CO+HC-Konzentrationsspitzen auftreten.

Für die Messwochen KW 6 bis KW 22 sind in **Tabelle 6.9** die Mittelwerte für den Betriebszustand Volllast aufgeführt, **Tabelle 6.10** enthält die mittleren auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste (angesetzter Wassergehalt für eine Mischung aus naturbelassenem Holz und Holzwerkstoffresten: 12,0 Massen-%):

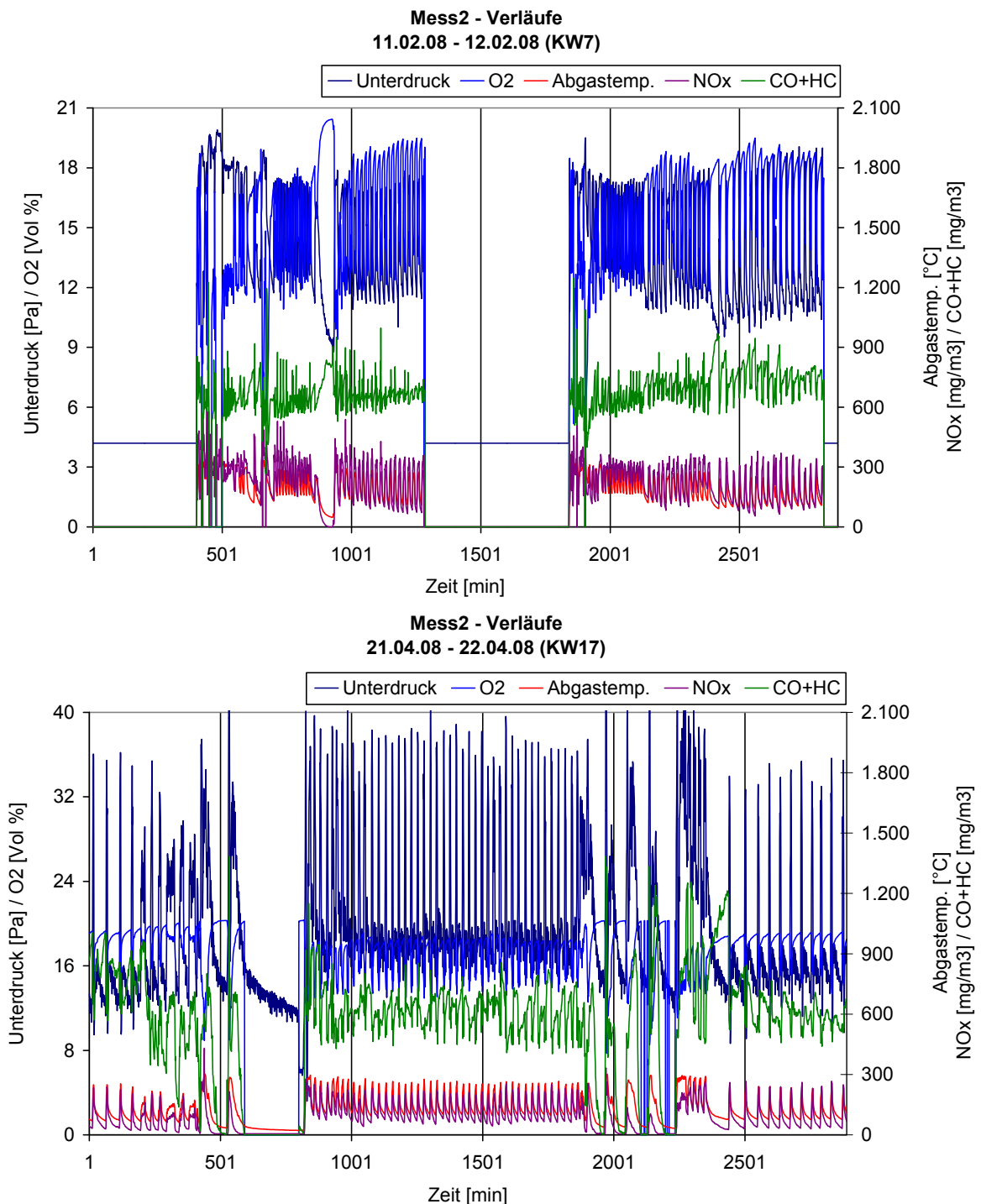


Bild 6-8 Betriebsverhalten der gewerblichen Holzfeuerung an jeweils 2 Tagen bei höherer (KW7) und geringerer (KW17) Wärmeleistung – Messbox2

Tabelle 6.9 Mittelwerte der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Volllast bei der gewerblichen Holzfeuerung – Mess2

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	12,3	12,9	13,4	13,5	12,9	13,5	12,6	13,0	13,2	13,5	13,7	13,6	14,0			13,8	
Max O2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0			15,0	
Min O2	6,3	3,2	4,2	5,6	2,9	4,3	3,5	4,9	5,4	5,3	5,4	7,4	9,8			10,7	
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	686	580	547	593	579	591	687	604	550	558	497	530	612			462	
Max CO	1.246	1.270	926	1.056	1.530	1.154	1.623	1.614	1.492	1.540	1.370	1.260	1.200			801	
Min CO	320	23	32	340	161	264	210	37	289	111	220	303	315			245	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	76	64	61	66	64	66	76	67	61	62	55	59	68			51	
Max HC	138	141	103	117	170	128	180	179	166	171	152	140	133			89	
Min HC	36	3	4	38	18	29	23	4	32	12	24	34	35			27	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	346	323	297	267	234	275	215	251	235	211	212	195	207			243	
Max NOx	598	584	593	567	600	583	534	587	464	570	574	521	381			462	
Min NOx	187	112	46	75	27	83	24	28	64	49	37	24	105			109	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	13,9	19,1	22,8	26,6	27,3	32,5	35,7	36,6	39,1	36,2	32,4	31,6	34,3			35,5	
Max Unterdruck	15,6	21,9	26,1	30,3	34,6	38,8	43,1	47,3	51,5	55,8	54,1	51,7	46,1			53,7	
Min Unterdruck	6,7	11,0	4,1	14,2	12,0	16,6	15,0	14,5	12,1	4,3	14,3	3,2	3,1			2,7	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	4,4	0,9	3,8	5,2	3,1	4,5	2,8	3,4	5,3	4,7	3,5	6,7	8,6			13,8	
Max Aus.Temp.	15,6	9,4	15,9	10,2	10,1	8,3	7,9	19,1	12,7	15,5	13,7	12,7	20,0			17,2	
Min Aus.Temp.	0,3	-3,7	-1,9	-2,4	-1,1	1,0	-0,4	-0,8	1,7	-1,2	-1,4	2,5	5,8			11,9	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	260	273	258	252	241	248	252	250	249	255	251	250	257			243	
Max Ab.Temp.	351	346	349	331	343	339	328	346	335	345	335	325	291			280	
Min Ab.Temp.	0	119	122	143	111	116	143	133	90	135	146	154	166			159	
Betriebszeit																	
Zeit in min	796	2.690	1.645	2.317	2.555	1.024	1.792	1.725	634	1.856	1.390	716	204			109	
Zeit in h	13,3	44,8	27,4	38,6	42,6	17,1	29,9	28,8	10,6	30,9	23,2	11,9	3,4			1,8	

* KW 19, KW 20 und KW 22 war Anlage nicht in Betrieb

Tabelle 6.10 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen (für feuchtes Abgas) und der Abgasverluste der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Vollast bei der gewerblichen Holzfeuerung – Mess2

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO	628	572	575	635	569	627	652	601	564	597	547	576	700			513	
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC	70	64	64	71	63	70	72	67	63	66	61	64	78			57	
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x	317	319	312	286	230	291	204	250	241	226	233	212	237			270	
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A	20,9	23,6	23,4	23,2	20,5	22,7	20,8	21,5	22,1	23,5	23,7	23,3	25,2			23,1	

* Abgasverluste sind etwas zu hoch, da mit O₂ bezogen auf feuchtes Abgas berechnet

In **Bild 6-9** bis **Bild 6-12** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen bei Volllast dargestellt.

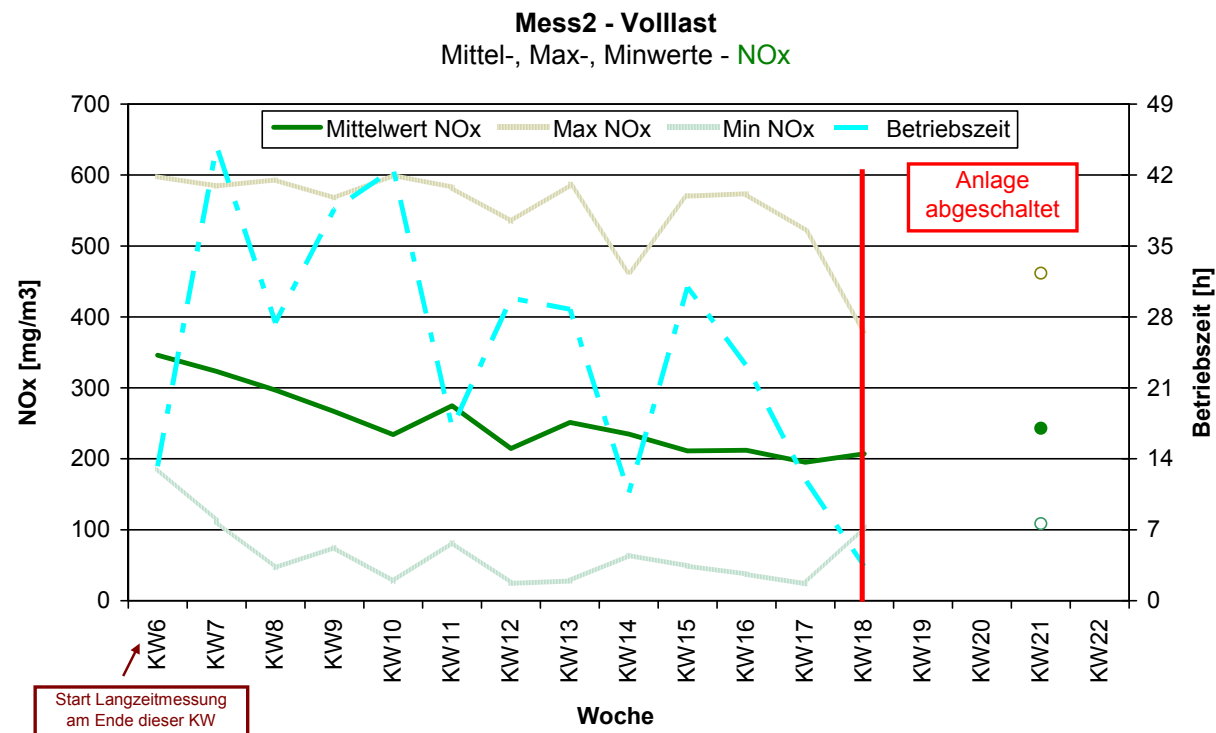
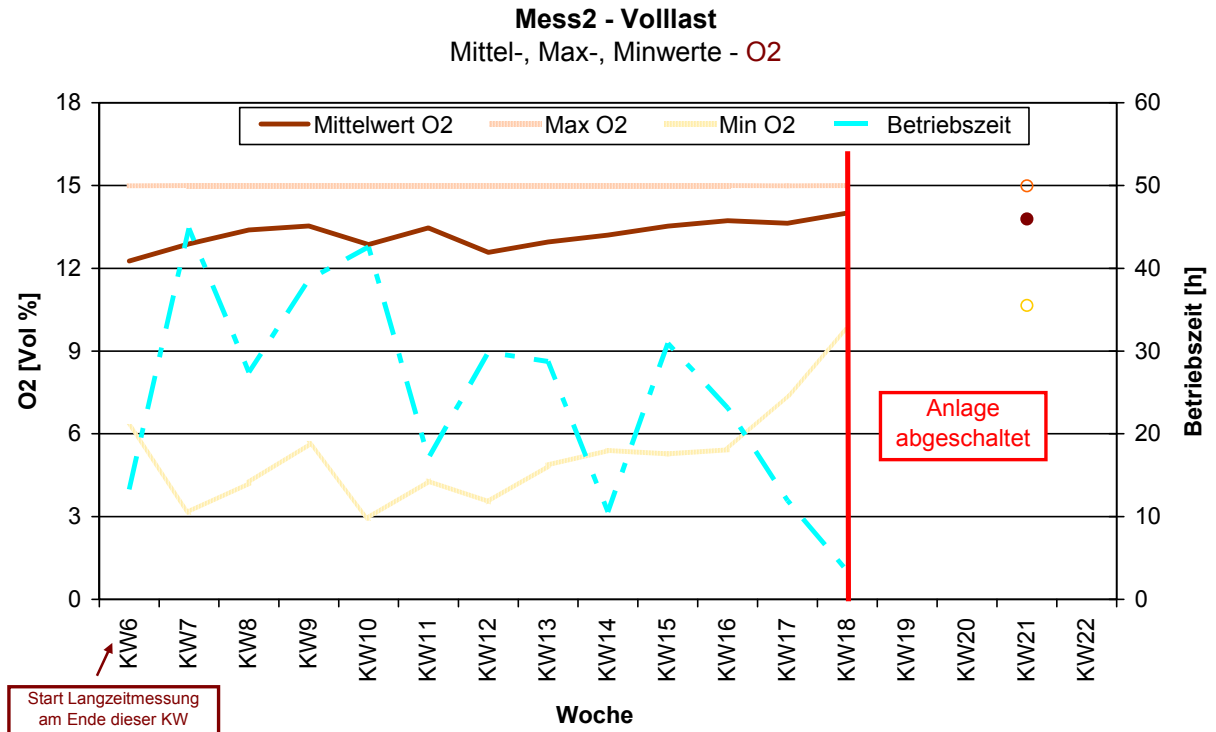


Bild 6-9 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für O₂ und NO_x – Messbox2

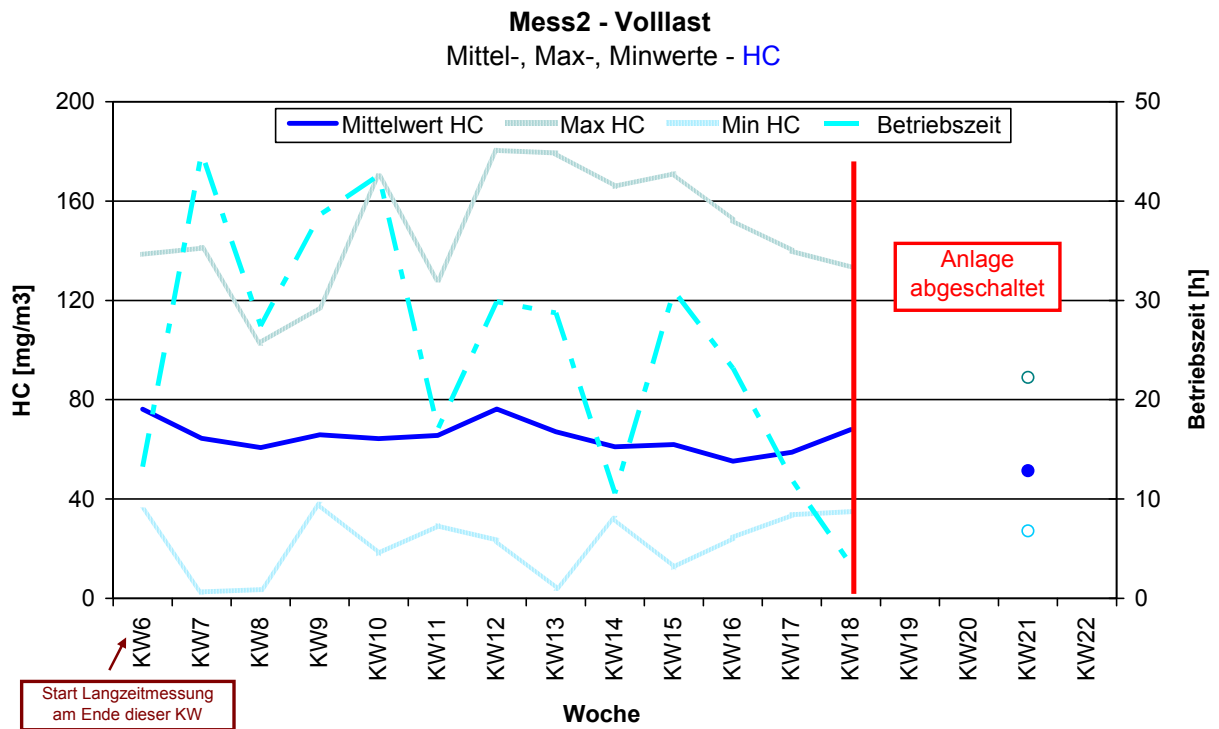
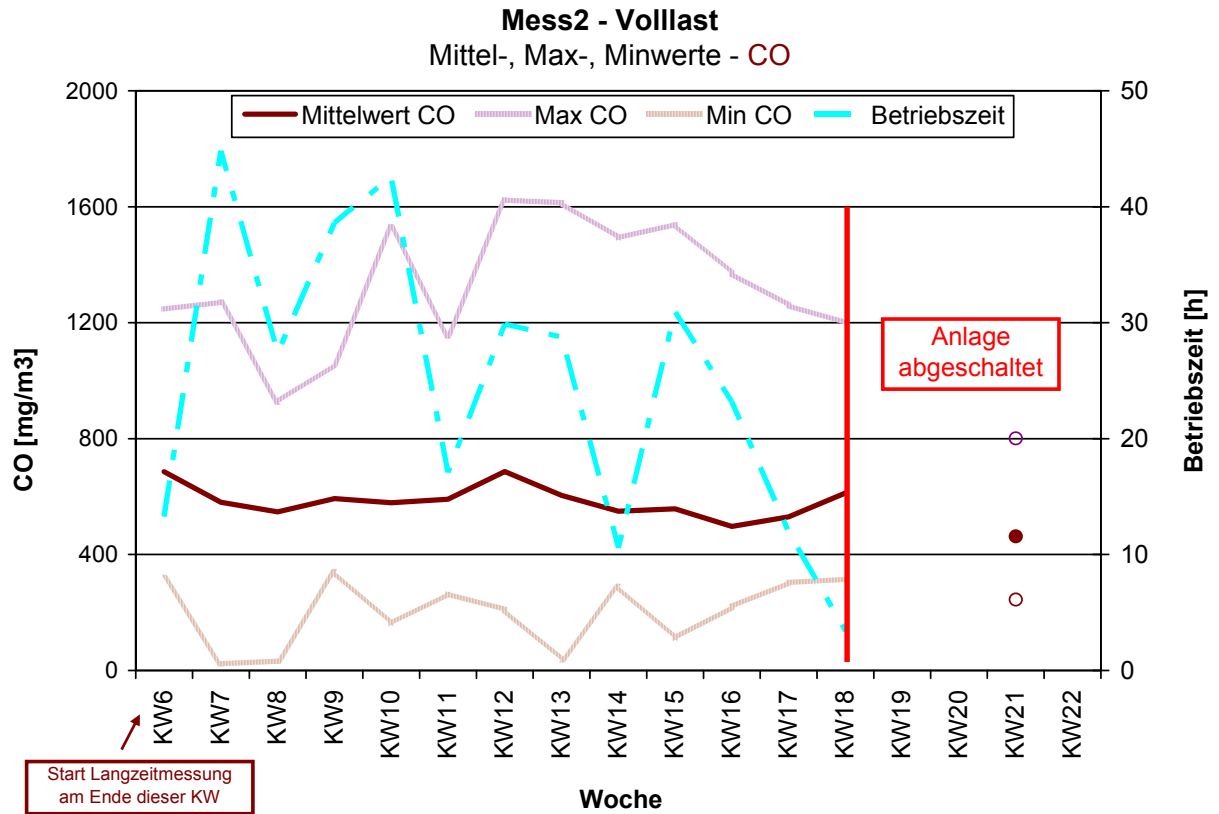


Bild 6-10 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für CO und HC – Messbox2

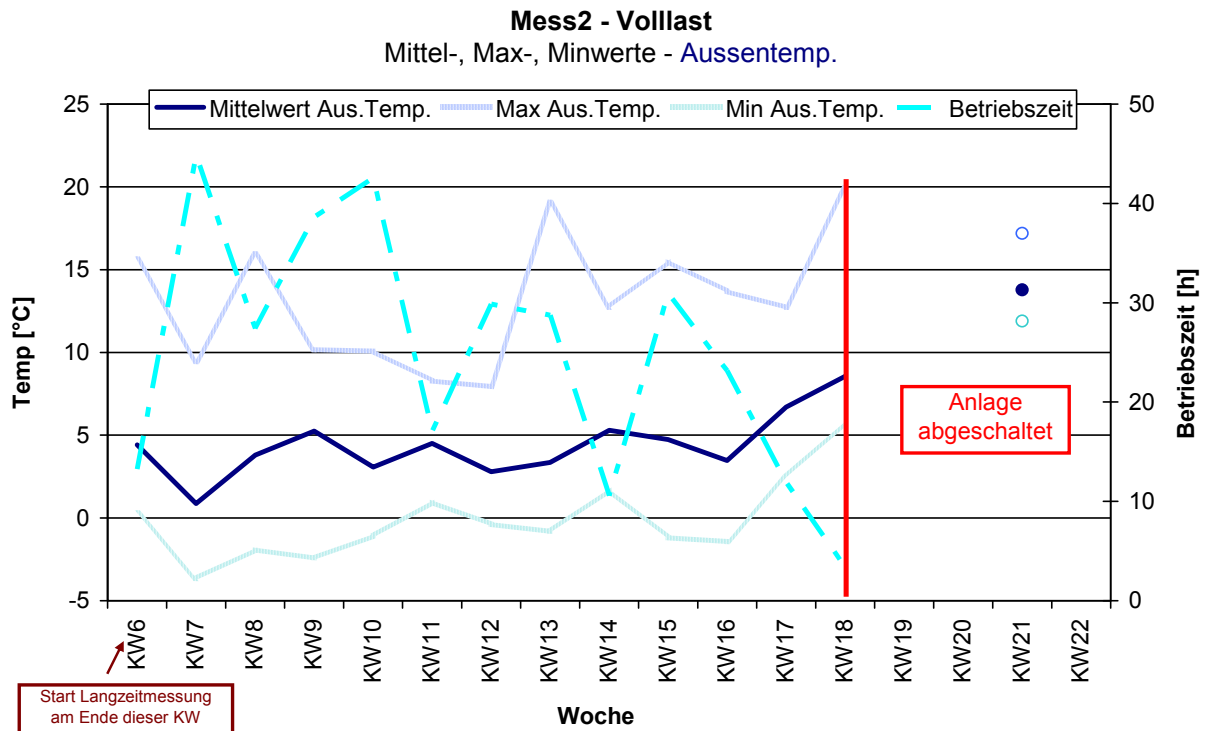
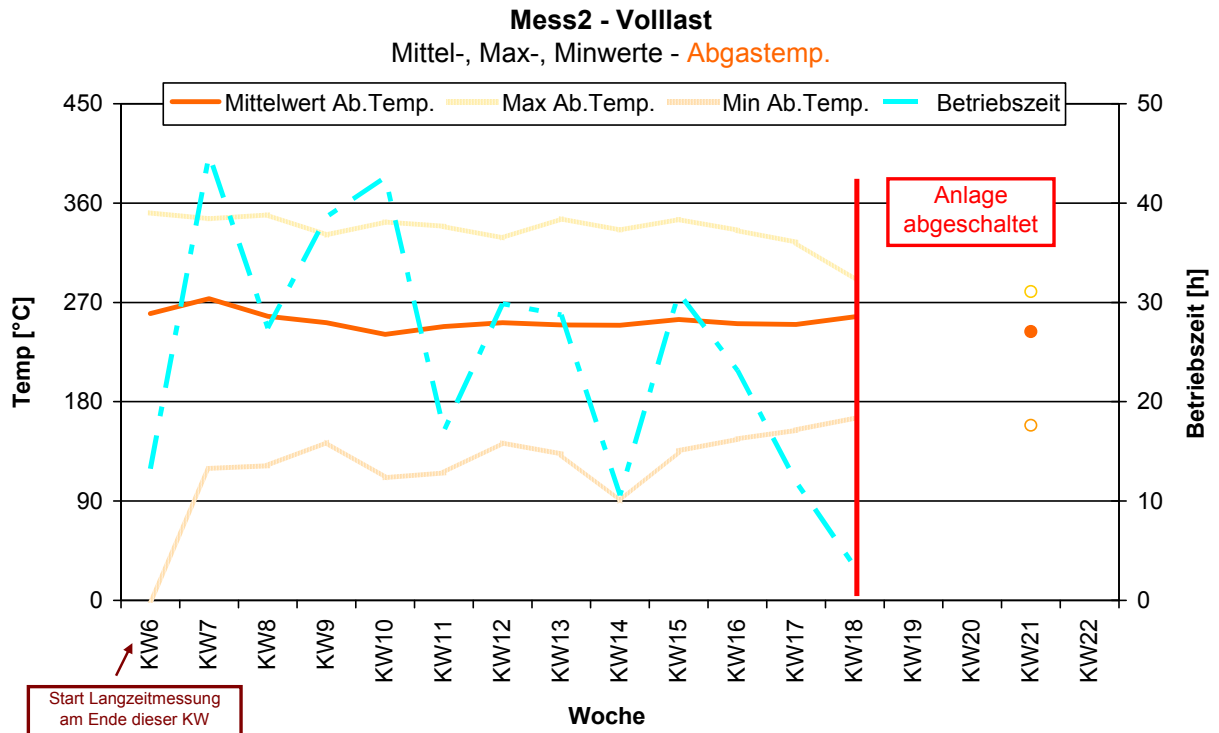


Bild 6-11 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für Abgas- und Außentemperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) – Messbox2

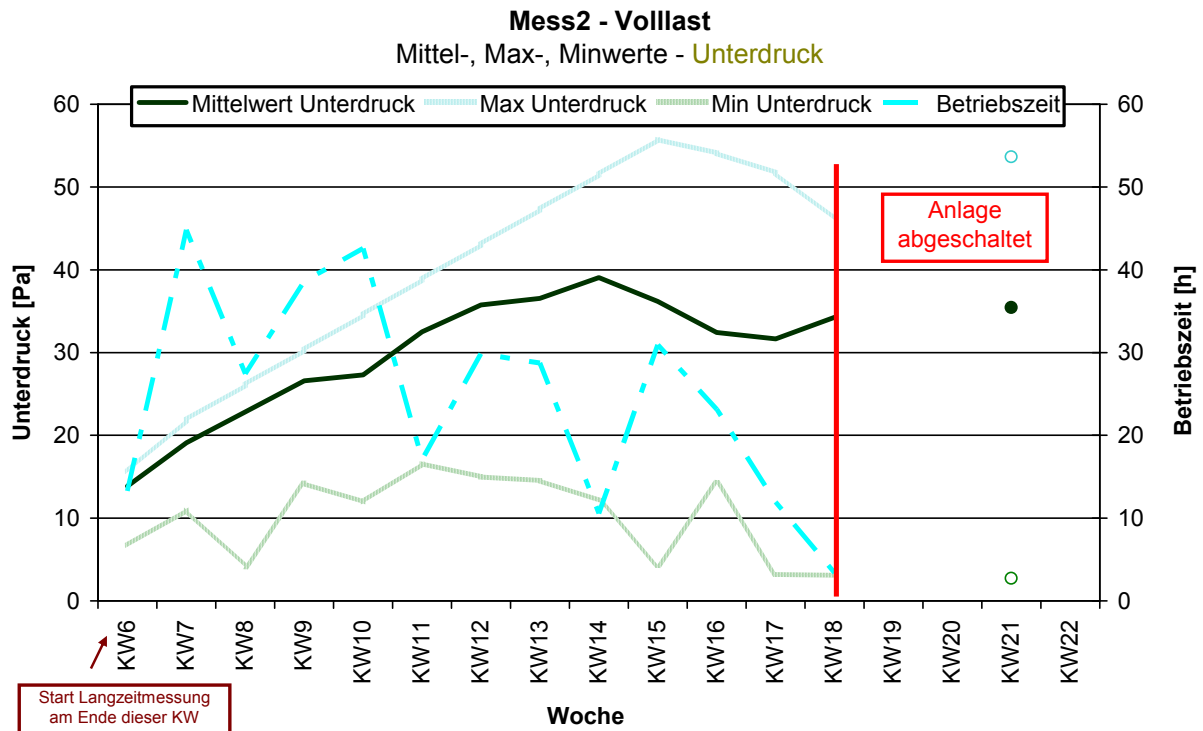


Bild 6-12 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für den Schornsteinzug (Unterdruck) – Messbox2

Die mittlere O_2 -Konzentration bei Volllast nahm während der Messperiode in Abhängigkeit der Außentemperatur bzw. der Betriebszeiten bei Volllast leicht zu. Die CO - und HC -Konzentrationen waren hingegen nicht von der Betriebszeit abhängig und lagen durchweg auf mittleren Niveau. Die mittleren NO_x -Konzentrationen für die einzelnen Betriebswochen sind von der Dauer der Betriebszeiten bei Volllast abhängig. Mit abnehmender wöchentlicher Betriebszeit gingen auch die NO_x -Konzentration zurück. Insgesamt lagen diese, aufgrund des Einsatzes von Holzwerkstoffresten, deutlich höher als bei ausschließlicher Verbrennung von naturbelassenem Holz.

Der Schornsteinzug nimmt von Beginn der Messungen bis zur KW 14 wöchentlich und deutlich zu und bleibt dann in etwa auf gleichem Niveau. Die Abgastemperatur bei Volllast ist weitgehend unabhängig von der wöchentlichen Betriebszeit und liegt durchweg für Heizkessel relativ hoch, wodurch sich auch der, gegenüber dem Pellekessel, deutlich höhere Abgasverlust ergibt.

In **Tabelle 6.11** sind für die gewerbliche Holzfeuerung die Mittelwerte der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Teillast aufgeführt. **Tabelle 6.12** enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O_2 bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste.

Tabelle 6.11 Mittelwerte der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Teillast bei der gewerblichen Holzfeuerung – Mess2

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	16,7	16,6	16,4	17,0	16,7	17,0	17,1	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,5				16,7
Max O2	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0				18,0
Min O2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0				15,0
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	847	611	575	634	634	679	673	599	520	560	548	551	522				549
Max CO	1.337	839	716	852	1.124	1.104	1.068	1.140	962	1.028	932	1.130	934				714
Min CO	583	456	453	437	403	440	393	237	395	286	290	313	271				332
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	94	68	64	70	70	75	75	67	58	62	61	61	58				61
Max HC	149	93	80	95	125	123	119	127	107	114	104	126	104				79
Min HC	65	51	50	49	45	49	44	26	44	32	32	35	30				37
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	197	236	232	172	170	175	149	181	162	143	152	139	145				129
Max NOx	384	435	575	345	334	322	309	423	308	276	292	263	241				331
Min NOx	107	105	38	64	10	64	10	10	30	18	22	13	44				48
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	10,4	15,0	19,5	18,3	20,2	19,9	19,9	23,1	28,7	21,9	24,2	24,0	29,2				24,5
Max Unterdruck	14,0	21,1	25,7	29,8	32,4	38,5	43,0	45,4	47,9	53,9	40,3	42,8	44,1				45,5
Min Unterdruck	8,6	10,2	6,0	11,3	10,6	10,5	8,9	4,7	4,8	6,3	7,7	8,3	5,7				2,8
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	4,0	0,8	5,3	5,5	3,1	4,7	2,7	4,1	5,7	4,8	3,8	6,9	9,1				13,7
Max Aus.Temp.	15,9	9,4	16,1	10,3	10,3	8,3	8,0	19,1	13,6	15,5	13,9	18,3	20,6				18,0
Min Aus.Temp.	-0,1	-4,1	-1,7	-2,3	-1,3	0,9	-0,9	-0,8	1,6	-1,4	-1,5	2,3	4,8				11,6
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	148	191	199	172	176	163	169	175	190	181	183	179	203				173
Max Ab.Temp.	232	269	274	264	275	257	258	281	262	273	281	275	273				245
Min Ab.Temp.	95	108	97	90	93	103	103	91	100	103	102	97	120				105
Betriebszeit																	
Zeit in min	1.142	2.267	3.394	3.224	2.890	1.575	2.129	2.678	2.511	2.039	2.831	1.831	445				159
Zeit in h	19,0	37,8	56,6	53,7	48,2	26,3	35,5	44,6	41,9	34,0	47,2	30,5	7,4				2,7

Tabelle 6.12 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen und der Abgasverluste der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Teillast bei der gewerblichen Holzfeuerung – Mess2

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO		1.123	1.006	1.255	1.184	1.363	1.392	1.175	1.008	1.087	1.034	1.058	933				1.024
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC		125	112	139	132	151	155	131	112	121	115	118	104				114
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x		434	407	342	318	352	307	355	314	277	287	267	258				241
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A		28,1	28,1	26,7	26,0	25,5	27,3	27,0	29,4	27,8	27,4	27,1	29,3				25,5

* Abgasverluste sind etwas zu hoch, da mit O₂ bezogen auf feuchtes Abgas berechnet

In **Bild 6-13** bis **Bild 6-16** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen bei Teillast dargestellt.

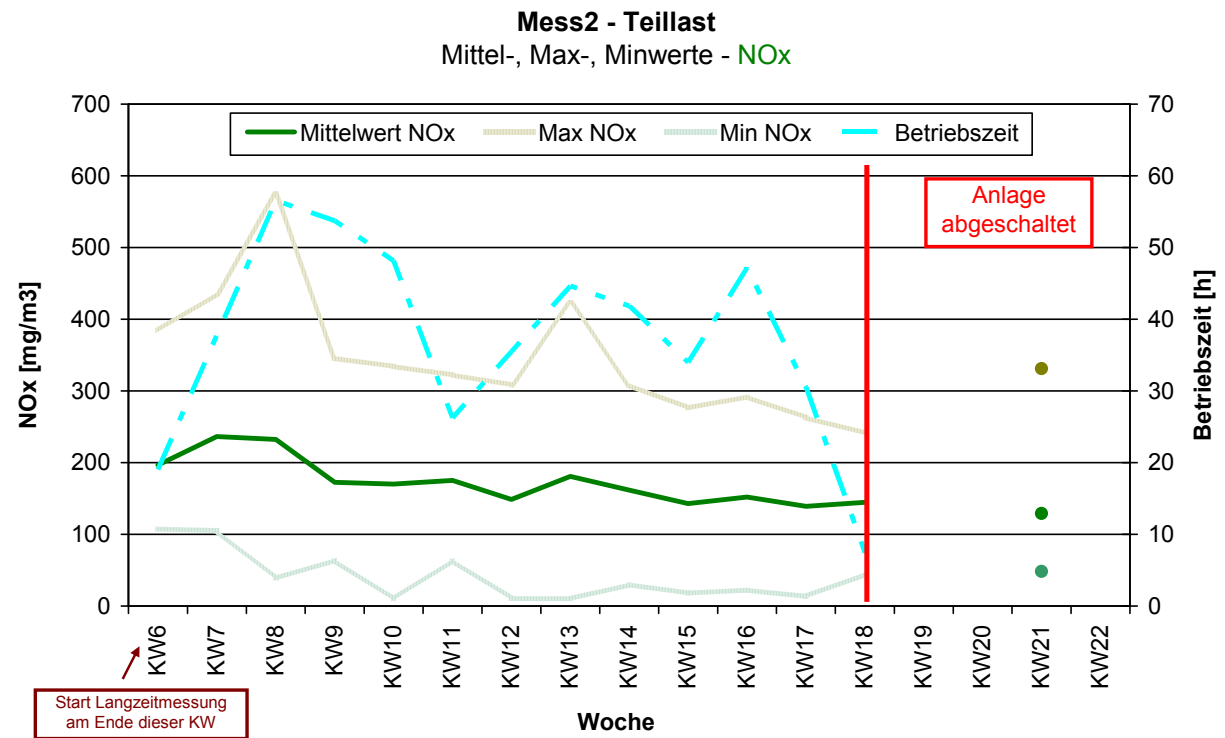
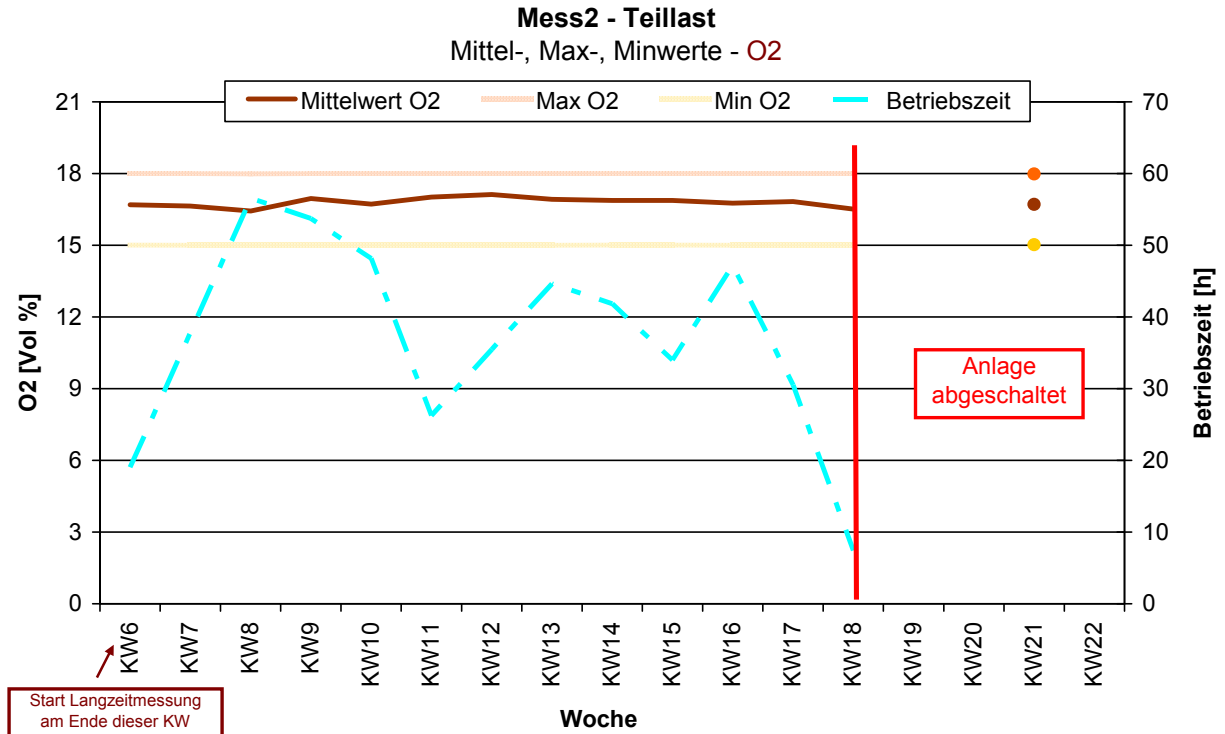


Bild 6-13 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für O₂ und NO_x – Messbox2

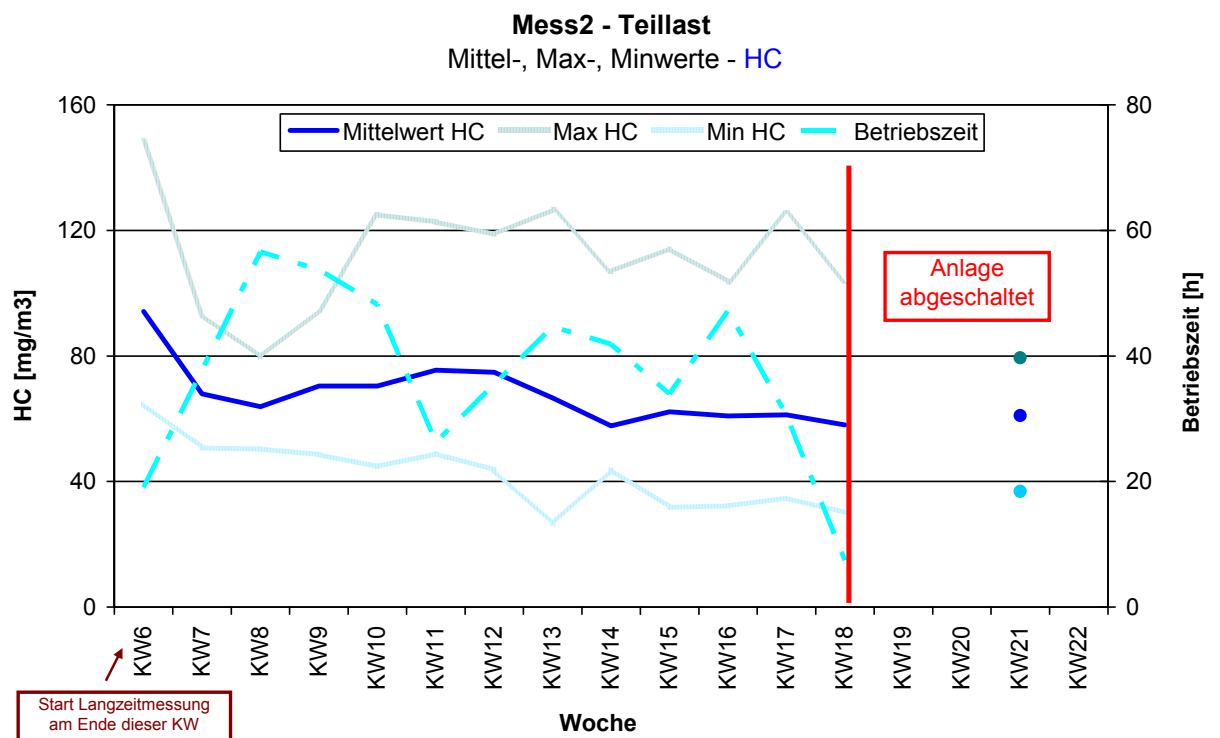
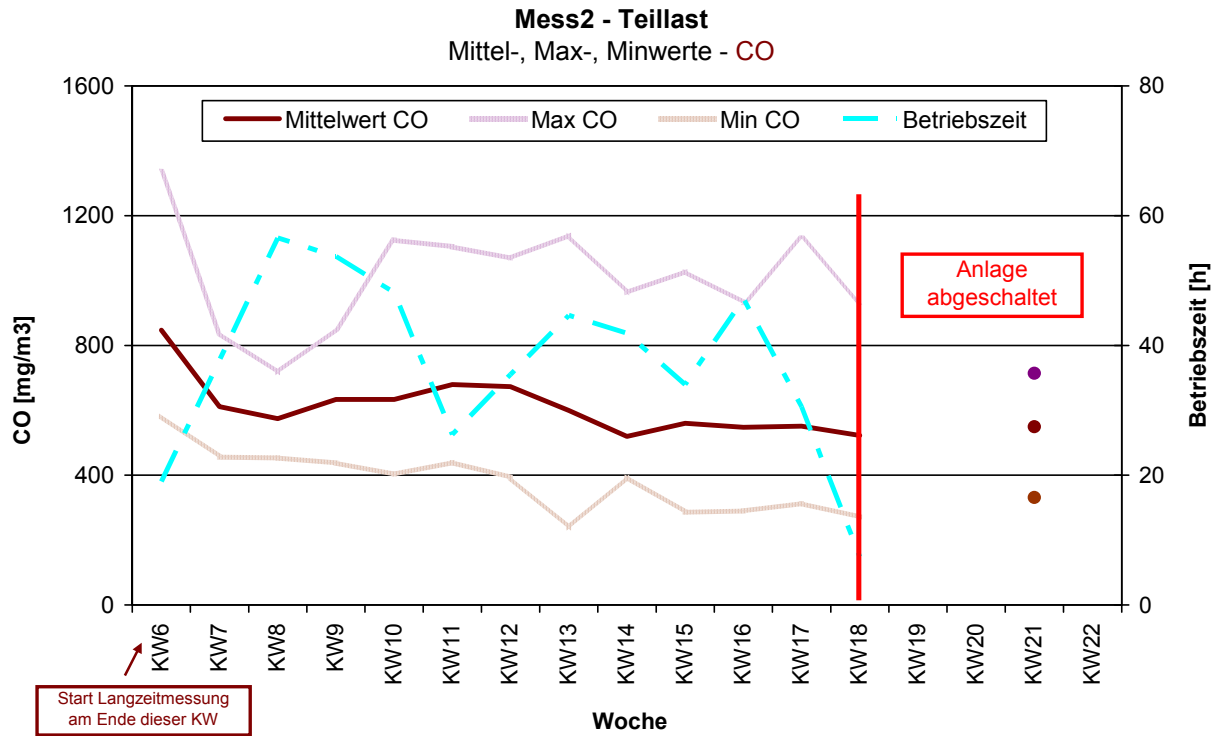


Bild 6-14 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für CO und HC – Messbox2

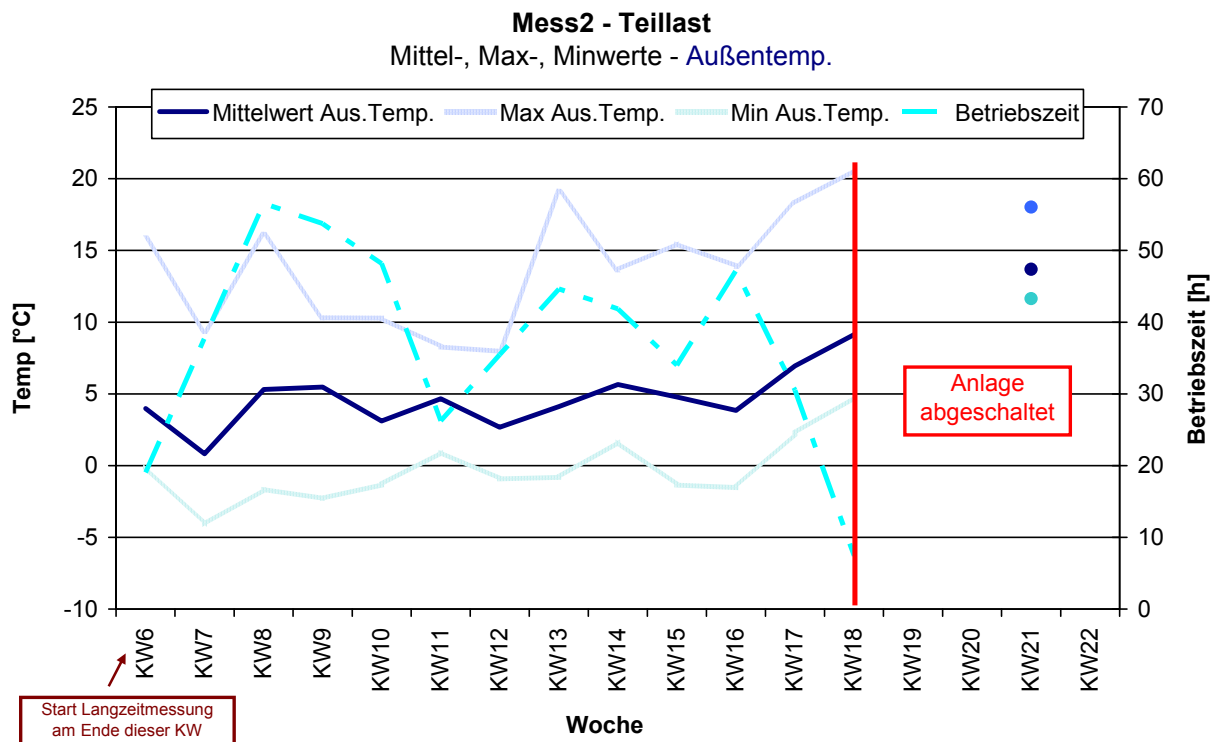
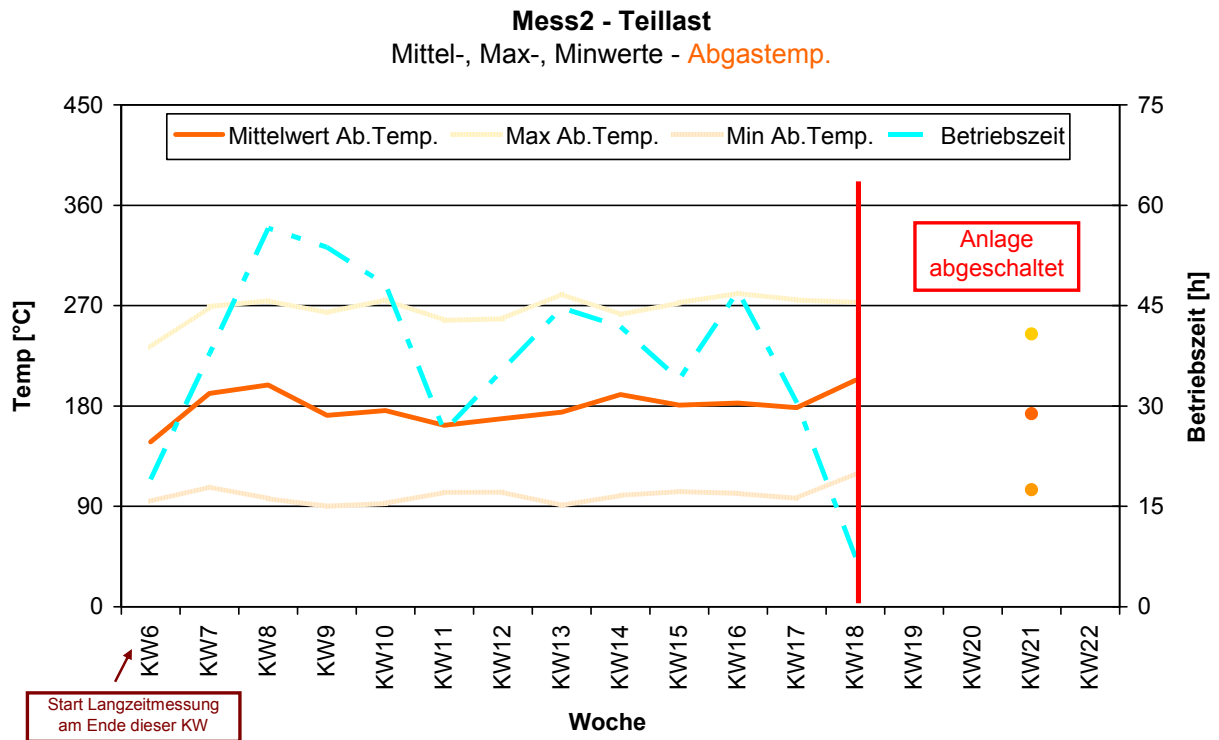


Bild 6-15 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für Abgas- und Außentemperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) – Messbox2

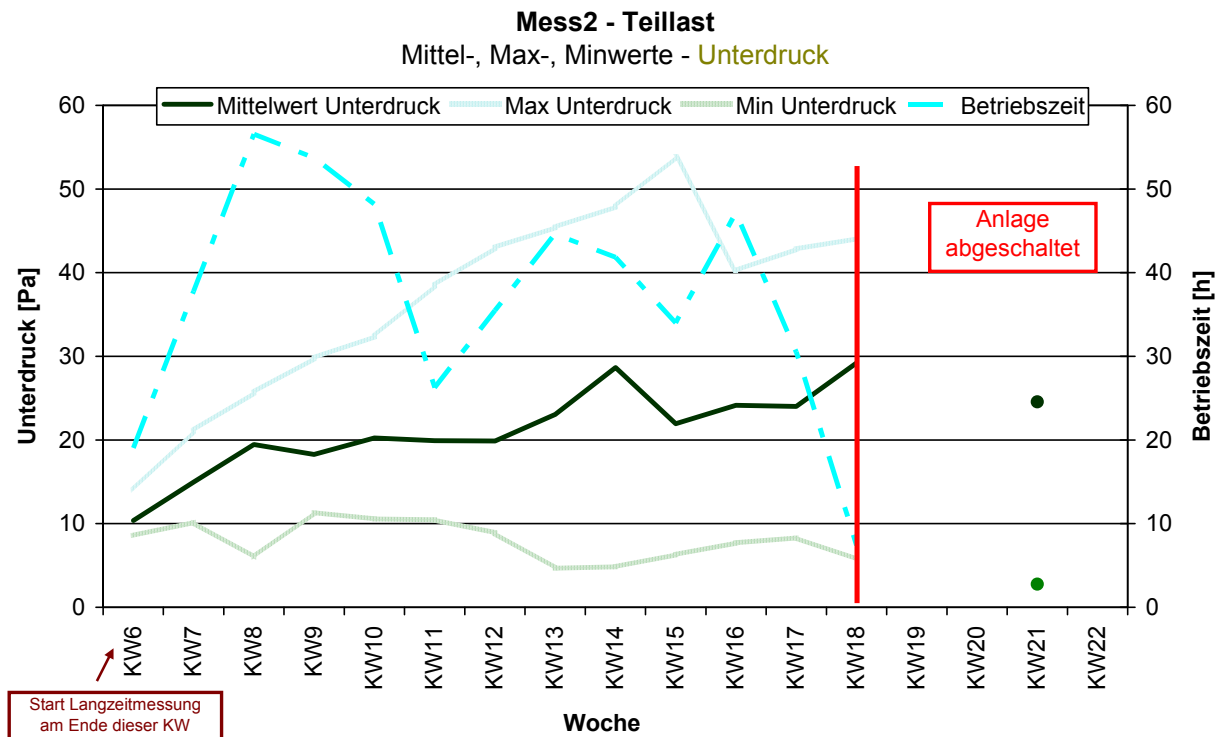


Bild 6-16 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte für die gewerbliche Holzfeuerung für den Schornsteinzug (Unterdruck) – Messbox2

Die mittlere O_2 -Konzentration bei Teillast war während der ganzen Messperiode nahezu konstant und unabhängig von den wöchentlichen Betriebszeiten. Bei den CO - und HC -Emissionen ergab sich allerdings eine deutlich Abhängigkeit von der Betriebszeit. Mit abnehmendem Anteil des wöchentlichen Teillastbetriebs nehmen die CO - und HC -Konzentrationen ebenfalls ab, was auch für die mittleren NO_x -Konzentrationen gilt. Auch bei Teillast nimmt der Schornsteinzug im Verlauf der Langzeitmessung zu. Ab der KW 8 bis zur KW 12 liegt der Schornsteinzug in einem ähnlichen Bereich und steigt ab KW 14 nochmals merklich an. Die Abgastemperatur ist nahezu unabhängig von der Betriebszeit des Heizkessels bei Teillast und liegt im Bereich von 180 °C und damit deutlich niedriger als beim Vollastbetrieb.

In **Tabelle 6.13** sind für die gewerbliche Holzfeuerung die Mittelwerte der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Gluterhalt aufgeführt. Bei relativ konstanten mittleren O_2 -Konzentrationen während der Messperiode liegen auch die mittleren CO -Konzentrationen in einem engeren Bereich und sind weit gehend unabhängig von der Betriebszeit.

Tabelle 6.14 enthält für den Pelletkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Betriebszustand An- und Abschalten. Sowohl die mittleren O_2 -Konzentrationen als auch die mittleren CO -Konzentrationen bleiben während der Messperiode in etwa auf konstantem Niveau und sind weit gehend unabhängig von der Betriebszeit.

Tabelle 6.13 Mittelwerte der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand Gluterhalt bei der gewerblichen Holzfeuerung – Mess2

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	18,2	18,5	18,6	18,5	18,5	18,5	18,9	18,5	18,6	18,5	18,6	18,6	18,5				18,6
Max O2	18,9	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	20,5	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0				19,0
Min O2	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0				18,0
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	968	659	616	663	644	706	657	645	573	616	583	581	506				528
Max CO	1.290	872	733	877	1.011	1.230	1.025	962	1.025	974	915	1.092	718				702
Min CO	637	527	476	430	432	500	6	216	328	312	202	254	264				210
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	108	73	68	74	72	78	73	72	64	68	65	65	56				59
Max HC	143	97	81	97	112	137	114	107	114	108	102	121	80				78
Min HC	71	59	53	48	48	56	1	24	36	35	22	28	29				23
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	103	131	108	91	99	101	113	109	86	83	79	69	75				56
Max NOx	152	272	287	188	213	187	203	263	148	172	187	166	155				152
Min NOx	53	67	40	36	9	49	42	7	19	5	16	9	22				13
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	9,4	12,3	12,9	14,3	14,5	15,2	15,8	16,7	17,5	16,3	17,6	17,6	19,5				19,0
Max Unterdruck	12,3	17,3	20,2	29,0	25,1	27,0	31,2	35,1	33,1	34,5	34,6	30,5	33,2				29,2
Min Unterdruck	8,6	9,5	5,8	10,2	9,7	10,6	8,6	6,9	9,7	10,5	9,4	5,8	3,1				4,8
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	1,7	0,4	5,4	5,4	3,5	5,0	2,5	4,6	5,3	4,8	4,2	6,5	10,6				14,0
Max Aus.Temp.	7,9	8,8	16,1	10,1	10,6	8,5	8,1	19,1	13,8	14,9	14,1	19,9	21,4				18,8
Min Aus.Temp.	0,5	-4,3	-1,9	-2,5	-1,6	1,0	-1,1	-0,8	1,8	-1,3	-1,8	2,3	5,0				11,7
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	107	135	126	120	119	112	108	123	122	118	117	111	126				115
Max Ab.Temp.	149	222	202	193	222	194	184	205	188	214	193	192	212				172
Min Ab.Temp.	88	91	75	83	79	82	32	84	76	79	79	69	77				70
Betriebszeit																	
Zeit in min	89	1.097	2.423	89	3.248	2.017	4.219	2.740	3.167	4.084	3.356	2.418	390				217
Zeit in h	1,5	18,3	40,4	1,5	54,1	33,6	70,3	45,7	52,8	68,1	55,9	40,3	6,5				3,6

Tabelle 6.14 Mittelwerte der Messwochen KW 6 bis KW 21 für den Betriebszustand An- und Abschalten bei der gewerblichen Holzfeuerung – Mess2

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	19,5	19,4	19,3	19,3	19,5	19,4	20,0	19,6	19,5	19,8	19,4	19,8	20,1			20,1	
Max O2	19,7	20,4	20,3	20,3	20,5	20,3	20,5	20,5	20,5	20,5	20,3	20,4	20,4			20,1	
Min O2	19,1	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0			19,0	
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	701	669	580	666	583	675	444	511	520	351	487	309	169			56	
Max CO	956	851	684	1.015	998	813	977	863	1.106	999	881	932	690			690	
Min CO	516	561	389	506	41	502	6	26	32	0	15	1	1			1	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	78	74	64	74	65	75	49	57	58	39	54	34	19			6	
Max HC	106	95	76	113	111	90	109	96	123	111	98	104	77			77	
Min HC	57	62	43	56	5	56	1	3	4	0	2	0	0			0	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	50	72	71	51	42	60	16	43	40	25	37	19	8			6	
Max NOx	125	144	124	100	120	103	117	138	107	101	109	86	84			88	
Min NOx	29	4	10	0	1	10	4	5	3	2	5	6	5			5	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	7,4	11,5	12,2	13,7	13,9	15,1	13,8	12,8	13,5	12,6	14,6	12,3	8,1			5,9	
Max Unterdruck	8,7	15,0	18,8	21,8	21,3	23,4	23,2	25,4	27,6	28,2	30,4	32,4	25,8			24,6	
Min Unterdruck	6,6	8,6	8,9	10,0	8,4	10,8	8,6	6,8	7,5	7,1	7,7	5,6	3,1			2,7	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	17,6	0,3	4,7	6,1	3,1	4,1	3,1	7,2	6,3	7,4	5,4	8,3	11,2			14,9	
Max Aus.Temp.	21,5	6,6	11,9	9,8	7,4	7,6	6,5	19,7	13,9	14,5	14,2	20,6	24,7			29,3	
Min Aus.Temp.	15,7	-3,9	-2,0	1,5	-1,2	2,5	-0,3	0,1	2,0	-0,6	-1,4	2,2	4,3			6,6	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	45	107	108	100	94	96	70	82	85	66	83	66	47			32	
Max Ab.Temp.	59	169	165	145	167	143	149	164	142	165	155	141	152			130	
Min Ab.Temp.	39	47	74	51	38	52	32	38	33	27	47	22	23			20	
Betriebszeit																	
Zeit in min	10	308	1.575	675	1.352	463	1.119	2.771	3.750	1.229	2.496	4.733	8.873			9.578	
Zeit in h	0,2	5,1	26,3	11,3	22,5	7,7	18,7	46,2	62,5	20,5	41,6	78,9	147,9			159,6	

6.3 Stückholzkessel - Messbox 3

Am Stückholzkessel wurden insgesamt 115 Tage mit der Messbox 3 Abgasmessungen durchgeführt. Der Stückholzkessel wurde im Zeitbetrieb meist ab ca. 17:00 bis 10:00 Uhr (Abends- bzw. Nachtbetrieb) befeuert.

Die Abgastemperaturen wurden erst ab KW11 richtig gemessen. zuvor wurden aufgrund einer mangelhaften Steckverbindung nur negative Werte angezeigt. Diese Messwerte wurden herausgefiltert. In der KW 18 war die Anlage witterungsbedingt nur wenige Tage im Betrieb.

Bei der NO_x-Sonde traten bereits kurz nach dem Messbeginn erste Störungen auf, die sich im Messverlauf immer mehr verstärkten. Deshalb wurde die Sonde in der KW18 ausgebaut, gereinigt und visuell auf Schäden hin untersucht. Hierbei konnte nichts festgestellt werden. Die Sonde war stark durch Ruß- und Staubablagerungen verschmutzt, die Ursache der Sondenstörung lag allerdings nicht an der starken Verschmutzung. Bei der Auswertung wurde das Sondenrauschen so weit wie möglich ausgefiltert. Ab KW 13 kann den NO_x-Werten nicht mehr vertraut werden, hier war die Störung bereits so deutlich, dass kaum noch vernünftige Messwerte erhalten wurden.

Bei der CO+HC-Sonde traten regelmäßig kurzzeitige negative Signale auf (als 1-Minuten-Mittelwerte), die bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

Bei dieser Messbox funktionierte die automatische Datenübertragung nahezu störungsfrei.

Im Heizraum wurde die Raumtemperatur nur sporadisch erfasst, es wurde für die Abgasverlustberechnung eine Temperatur von 18 °C angesetzt. Für die Berechnung der HC-Konzentrationen aus den CO+HC-Äquivalent wurde beim Stückholzkessel angenommen, dass 5 % des Summensignals auf HC entfallen.

Beim Stückholzkessel wurden die Betriebszustände Anbrennen, Holzkohleabbrand (Ausbrandphase), Abbrand der Restglut, Hauptverbrennungsphase sowie der Gesamtabbrand unterschieden. In **Tabelle 6.15** sind die O₂-Sortiergrenzen für die jeweiligen Betriebszustände aufgeführt.

Tabelle 6.15 O₂-Sortiergrenzen für die beim Stückholzkessel betrachteten Betriebszustände – Messbox3

Betriebszustände Stückholzkessel Messbox3	O ₂ – Sortiergrenzen in Vol%
Anbrennvorgänge	manuell
Restglutabbrand	> = 18 < 20
Ausbrandvorgänge (Holzkohleabbrand)	> 15 < 18
Hauptverbrennungsphase	< = 15
gesamter Chargenabbrand	<= 18

In **Bild 6-17** wird das Betriebsverhalten des Stückholzkessels beispielhaft anhand von 2 Betriebstagen bei mittlerem Wärmebedarf (mittlere Außentemperatur $\sim 7^\circ\text{C}$) gezeigt. Im Stückholzkessel wurden für die beiden dargestellten Betriebstage jeweils 2 Chargenabbrände durchgeführt, der erste Abbrand mit größerer und der zweite Abbrand mit einer kleineren Holzaufgabemenge. Auffallend sind die sehr hohen CO+HC-Konzentrationen während den Chargenabbränden.

In **Tabelle 6.16** sind für den Holzkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Gesamtabbrände aufgeführt. **Tabelle 6.17** enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O_2 bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste (angesetzter Wassergehalt für das naturbelassene Holz: 12,8 Massen-%):

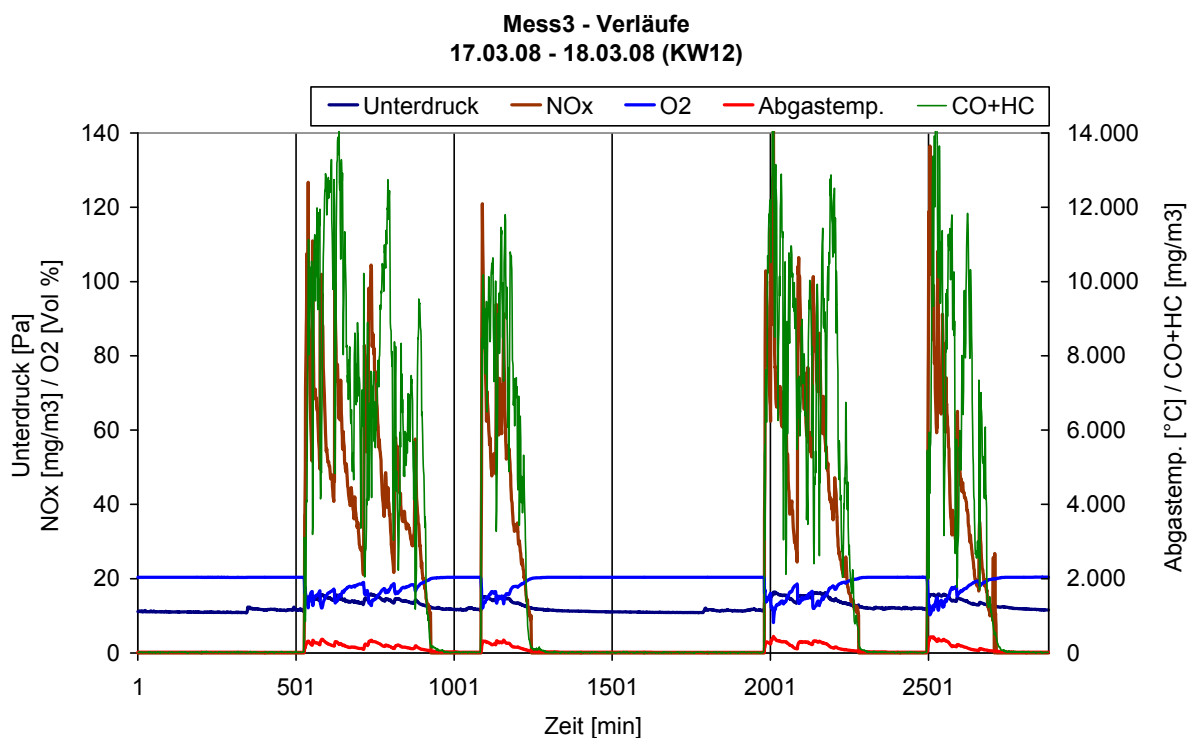


Bild 6-17 Betriebsverhalten des Stückholzkessel an 2 Tagen bei mittlerer Wärmeleistung (KW12) – Messbox3

Tabelle 6.16 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Gesamtabbrände beim Stückholzkessel – Mess3

O ₂ in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O₂	14,8	15,2	15,5	15,0	15,4	15,2	15,0	14,6	14,8	15,3	14,9	14,2	14,3	14,0	15,1	14,3	
Max O₂	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	17,9	18,0	18,0	18,0
Min O₂	3,9	7,0	8,3	7,8	7,9	8,1	7,1	8,6	6,7	6,3	8,5	8,7	7,4	7,8	8,0	10,5	
CO in mg/m³																	
Mittelwert CO	10.647	11.451	10.899	10.328	9.250	8.109	6.693	5.879	4.915	4.130	5.079	4.934	5.489	6.626	5.152	6.181	
Max CO	17.269	18.991	16.047	17.521	17.752	20.340	17.971	19.867	23.106	22.804	18.604	16.422	13.986	15.342	16.023	15.066	
Min CO	6	1.758	762	1.081	702	809	536	821	542	341	618	18	1.010	1.117	803	799	
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC	560	603	574	544	487	427	352	309	259	217	267	260	289	349	271	325	
Max HC	909	1.000	845	922	934	1.071	946	1.046	1.216	1.200	979	864	736	807	843	793	
Min HC	0	93	40	57	37	43	28	43	29	18	33	1	53	59	42	42	
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x	94	84	70	73	67	65	27	26	23	20	22	31	36	28	26	12	
Max NO_x	328	234	192	307	233	197	132	108	108	104	81	212	194	143	95	68	
Min NO_x	29	25	22	21	19	25	0	0	0	0	0	3	1	1	7	0	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	12,8	12,6	12,9	13,8	14,0	14,9	15,7	16,4	17,1	17,5	18,0	18,5	18,8	19,0	19,4	19,7	
Max Unterdruck	14,3	14,8	14,7	15,9	16,7	16,6	17,9	18,3	20,0	20,7	20,5	21,6	20,2	20,9	21,6	21,0	
Min Unterdruck	8,3	10,4	10,9	11,6	11,9	12,3	13,2	13,4	14,4	12,7	14,6	12,7	16,4	15,3	16,2	16,3	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	5,5	10,8	11,7	7,6	11,4	6,0	7,8	10,0	10,1	10,4	13,6	14,4	18,3	17,1	13,7	22,2	
Max Aus.Temp.	16,4	16,4	15,6	14,3	15,4	8,9	14,7	15,6	15,3	19,0	18,9	17,8	24,1	18,7	18,0	27,3	
Min Aus.Temp.	0,8	4,8	5,4	1,6	8,3	2,6	2,8	4,7	4,3	5,2	10,4	11,2	13,4	14,5	10,5	15,7	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.						248	258	268	291	281	264	288	285	293	294	261	308
Max Ab.Temp.						452	460	503	505	541	493	494	495	427	442	459	441
Min Ab.Temp.						66	63	85	89	91	93	90	21	142	70	90	128
Betriebszeit																	
Zeit in min	2.332	2.844	2.468	2.654	2.491	3.426	2.974	2.447	2.399	2.338	1.216	404	263	337	974	277	
Zeit in h	38,9	47,4	41,1	44,2	41,5	57,1	49,6	40,8	40,0	39,0	20,3	6,7	4,4	5,6	16,2	4,6	

* Abgastemperatur liegt erst ab KW 11 vor, NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

Tabelle 6.17 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen (für feuchtes Abgas) und der Abgasverluste der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Gesamtabbrände beim Stückholzkessel – Mess3

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO	13.835	15.917	15.817	13.823	13.206	11.222	8.950	7.347	6.378	5.760	6.608	5.836	6.562	7.605	6.938	7.355	
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC	728	838	832	728	695	591	471	387	336	303	348	307	345	400	365	387	
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x	122	117	102	98	96	90	36	32	30	28	29	37	43	32	34	14	
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A						29,9	30,3	30,6	31,4	31,3	31,2	32,3	29,2	30,4	29,4	30,0	32,0

* Abgasverluste sind etwas zu hoch, da mit O₂ bezogen auf feuchtes Abgas berechnet. Abgasverluste konnten erst ab KW 11 berechnet werden

** NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

In **Bild 6-18** bis **Bild 6-21** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen für die Gesamtabbrände dargestellt.

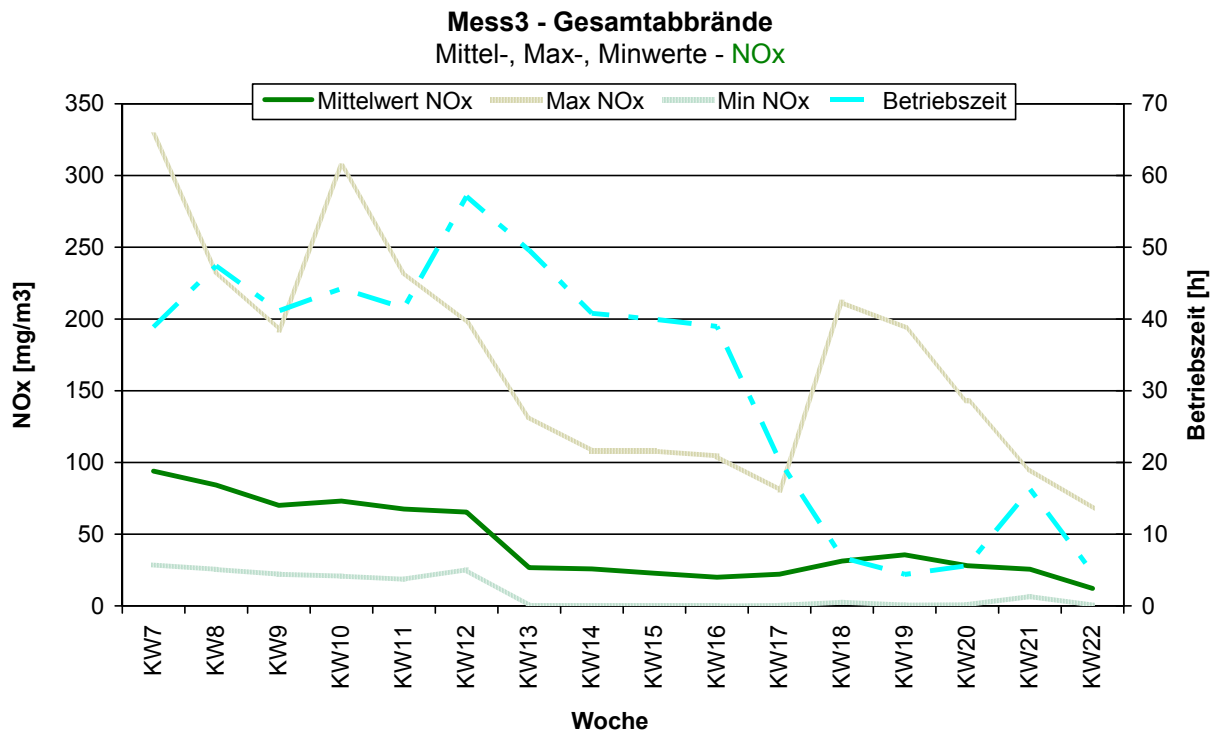
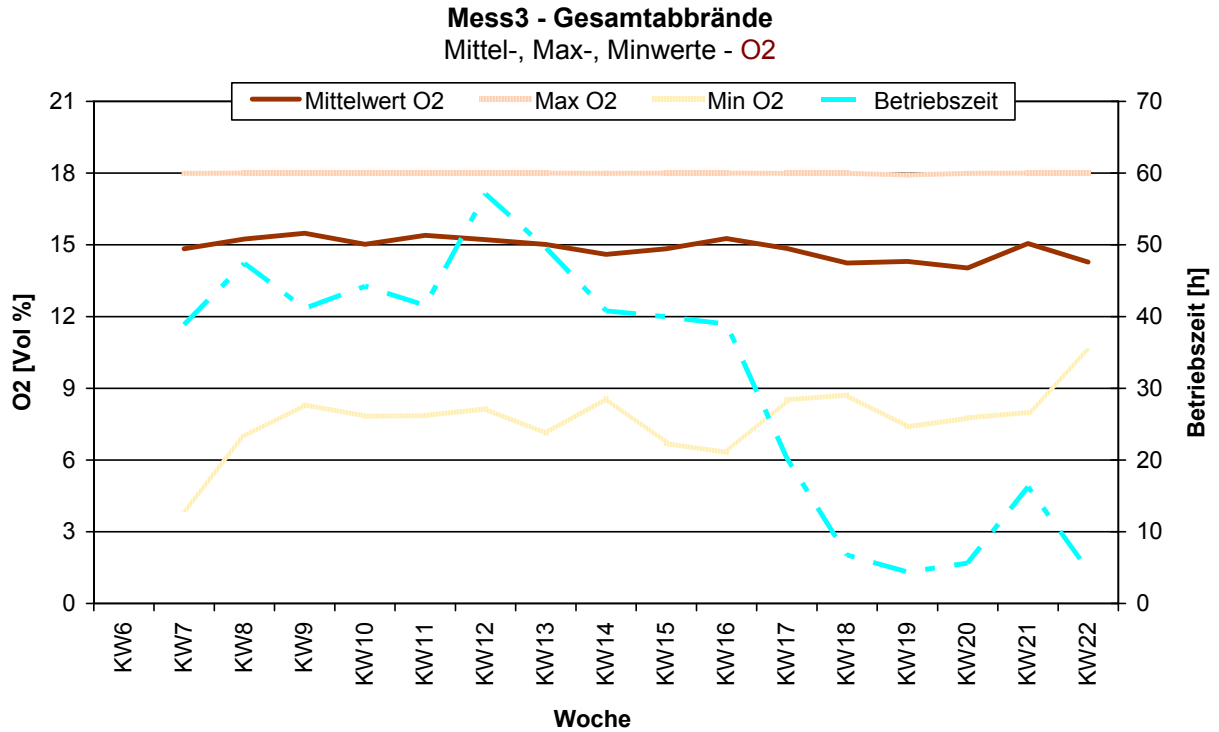


Bild 6-18 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für O₂ und NO_x (NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig) – Messbox3

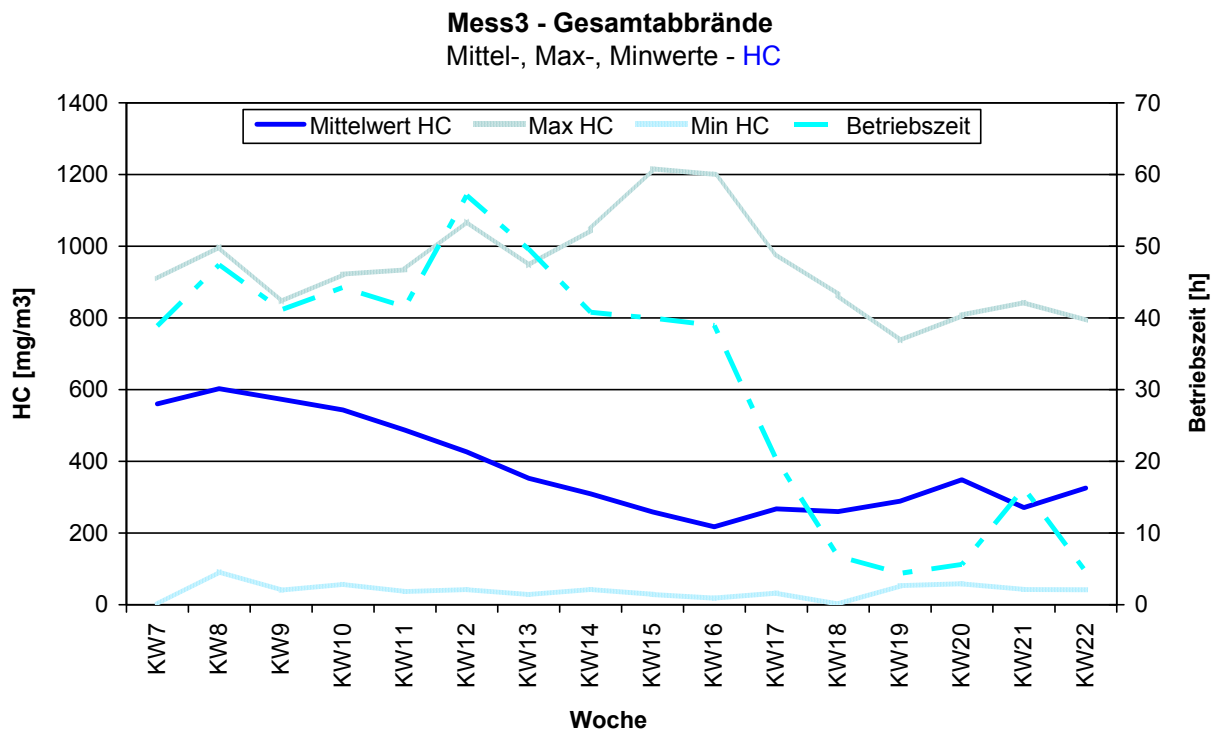
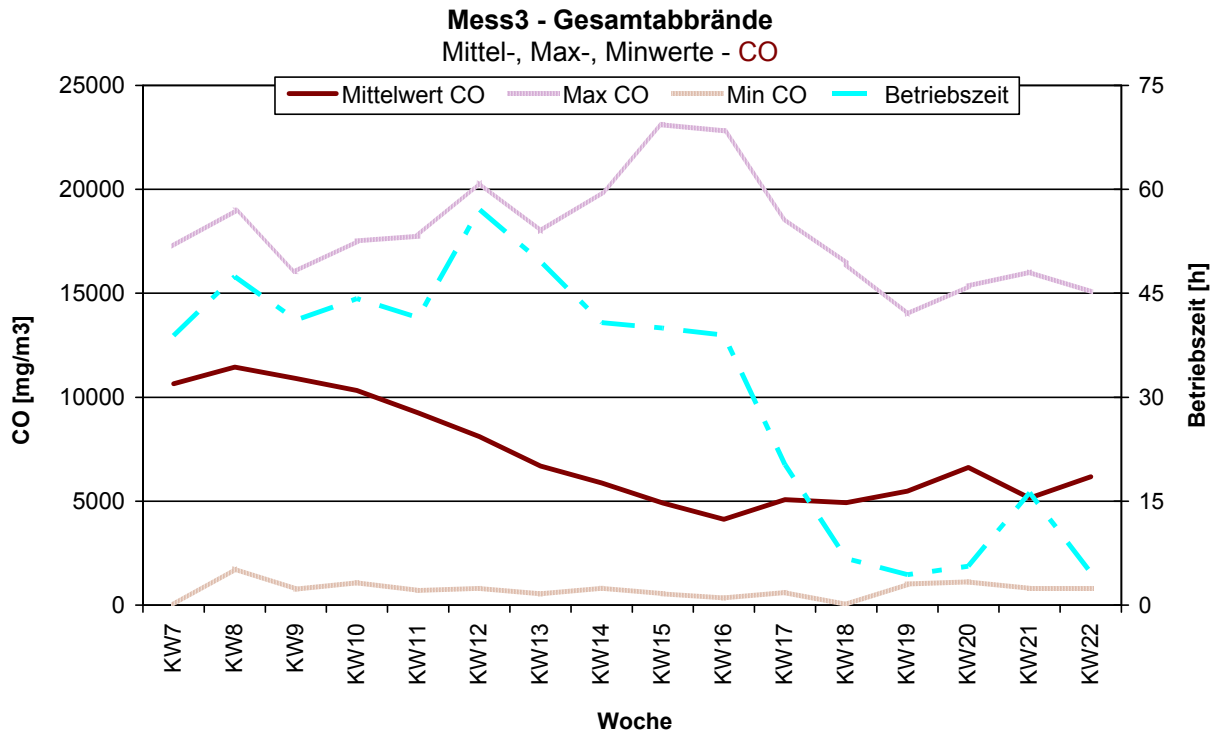


Bild 6-19 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für CO und HC – Messbox3

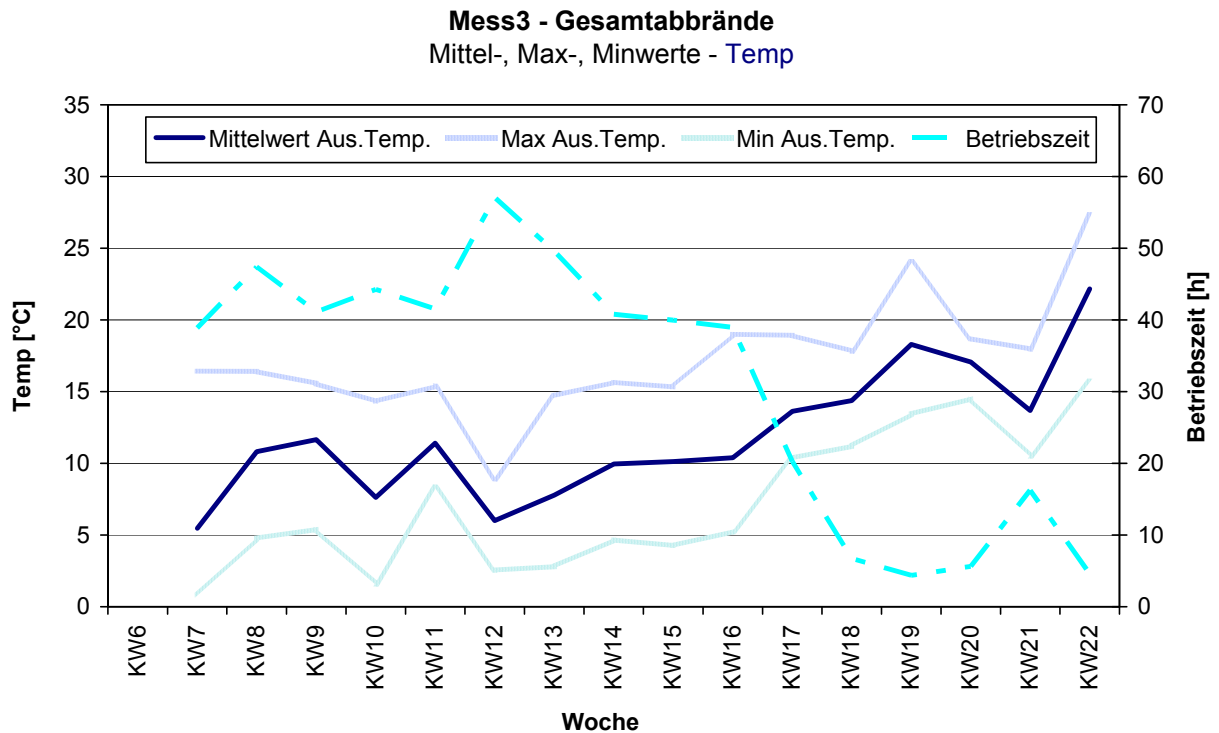
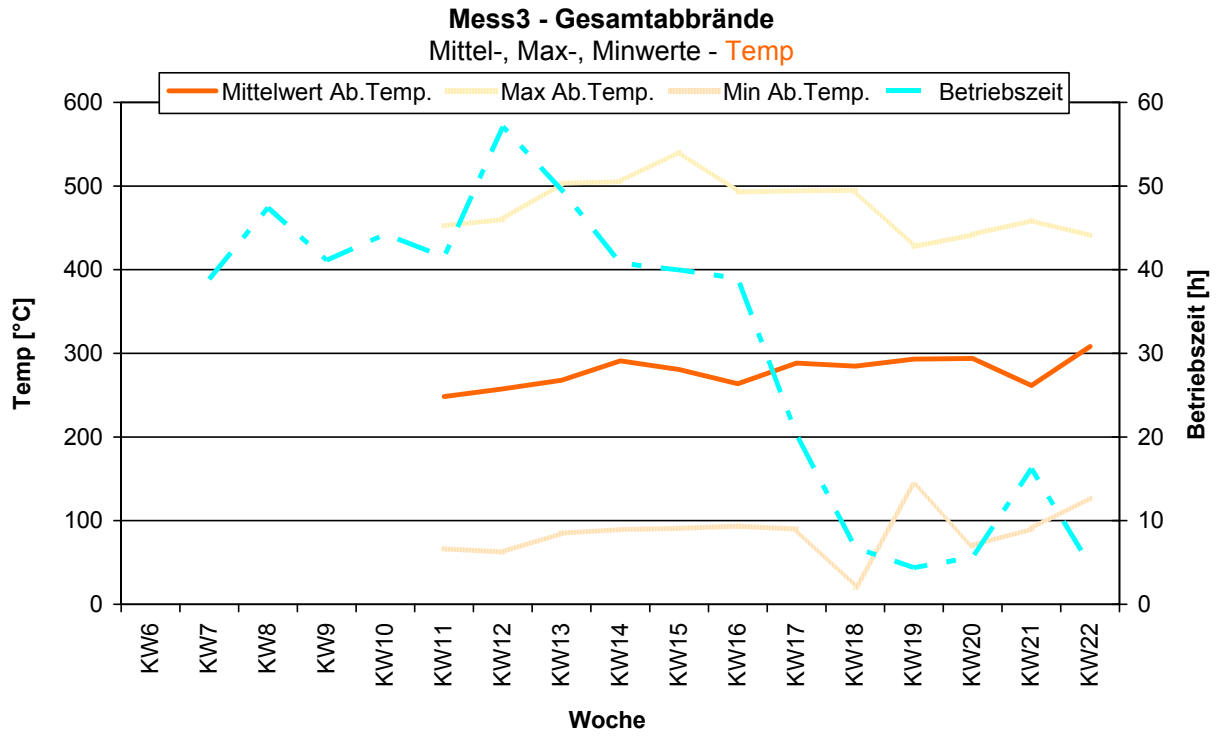


Bild 6-20 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für Abgas- und Außentemperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) – Messbox3

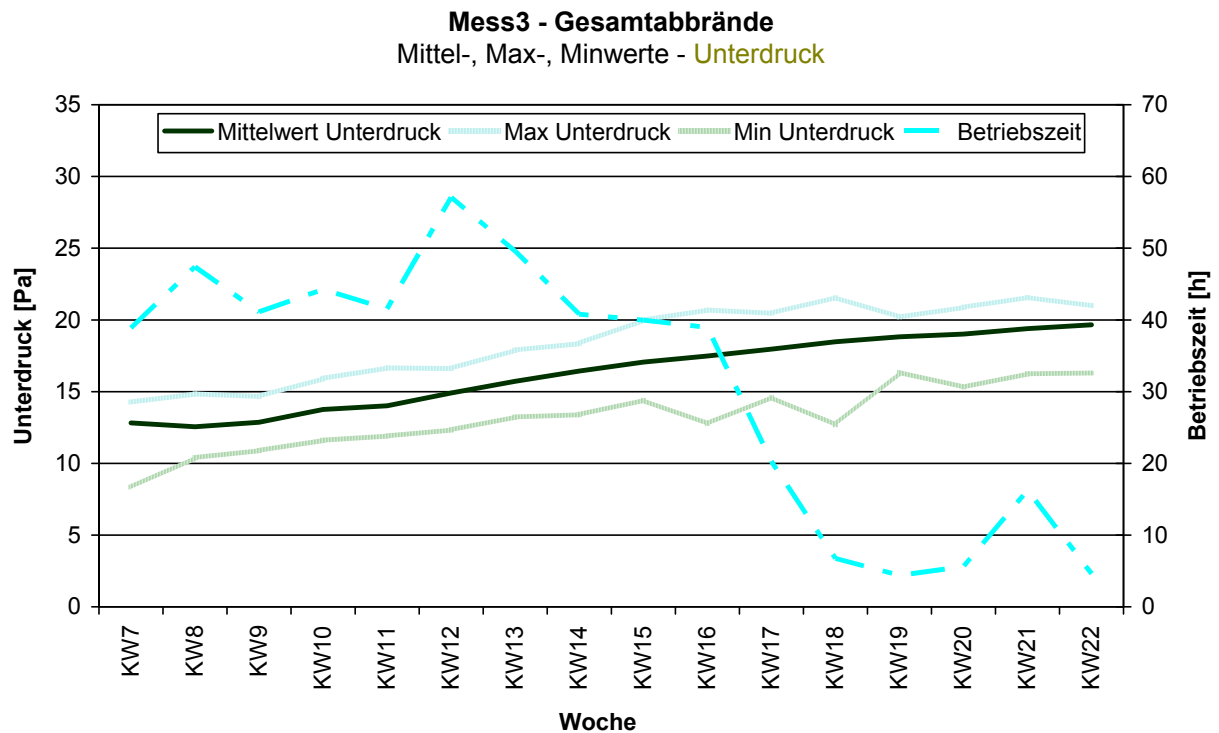


Bild 6-21 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für den Schornsteinzug (Unterdruck) – Messbox3

Die mittleren O_2 -Konzentrationen für die Gesamtabbrände nehmen während der Messperiode nur leicht in Abhängigkeit der Außentemperatur bzw. der Betriebszeiten ab. Die CO- und HC-Konzentrationen blieben, bei ähnlichen Betriebszeiten in KW 7 bis 10, in etwa konstant hoch. Dann nahmen diese kontinuierlich bis zu KW 16 ab, obwohl die Betriebszeit ähnlich hoch blieb. Von KW 17 bis KW 22 trat eine gewisse Stabilisierung der CO- und HC-Konzentrationen auf mittlerem Niveau auf.

Dieses Verhalten des CO+HC-Sensors könnte daran liegen, dass für die gesamte Feldmessperiode nur ein Korrekturfaktor verwendet wurde, da die Vergleichsmessung I keine brauchbare Korrekturfunktion für den Sensor ergab. Da mit allen Sensoren eine möglichst lange Betriebszeit bei der Langzeitmessung erreicht werden sollte, wurde Vergleichsmessung I unter großem Zeitdruck durchgeführt und die Boxen dann unmittelbar danach, vor Auswertung der Messungen, auch installiert. Der Verlauf des Sensorsignals während der Langzeitmessung deutet darauf hin, dass ab der KW 13 verlässliche CO- und HC-Konzentrationen vorliegen. Die berechneten Werte vor KW 13 erscheinen zu hoch.

Die mittleren NO_x -Konzentrationen für die Betriebswochen KW 7 bis KW 12 weisen eine leicht fallende Tendenz auf, bei nahezu konstanten Betriebszeiten und damit ähnlichen Wärmeleistungen der Feuerungsanlage. Dies könnte u.U. an unterschiedlichen Rindenanteilen oder unterschiedlichen Anteilen von verschiedenen Holzarten liegen, die verfeuert wurden, oder aber an der sich allmählich im stärker ausprägenden Sondenstörung, die zu einem undefinierten Rauschen des Sonden Signals führte.

Zu Beginn der Störung war das Rauschen nur in Zeiten ohne Verbrennungsvorgänge vorhanden. Sobald die NO_x -Konzentration im Abgas aufgrund der Verbrennungsvorgänge anstieg, wurden auch plausible Sondensignale erhalten. Ab ca. KW 13 überlagerte das Rauschen alle Messsignale, so dass ab diesem Zeitraum keine zuverlässigen Daten mehr vorliegen.

Der Schornsteinzug nimmt ab KW 9 langsam und kontinuierlich zu, obwohl sich die mittlere Außentemperatur bis KW 16 in etwa auf gleichem Niveau bewegte. Ab KW 17 wurde es deutlich wärmer. Dies könnte auf eine nicht korrigierte Drift der Druckmessdose hindeuten. Andererseits könnte sich der Schornsteinzug aber auch wirklich verändert haben. Hinweise hierfür sind die minimalen O_2 -Konzentrationen jeder Messwoche. In der KW 7 und KW 8 lagen diese besonders niedrig. Ab KW 9 steigen sowohl der Schornsteinzug als auch die minimalen O_2 -Konzentrationen an. Trifft dies tatsächlich zu, wären auch die hohen CO- und HC-Konzentrationen in den ersten beiden Messwochen plausibel. Leider liegen in den ersten Wochen keine Abgastemperaturen vor, diese könnten sonst auch zur Interpretation herangezogen werden. Für die Gesamtabbrände sind die mittleren Abgastemperaturen relativ hoch, wodurch sich höhere Abgasverluste ergeben.

In **Tabelle 6.18** sind für den Stückholzkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Hauptverbrennungsphase aufgeführt. **Tabelle 6.19** enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O_2 bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste.

Tabelle 6.18 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Hauptverbrennungsphase beim Stückholzkessel – Mess3

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	13,3	13,0	13,5	13,3	13,4	13,4	13,2	13,0	12,9	13,2	13,2	12,3	13,3	12,2	13,0	13,1	
Max O2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Min O2	3,9	7,0	8,3	7,8	7,9	8,1	7,1	8,6	6,7	6,3	8,5	8,7	7,4	7,8	8,0	10,5	
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	10.444	10.062	10.607	10.331	9.723	8.391	6.616	6.181	5.482	4.983	5.588	5.050	4.417	5.689	4.829	5.408	
Max CO	16.949	17.451	15.721	17.521	17.752	20.340	17.971	19.867	23.106	22.804	18.604	16.422	13.986	14.886	16.023	15.066	
Min CO	6	1.259	3.261	2.076	1.064	1.010	631	1.058	542	661	772	35	1.010	1.117	1.105	799	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	550	530	558	544	512	442	348	325	289	262	294	266	232	299	254	285	
Max HC	892	918	827	922	934	1.071	946	1.046	1.216	1.200	979	864	736	783	843	793	
Min HC	0	66	172	109	56	53	33	56	29	35	41	2	53	59	58	42	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	120	118	97	95	93	85	40	35	35	34	32	40	37	34	31	13	
Max NOx	328	234	192	307	233	197	132	108	108	104	81	78	110	66	69	22	
Min NOx	64	69	57	52	56	52	6	6	9	13	13	18	23	18	20	7	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	13,2	13,3	13,4	14,3	14,6	15,5	16,3	16,9	17,8	18,3	18,5	19,1	19,1	19,6	20,1	20,1	
Max Unterdruck	14,3	14,8	14,7	15,9	16,7	16,6	17,9	18,3	20,0	20,7	20,5	21,6	20,2	20,9	21,6	21,0	
Min Unterdruck	8,3	11,8	12,1	12,9	13,2	13,9	14,7	14,9	15,7	15,5	16,1	13,5	17,1	17,5	18,6	18,2	
Ausstemtemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	5,6	10,2	11,8	8,4	11,9	6,3	7,8	10,4	10,5	11,3	13,9	14,8	18,8	17,4	14,3	22,5	
Max Aus.Temp.	16,4	16,4	15,6	14,2	15,4	8,9	14,7	15,6	15,3	19,0	18,8	17,8	24,1	18,7	17,9	27,3	
Min Aus.Temp.	0,8	4,8	5,4	2,2	8,6	2,6	2,8	6,2	4,6	5,7	11,6	11,7	13,8	14,8	11,4	16,5	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.						323	324	335	351	347	336	351	346	325	356	332	354
Max Ab.Temp.						452	460	503	505	541	493	494	495	427	442	459	441
Min Ab.Temp.						197	166	177	189	180	216	191	22	214	185	193	223
Betriebszeit																	
Zeit in min	1.170	1.005	840	1.214	863	1.444	1.338	1.330	1.151	936	613	217	173	199	426	181	
Zeit in h	19,5	16,8	14,0	20,2	14,4	24,1	22,3	22,2	19,2	15,6	10,2	3,6	2,9	3,3	7,1	3,0	

* Abgastemperatur liegt erst ab KW 11 vor, NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

Tabelle 6.19 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen (für feuchtes Abgas) und der Abgasverluste der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Hauptverbrennungsphase beim Stückholzkessel – Mess3

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO	10.788	10.027	10.027	11.337	10.750	10.247	8.861	6.783	6.187	5.428	5.132	5.718	4.663	4.563	5.149	4.850	5.488
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC	568	528	528	597	566	539	466	357	326	286	270	301	245	240	271	255	289
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x	124	117	117	104	99	98	90	41	35	34	35	33	37	39	30	31	13
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A						30,1	30,3	30,5	31,4	30,8	30,8	32,0	28,8	29,8	29,1	29,7	32,1

* Abgasverluste sind etwas zu hoch, da mit O₂ bezogen auf feuchtes Abgas berechnet. Abgasverluste konnten erst ab KW 11 berechnet werden

** NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

In **Bild 6-22** bis **Bild 6-25** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen für die Hauptverbrennungsphasen dargestellt.

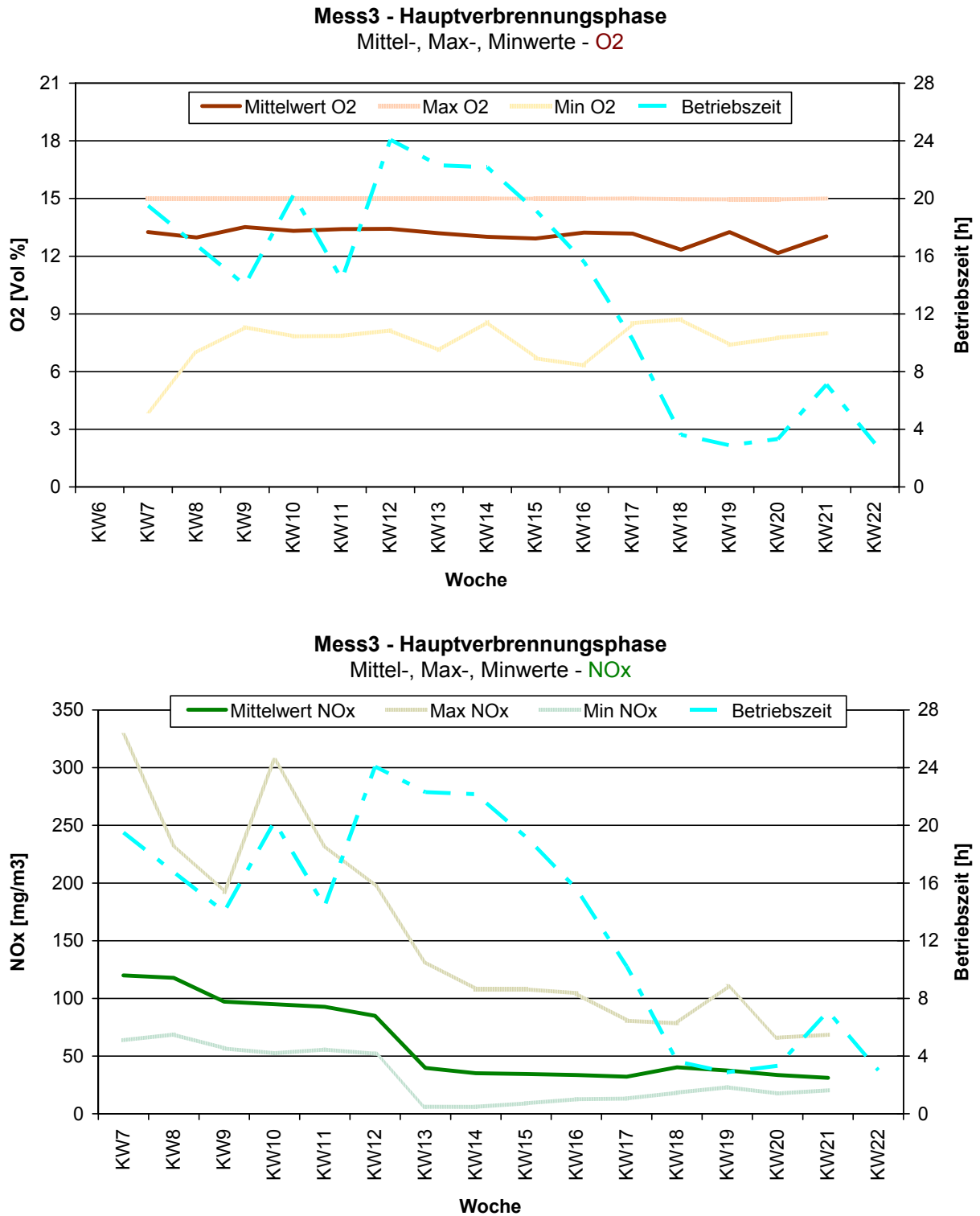


Bild 6-22 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für O₂ und NO_x (NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig) – Messbox3

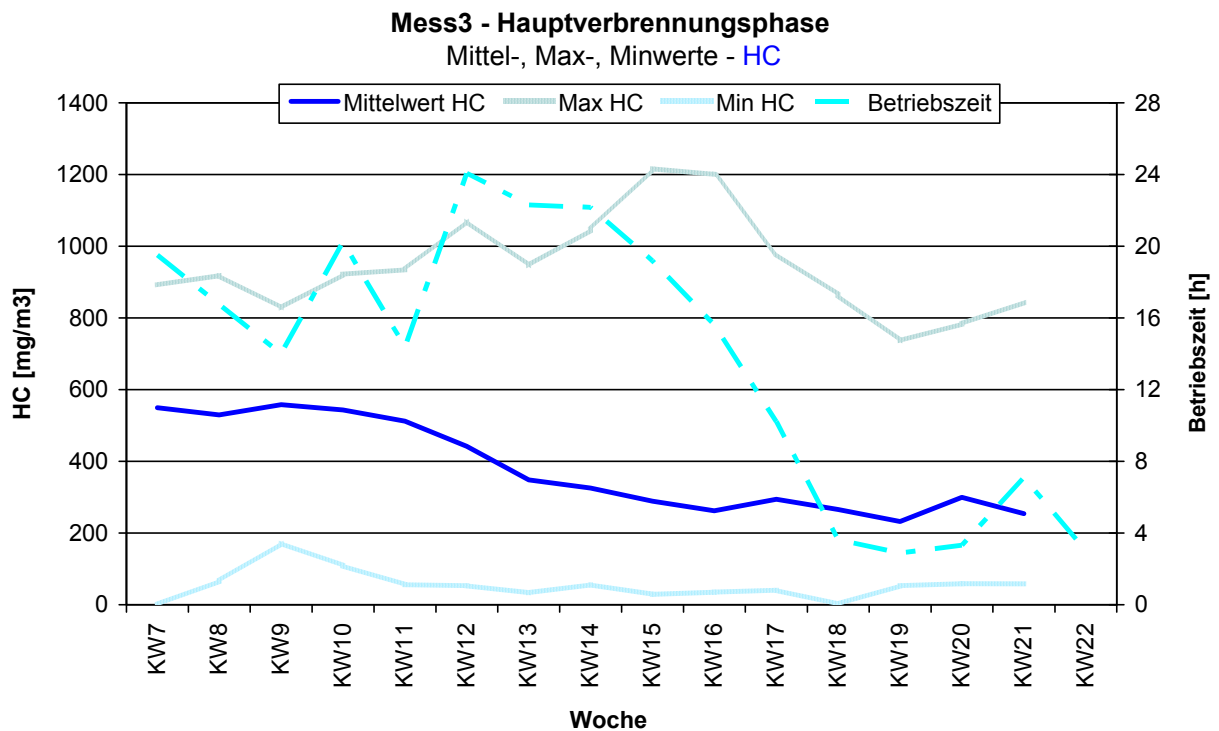
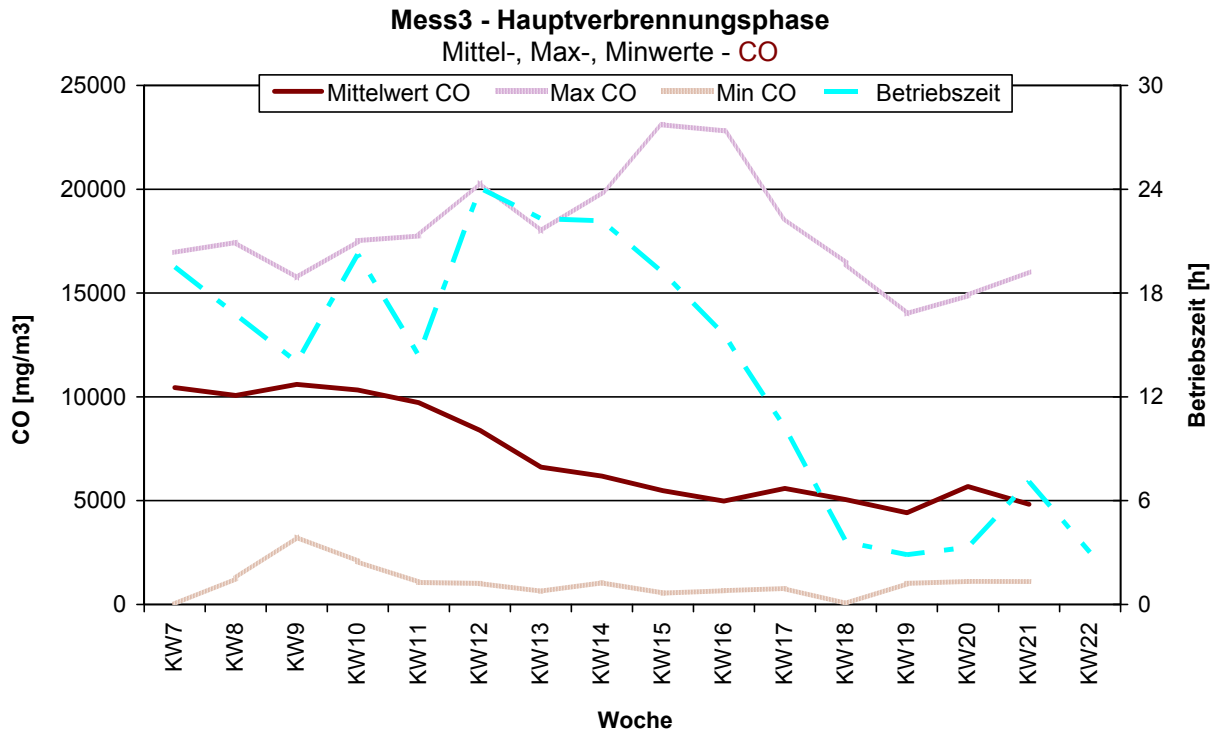


Bild 6-23 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für CO und HC – Messbox3

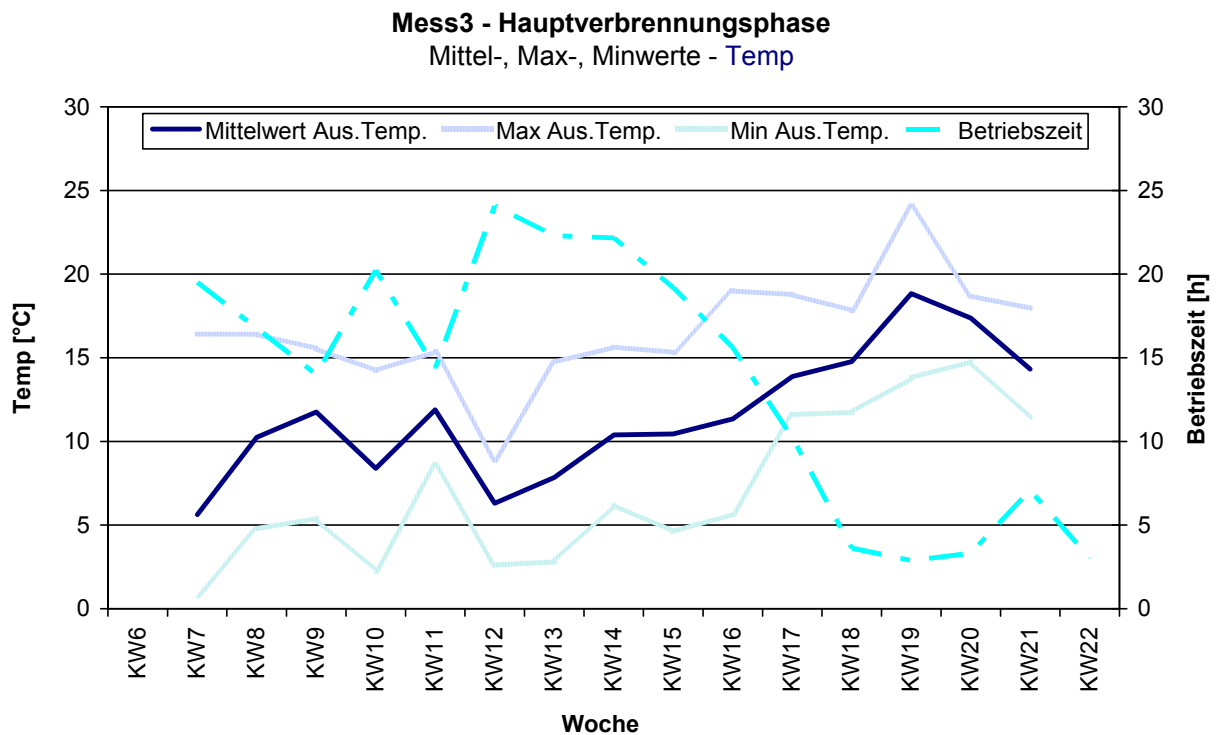
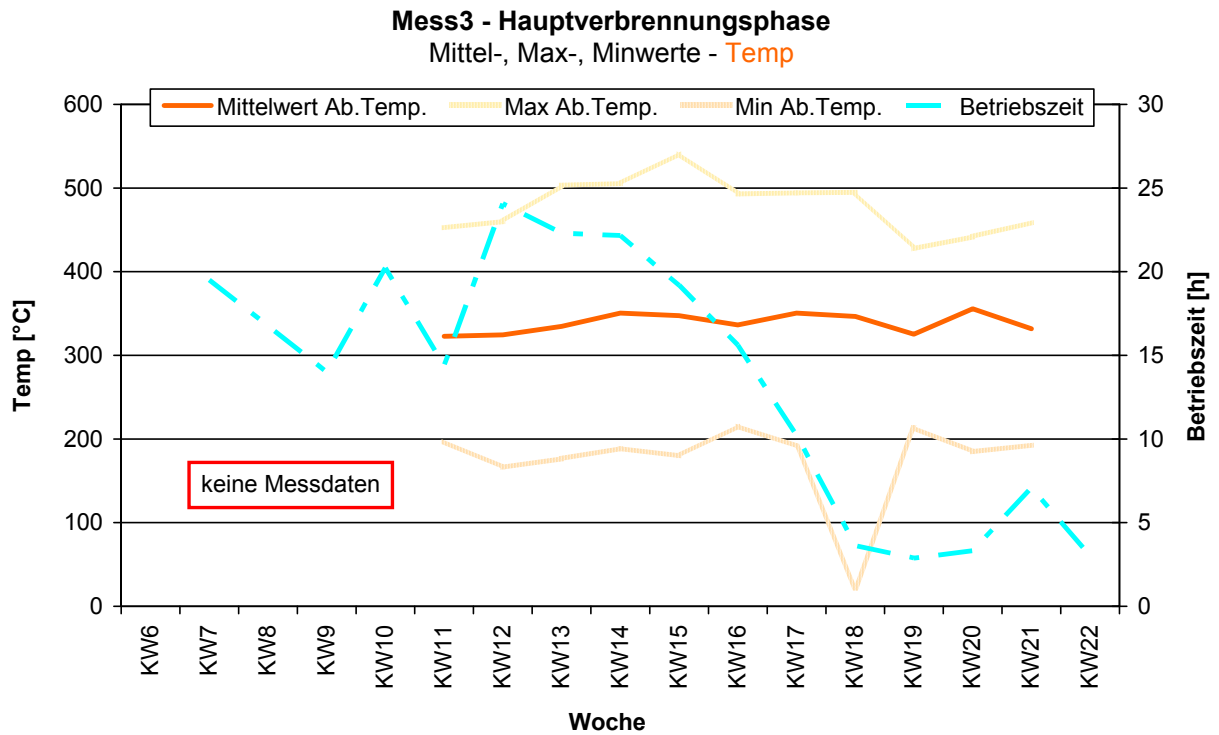


Bild 6-24 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für Abgas- und Außentemperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) – Messbox3

Mess3 - Hauptverbrennungsphase

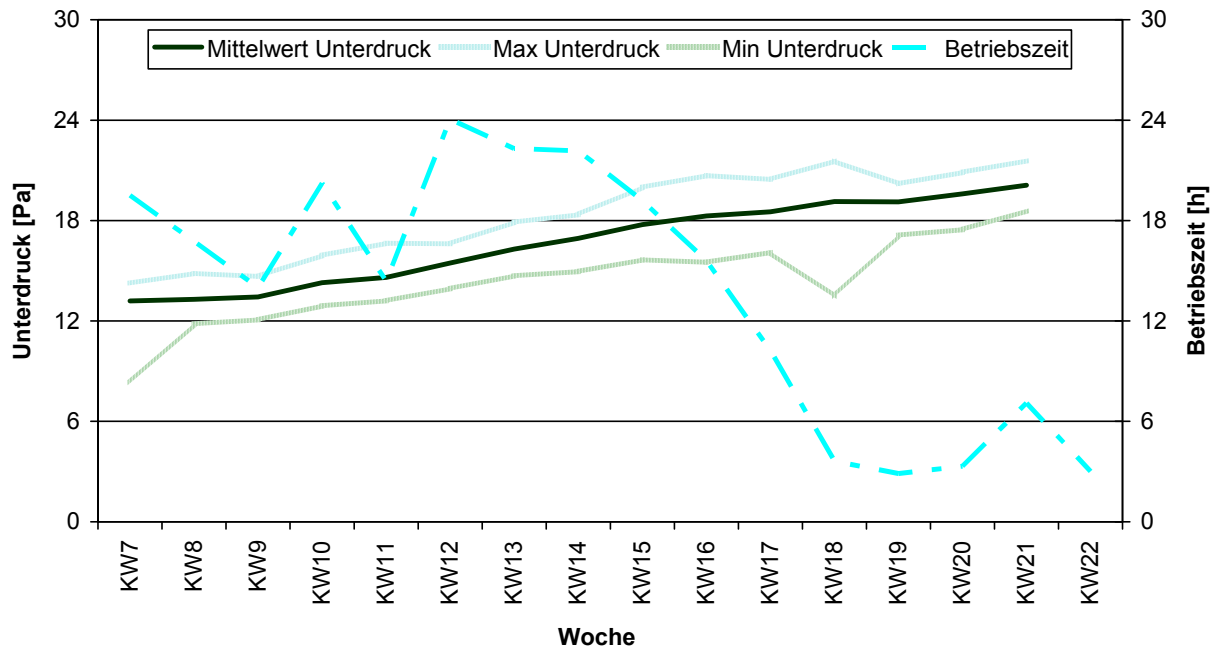
 Mittel-, Max-, Minwerte - **Unterdruck**


Bild 6-25 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Stückholzkessel für den Schornsteinzug (Unterdruck) – Messbox3

In **Tabelle 6.20** sind für den Stückholzkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Anbrennvorgänge und in **Tabelle 6.21** für die Ausbrandvorgänge aufgeführt. Bei höheren mittleren O_2 -Konzentrationen wurden hohe bis sehr hohe mittlere CO -Konzentrationen gemessen, die während der Betriebszeit abnehmen.

Tabelle 6.22 enthält für den Stückholzkessel die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für den Restglutabbrand.

Tabelle 6.20 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Anbrennvorgänge beim Stückholzkessel – Mess3

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	13,4	16,1	16,5	16,5	16,9	16,5	17,0	16,1	15,9	16,6	16,2	16,1	15,5	15,4	16,9	17,1	
Max O2	20,3	20,4	20,3	20,3	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,5	20,5	20,5	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
Min O2	7,0	7,9	9,2	9,4	9,8	9,2	7,3	9,3	7,0	10,6	9,8	9,2	7,4	7,9	9,5	12,6	
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	9.054	5.753	4.620	4.276	3.693	3.567	3.173	3.685	4.104	3.182	3.578	3.973	5.154	6.029	3.777	3.590	
Max CO	16.505	18.002	12.185	13.317	17.752	9.094	13.755	12.671	16.195	9.799	13.013	14.930	13.986	14.063	12.878	9.316	
Min CO	35	490	15	3	3	3	3	3	3	3	2	6	9	15	9	12	
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	477	303	243	225	194	188	167	194	216	167	188	209	271	317	199	189	
Max HC	869	947	641	701	934	479	724	667	852	516	685	786	736	740	678	490	
Min HC	2	26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	135	91	80	73	68	79	38	44	45	37	36	46	49	62	35	12	
Max NOx	235	234	192	183	309	156	121	186	138	90	133	78	110	78	62	21	
Min NOx	4	6	4	5	7	10	1	1	1	1	3	5	20	42	12	3	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	12,4	11,3	11,8	12,3	12,5	13,3	13,7	14,5	15,2	15,5	15,8	16,1	16,9	16,6	17,1	16,6	
Max Unterdruck	14,3	14,8	14,5	14,9	15,2	15,8	16,8	18,0	18,4	19,5	19,5	18,8	19,3	19,9	20,9	19,5	
Min Unterdruck	9,2	9,3	9,6	10,4	10,3	11,1	11,1	11,7	12,0	12,3	12,4	13,4	13,2	13,7	14,1	14,2	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	6,5	10,8	12,0	9,2	12,5	6,9	9,4	11,2	11,9	11,7	13,9	14,9	17,1	15,2	14,2	22,2	
Max Aus.Temp.	14,2	15,8	14,5	13,7	15,1	8,9	14,4	15,6	15,3	19,0	18,9	16,4	23,9	15,7	18,0	27,1	
Min Aus.Temp.	2,4	5,2	5,4	2,4	8,7	4,9	2,7	7,9	5,6	7,3	11,8	11,6	13,4	15,0	11,4	18,7	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.						149	162	139	183	194	172	194	166	198	179	153	139
Max Ab.Temp.						414	372	430	450	541	401	446	392	427	418	371	316
Min Ab.Temp.						18	18	18	19	18	18	19	19	18	19	18	19
Betriebszeit																	
Zeit in min	143	100	142	114	111	117	70	139	124	138	101	30	27	7	84	24	
Zeit in h	2,4	1,7	2,4	1,9	1,9	2,0	1,2	2,3	2,1	2,3	1,7	0,5	0,5	0,1	1,4	0,4	

* Abgastemperatur liegt erst ab KW 11 vor, NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

Tabelle 6.21 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Ausbrandvorgänge (Holzkohleabbrand) beim Stückholzkessel – Mess3

O ₂ in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O₂	16,4	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,5	16,5	16,5	16,6	16,6	16,5	16,4	16,3	16,7	16,6	16,5
Max O₂	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	17,9	18,0	18,0	18,0
Min O₂	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1
CO in mg/m³																	
Mittelwert CO	10.852	11.368	11.050	10.326	9.000	7.904	6.756	5.518	4.392	3.561	4.562	4.850	7.551	7.977	5.404	7.637	
Max CO	17.269	18.671	16.047	16.692	15.709	14.987	15.306	15.277	12.600	12.014	12.048	8.919	13.169	15.342	13.855	12.407	
Min CO	2.469	1.758	762	1.081	702	809	536	821	679	341	618	18	2.278	1.816	803	1.546	
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC	571	598	582	543	474	416	356	290	231	187	240	255	397	420	284	402	
Max HC	909	983	845	879	827	789	806	804	663	632	634	469	693	807	729	653	
Min HC	130	93	40	57	37	43	28	43	36	18	33	1	120	96	42	81	
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x	68	66	56	54	54	51	11	10	8	10	12	21	32	20	21	10	
Max NO_x	170	118	110	276	127	127	64	80	60	61	40	212	194	143	95	68	
Min NO_x	29	25	22	21	19	25	0	0	0	0	0	3	1	1	7	0	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	12,4	12,2	12,6	13,3	13,7	14,5	15,3	15,8	16,4	17,0	17,4	17,7	18,3	18,2	18,8	18,9	
Max Unterdruck	13,5	13,7	14,5	14,7	15,8	16,3	16,7	17,2	17,9	19,1	18,9	19,6	19,3	19,4	20,3	20,1	
Min Unterdruck	10,7	10,4	10,9	11,6	11,9	12,3	13,2	13,4	14,4	12,7	14,6	12,7	16,4	15,3	16,2	16,3	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	5,3	11,1	11,6	7,0	11,2	5,8	7,7	9,4	9,8	9,8	13,4	14,0	17,2	16,6	13,2	21,6	
Max Aus.Temp.	12,3	15,8	15,3	14,3	14,8	8,9	14,4	15,5	15,1	18,9	18,9	17,8	23,9	18,6	18,0	26,8	
Min Aus.Temp.	0,8	4,9	5,4	1,6	8,3	2,6	2,8	4,7	4,3	5,2	10,4	11,4	13,4	14,5	10,5	15,7	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.						209	209	213	220	219	215	225	215	231	205	207	222
Max Ab.Temp.						307	309	336	330	326	321	327	323	324	309	327	327
Min Ab.Temp.						66	63	85	89	91	93	90	21	142	70	90	128
Betriebszeit																	
Zeit in min	1.162	1.839	1.628	1.440	1.628	1.982	1.636	1.117	1.248	1.402	603	182	90	138	548	96	
Zeit in h	19,4	30,7	27,1	24,0	27,1	33,0	27,3	18,6	20,8	23,4	10,1	3,0	1,5	2,3	9,1	1,6	

* Abgastemperatur liegt erst ab KW 11 vor, NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

Tabelle 6.22 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 22 für die Restglutabbrände beim Stückholzkessel – Mess3

O ₂ in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O₂	19,1	19,0	19,1	19,2	19,1	19,1	19,1	19,0	19,2	19,0	19,1	19,1	19,1	19,3	19,2	19,1	19,2
Max O₂	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Min O₂	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
CO in mg/m³																	
Mittelwert CO	6.874	6.315	5.344	4.176	3.505	3.260	2.923	2.437	2.191	2.292	2.286	1.960	2.386	2.830	2.513	2.979	
Max CO	16.043	15.367	13.524	12.997	12.180	12.559	12.784	10.883	10.201	9.532	11.071	8.966	10.024	10.995	10.219	11.418	
Min CO	308	715	163	175	152	152	134	116	140	134	127	41	181	187	229	243	
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC	362	332	281	220	184	172	154	128	115	121	120	103	126	149	132	157	
Max HC	844	809	712	684	641	661	673	573	537	502	583	472	528	579	538	601	
Min HC	16	38	9	9	8	8	7	6	7	7	7	2	10	10	12	13	
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x	21	22	17	17	19	31	114	126	94	86	58	64	60	48	40	25	
Max NO_x	86	81	44	78	309	473	403	434	372	347	344	185	152	192	149	82	
Min NO_x	4	6	2	4	6	6	0	1	0	0	0	1	12	1	7	0	
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	11,1	11,0	11,3	12,0	12,4	13,0	13,8	14,2	14,7	15,2	15,7	16,2	16,4	16,8	17,3	17,2	
Max Unterdruck	12,4	12,4	12,7	13,3	13,6	14,8	15,2	15,6	16,2	16,8	17,8	17,5	18,0	18,3	19,2	18,5	
Min Unterdruck	9,3	9,5	9,9	10,6	10,4	11,4	11,4	11,9	12,3	12,5	12,6	12,7	13,5	13,9	14,4	14,8	
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	5,7	10,7	11,2	7,0	10,9	5,4	7,5	9,0	9,4	10,1	12,2	14,3	18,1	15,8	12,5	19,5	
Max Aus.Temp.	14,2	15,1	14,5	13,3	15,0	8,9	14,3	15,5	15,2	18,9	18,9	17,3	22,9	18,6	17,9	27,1	
Min Aus.Temp.	1,1	5,4	5,5	1,3	8,2	2,5	2,8	4,8	3,9	4,9	10,2	10,8	13,6	13,4	10,4	14,5	
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.						89	91	98	91	99	98	98	95	97	99	99	98
Max Ab.Temp.						156	165	170	182	171	169	167	163	168	172	166	167
Min Ab.Temp.						22	25	21	24	24	26	22	25	30	25	25	30
Betriebszeit																	
Zeit in min	700	948	982	986	949	1.270	906	972	1.075	1.126	636	122	93	133	429	133	
Zeit in h	11,7	15,8	16,4	16,4	15,8	21,2	15,1	16,2	17,9	18,8	10,6	2,0	1,6	2,2	7,2	2,2	

* Abgastemperatur liegt erst ab KW 11 vor, NO_x-Werte sind ab KW 13 aufgrund einer Sondenstörung zu niedrig

6.4 Kaminofen - Messbox 4

Am Kaminofen wurden insgesamt 99 Tage mit der Messbox4 Abgasmessungen durchgeführt. Da diese Feuerungsanlage als Zusatzfeuerung benutzt wird, war diese nicht permanent in Betrieb, sondern meist nur von ca. 17:00 ca. 22:00 Uhr.

Bei dieser Messbox wurde die automatische Datenübertragung nicht aktiviert, die Daten wurden regelmäßig vor Ort gesichert und die Messbox hierbei kontrolliert.

Die Temperatur im Aufstellungsraum des Kaminofens wurde nicht regelmäßig gemessen, hier wurde für die Abgasverlustberechnung eine Temperatur von 23 °C angesetzt. Für die Berechnung der HC-Konzentrationen aus den CO+HC-Äquivalent wurde beim Kaminofen angenommen, dass 5 % des Summensignals auf HC entfallen.

Beim Kaminofen wurden die Betriebszustände Anbrennen, Holzkohleabbrand (Ausbrandphase), Abbrand der Restglut, Hauptverbrennungsphase sowie der Gesamtabbrand unterschieden. In **Tabelle 6.23** sind die O₂-Sortiergrenzen für die jeweiligen Betriebszustände aufgeführt.

Tabelle 6.23 O₂-Sortiergrenzen für die beim Kaminofen betrachteten Betriebszustände – Messbox4

Betriebszustände Kaminofen Messbox4	O ₂ – Sortiergrenzen in Vol%
Anbrennvorgänge	manuell
Restglutabbrand	> = 19 < 20
Ausbrandvorgänge (Holzkohleabbrand)	> 15 < 19
Hauptverbrennungsphase	< = 15
gesamter Chargenabbrand	<= 19

In **Bild 6-26** wird das Betriebsverhalten des Kaminofens beispielhaft anhand von 2 Betriebstagen bei höherem Wärmebedarf (mittlere Außentemperatur ~ - 1 °C) gezeigt. Im Kaminofen wurden für die beiden dargestellten Betriebstage jeweils mehrere Chargenabbrände durchgeführt. Auffallend sind die sehr hohen CO+HC-Konzentrationen während den Chargenabbränden, meist vor allem in der Ausbrandphase.

In **Tabelle 6.24** sind für den Kaminofen die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Gesamtabbrände aufgeführt. **Tabelle 6.25** enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste (angesetzter Wassergehalt für das naturbelassene Holz: 16,0 Massen-%):

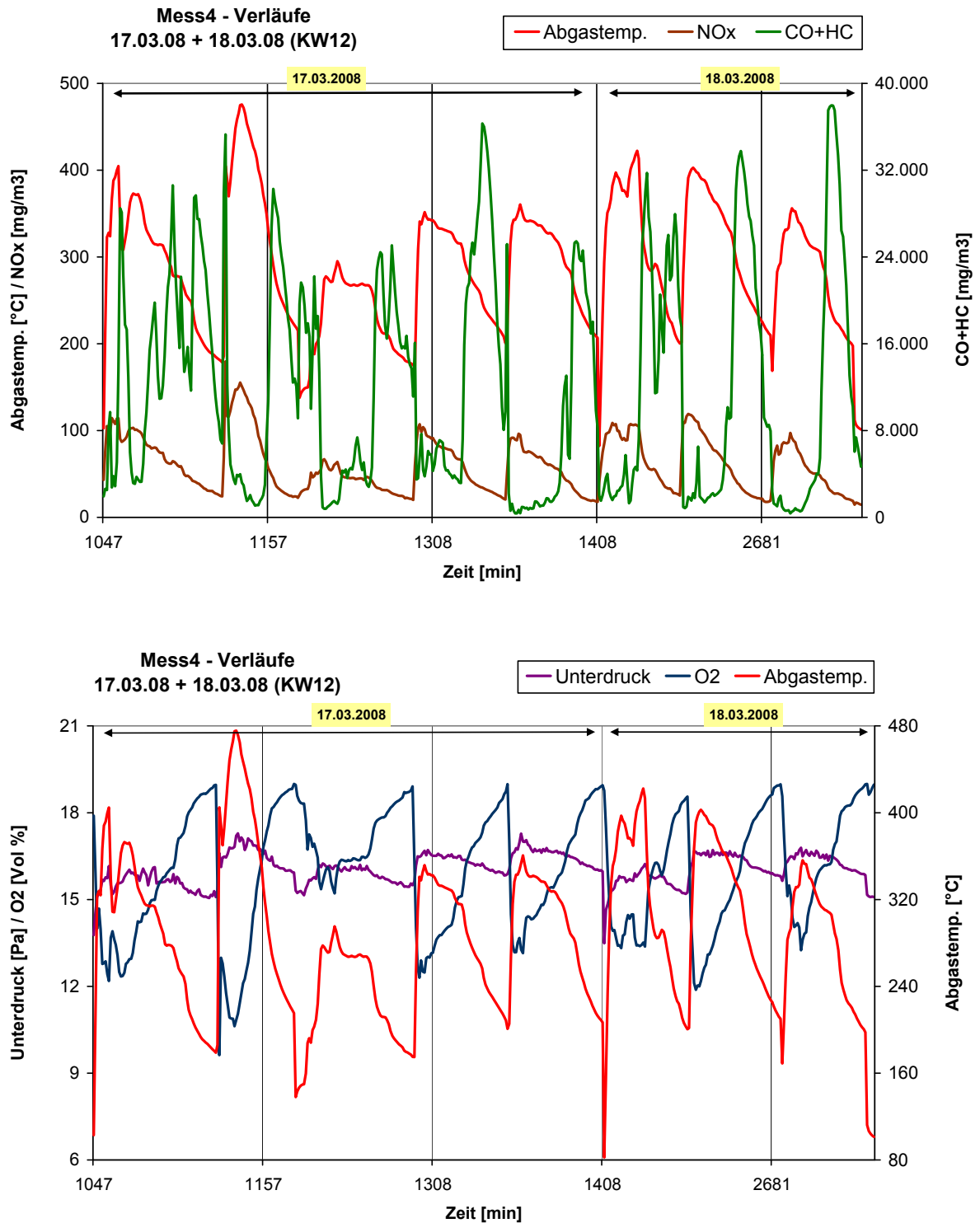


Bild 6-26 Betriebsverhalten des Kaminofens an 2 Tagen bei höherer Wärmeleistung (KW12) – Messbox4

Tabelle 6.24 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Gesamtabbrände beim Kaminofen – Mess4

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	15,0	15,3	15,7	15,4	15,5	15,8	16,0	15,6	15,8	15,4	16,2	15,6					
Max O2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0				
Min O2	4,4	2,8	4,2	7,3	7,4	7,8	7,6	7,4	7,8	7,7	10,0	7,4					
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	5.368	6.657	7.830	9.513	10.815	11.382	10.342	12.214	12.795	15.760	13.954	17.091					
Max CO	13.761	24.033	29.291	29.586	34.750	38.349	42.474	48.516	51.608	63.774	51.952	83.650					
Min CO	8	5	21	312	33	7	1	6	6	70	712	12					
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	283	350	412	501	569	599	544	643	673	829	734	900					
Max HC	724	1.265	1.542	1.557	1.829	2.018	2.235	2.553	2.716	3.357	2.734	4.403					
Min HC	0	0	1	16	2	0	0	0	0	4	37	1					
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	83	85	80	86	66	68	66	58	47	61	48	58					
Max NOx	477	325	307	329	378	517	395	355	473	347	132	521					
Min NOx	10	10	20	19	7	11	14	7	10	13	4	12					
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	16,0	15,7	15,9	15,9	16,2	16,4	16,5	16,1	16,0	16,0	15,4	15,9					
Max Unterdruck	17,9	17,2	19,7	17,5	20,3	21,8	18,7	17,7	17,1	17,2	16,3	17,3					
Min Unterdruck	10,8	11,7	11,2	12,3	11,4	11,3	11,2	11,2	11,2	11,3	12,0	11,3					
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	-5,5	0,8	3,5	-0,8	3,8	-3,8	-1,1	2,6	2,6	4,3	7,5	6,9					
Max Aus.Temp.	25,8	12,7	12,3	10,5	13,9	6,8	12,2	12,5	14,2	15,6	13,7	16,6					
Min Aus.Temp.	-11,1	-7,3	-4,7	-10,8	-3,2	-11,5	-8,6	-4,6	-5,3	-5,5	1,4	-0,4					
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	292	308	311	319	314	303	306	297	295	304	280	300					
Max Ab.Temp.	605	622	630	545	531	554	520	501	482	478	467	567					
Min Ab.Temp.	25	25	25	52	25	25	25	25	25	25	43	25					
Betriebszeit																	
Zeit in min	818	821	839	897	1.041	1.288	1.075	707	1.051	619	212	582					
Zeit in h	13,6	13,7	14,0	15,0	17,4	21,5	17,9	11,8	17,5	10,3	3,5	9,7					

Tabelle 6.25 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen (für feuchtes Abgas) und der Abgasverluste der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Gesamtabbrände beim Kaminofen – Mess4

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO		7.114	9.386	11.830	13.484	15.778	17.459	16.399	18.202	19.744	22.419	23.250	25.459				
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC		374	494	623	710	830	919	863	958	1.039	1.180	1.224	1.340				
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x		110	120	121	122	96	105	104	86	73	86	81	86				
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A		33,5	37,5	40,4	39,2	39,6	39,8	41,5	38,0	38,9	37,3	39,4	38,4				

In **Bild 6-27** bis **Bild 6-30** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen für die Gesamtabbrände dargestellt.

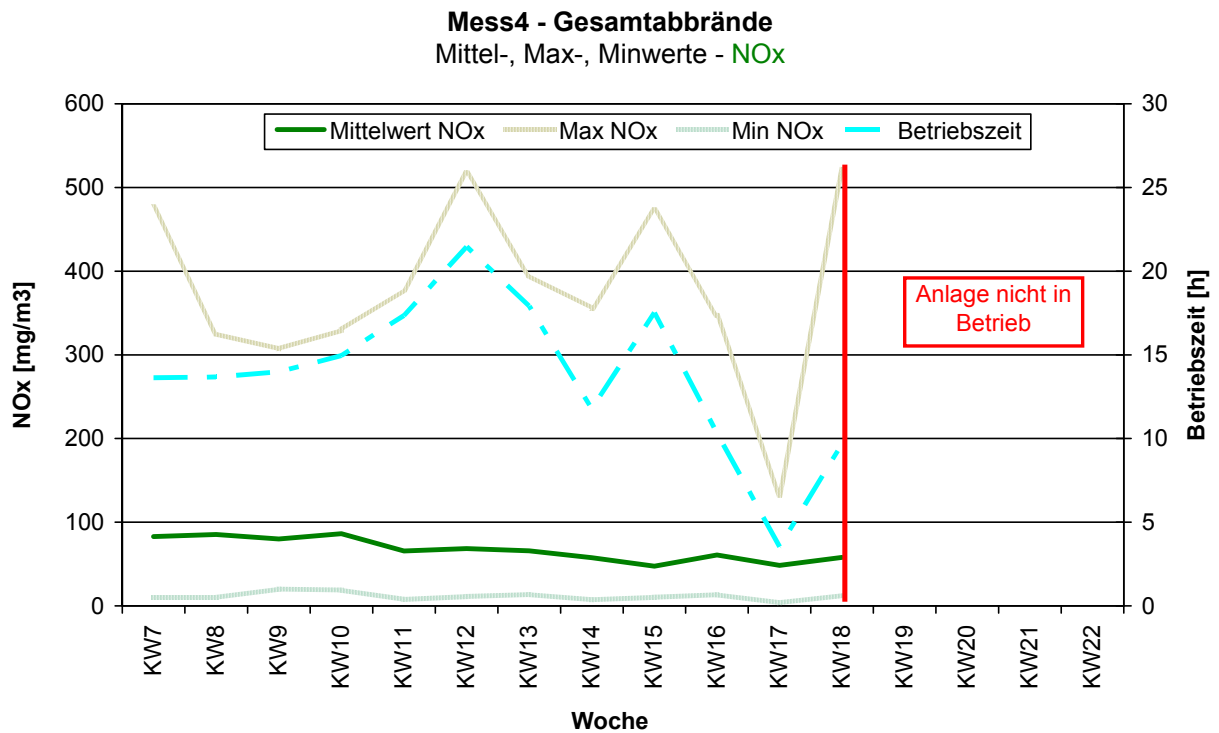
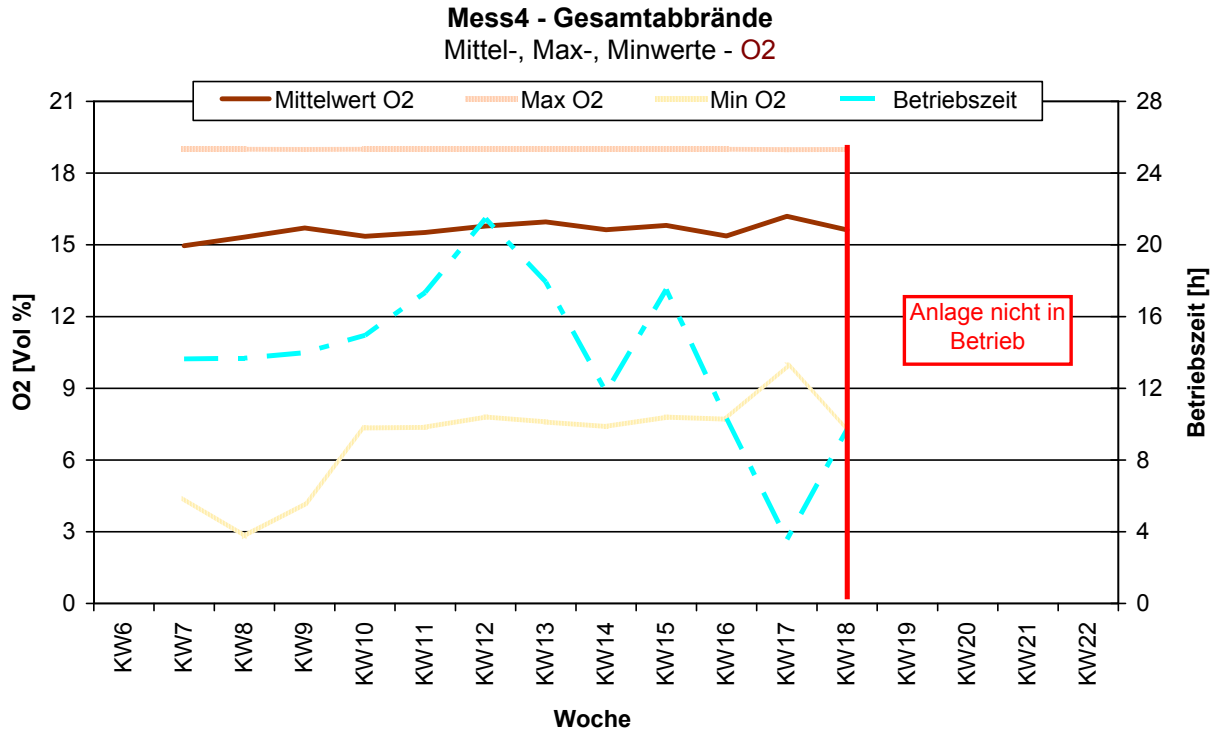


Bild 6-27 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für O₂ und NO_x – Messbox4

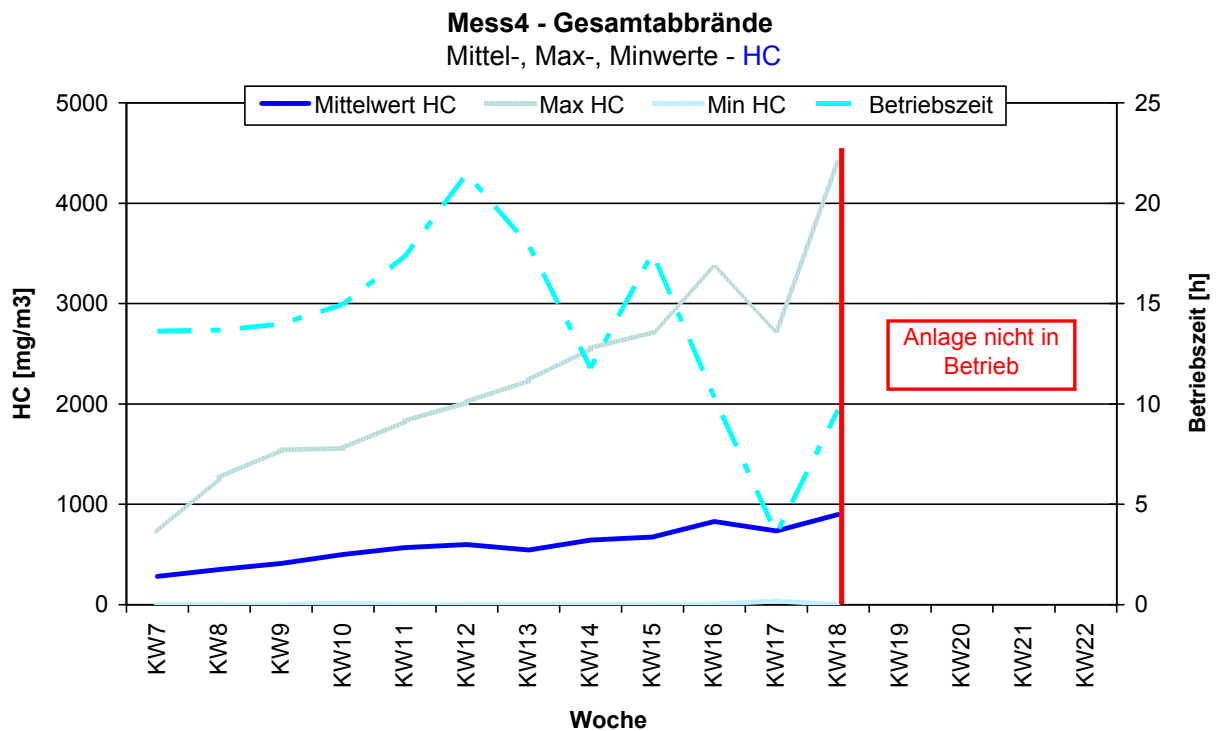
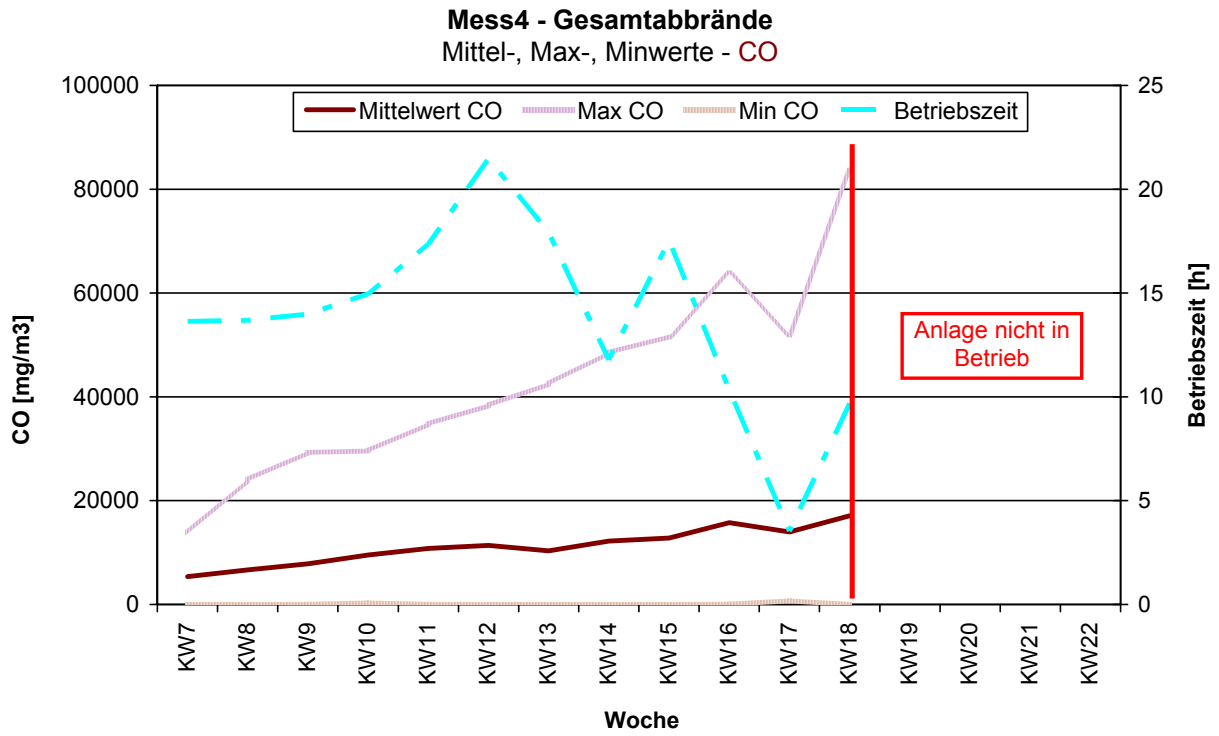


Bild 6-28 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für CO und HC – Messbox4

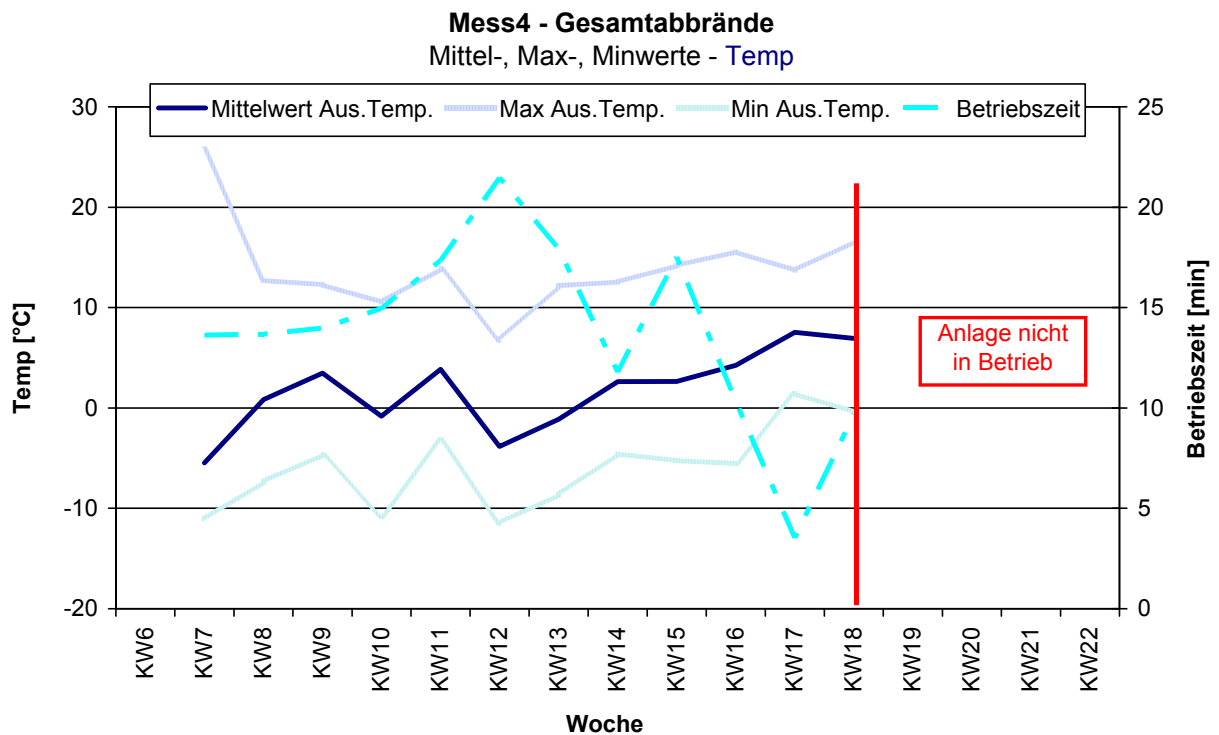
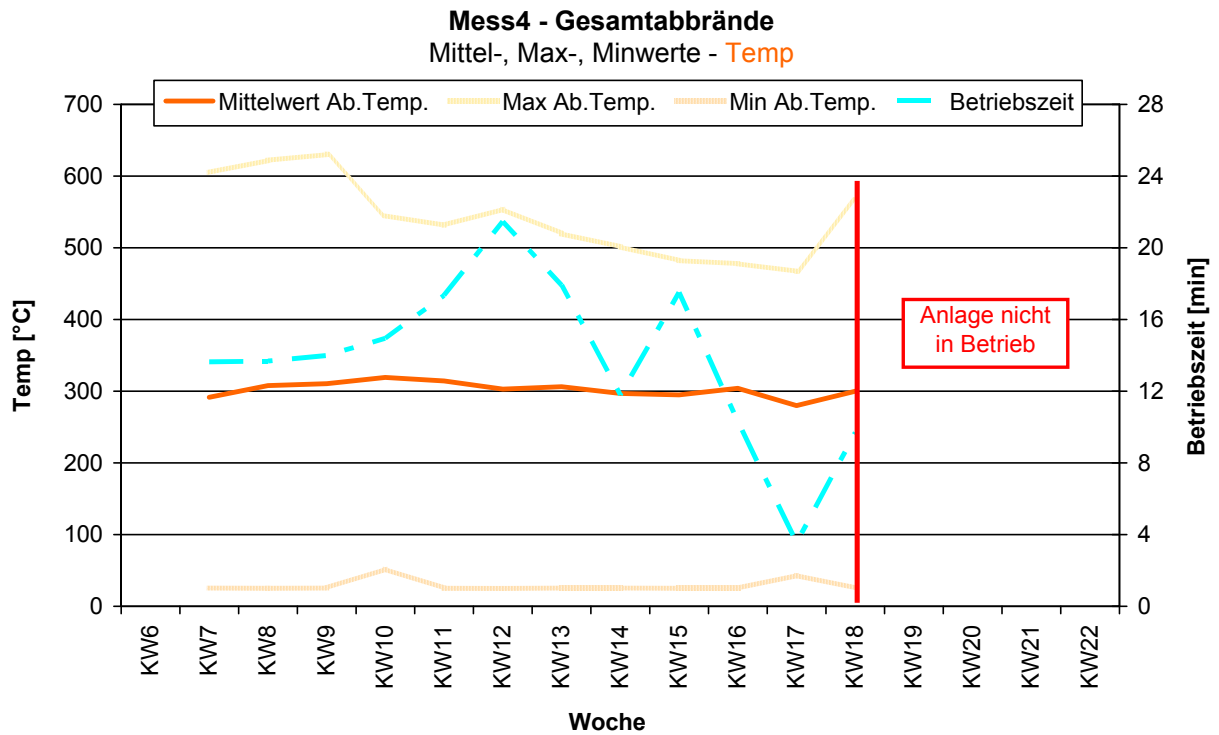


Bild 6-29 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für Abgas- und Außentemperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) – Messbox4

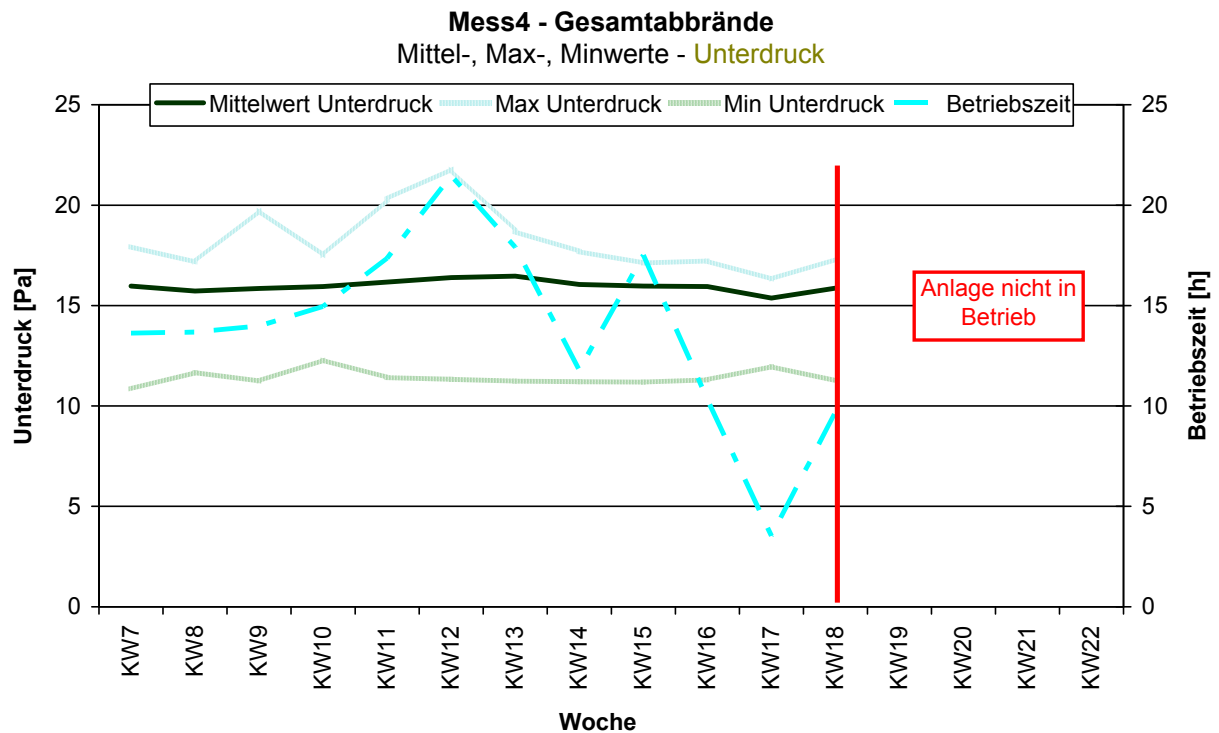


Bild 6-30 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für den Schornsteinzug (Unterdruck) – Messbox4

Die mittlere O_2 -Konzentration für die Gesamtabbrände nehmen während der Messperiode in der Tendenz leicht zu, eine eindeutige Abhängig von der Außentemperatur bzw. der Betriebszeit ist nicht erkennbar.

Die mittleren NO_x -Konzentrationen nehmen während den Betriebswochen leicht ab. Da verschiedene Holzarten (Buchen- und Nadelhölzer) in unterschiedlichen Anteilen verfeuert wurden, könnte hierin die Ursache liegen.

Der mittlere Schornsteinzug bleibt während der Messperiode in etwa konstant. Dies gilt auch für die mittlere Abgastemperatur, die insgesamt recht hoch liegt, wodurch sich auch ein hoher Abgasverlust ergibt. Bei den Messung 1998 wurde eine mittlere Abgastemperatur von rund 260 °C ermittelt und ein mittlerer Abgasverlust von ca. 34 %. Damit erscheinen die mit der Messbox 4 ermittelten Werte etwas zu hoch.

Die CO- und HC-Konzentrationen nehmen im Verlauf der Langzeitmessung zu, auch hier ist kein eindeutiger Zusammenhang zur Betriebszeit gegeben. Bei den CO- und HC-Konzentrationen nehmen vor allem die am Abbrandende gemessenen Konzentrationen zu. Hierbei handelt es sich größtenteils um CO. Dieser starke Anstieg der CO-Konzentrationen im Verlauf der Messperiode ist nicht plausibel. Insgesamt erscheinen auch die mittleren CO-Konzentrationen für diese Feuerung zu hoch.

Messungen mit konventioneller Messtechnik an dieser Feuerung im Jahr 1998 ergaben CO-Konzentrationen im Bereich von 4.000 mg/m^3 (bei 13 Vol% O_2) und VOC-Konzentrationen von etwa 130 mgC/m^3 (bei 13 Vol% O_2). Die Konzentration der VOC machte hierbei einen Anteil

von rund 3,4 % an der Summe der Konzentrationen von CO und VOC aus. Typische Abbrandverläufe aus den Messungen von 1998 sind in **Bild 6-31** dargestellt.

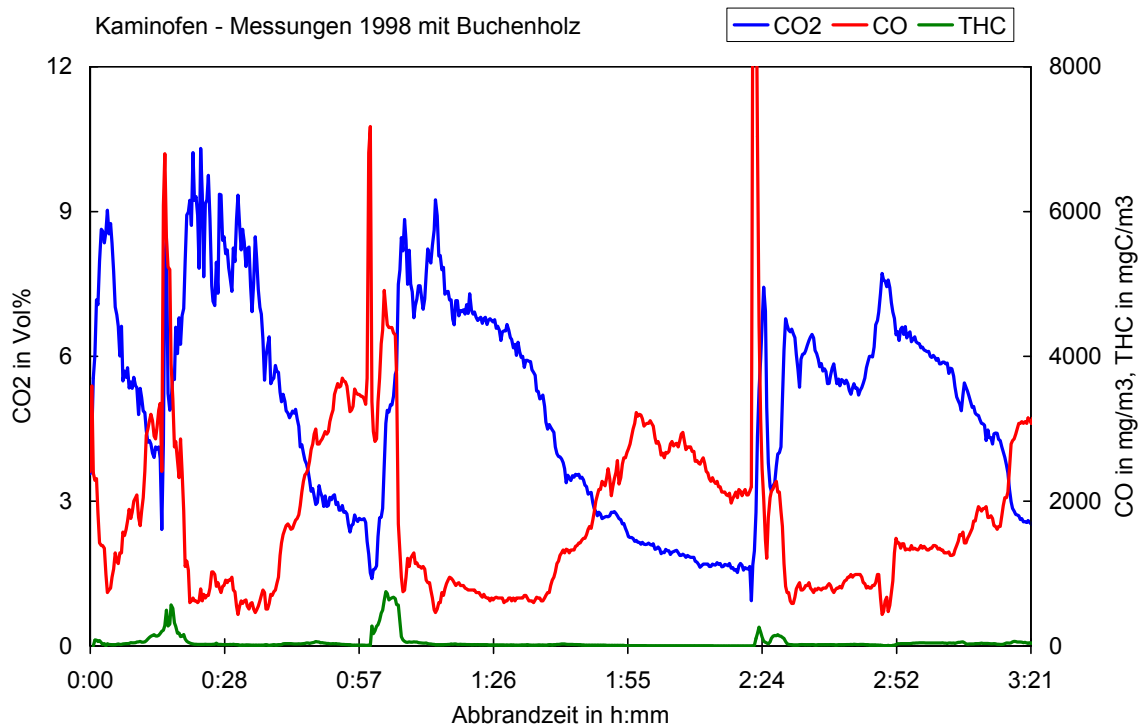


Bild 6-31 Abbrandverläufe mit Buchenscheitholz am Kaminofen – Messungen mit konventioneller Messtechnik im Jahr 1998

In **Tabelle 6.26** sind für den Kaminofen die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Hauptverbrennungsphase aufgeführt. **Tabelle 6.27** enthält für die Messwochen jeweils die mittleren auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen sowie die berechneten mittleren Abgasverluste.

Tabelle 6.26 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Hauptverbrennungsphase beim Kaminofen – Mess4

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2		12,3	11,1	11,6	11,9	11,8	12,0	12,2	12,3	12,7	12,3	12,5	12,1				
Max O2		15,0	13,6	13,9	14,0	13,6	13,8	13,8	14,5	14,1	14,0	14,1	14,2				
Min O2		4,4	2,8	4,2	7,3	7,4	7,8	7,6	7,4	7,8	7,7	10,0	7,4				
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO		4.326	3.186	5.487	5.117	4.940	6.047	7.367	6.613	6.284	7.463	6.815	8.899				
Max CO		11.135	24.033	29.291	23.659	19.580	34.074	42.474	35.689	38.434	63.774	36.611	69.547				
Min CO		8	5	21	312	33	7	1	6	6	70	712	12				
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC		228	168	289	269	260	318	388	348	331	393	359	468				
Max HC		586	1.265	1.542	1.245	1.031	1.793	2.235	1.878	2.023	3.357	1.927	3.660				
Min HC		0	0	1	16	2	0	0	0	0	4	37	1				
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx		132	156	150	144	128	127	125	105	89	106	103	104				
Max NOx		477	324	307	412	378	517	395	369	473	347	312	521				
Min NOx		35	93	85	88	77	78	76	58	52	59	66	58				
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck		16,2	16,3	16,3	16,2	16,3	16,5	16,3	16,2	15,9	16,1	15,5	15,8				
Max Unterdruck		17,9	17,2	19,7	17,4	17,9	17,4	17,5	17,7	16,8	17,2	16,1	17,0				
Min Unterdruck		10,8	11,7	11,2	11,2	11,4	11,3	11,2	11,2	11,2	11,3	11,2	11,3				
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.		-3,8	2,1	5,8	0,6	5,0	-1,2	2,5	5,4	5,4	5,9	9,4	10,4				
Max Aus.Temp.		25,8	12,5	12,6	10,3	13,9	7,4	12,2	12,9	14,2	15,6	14,1	16,6				
Min Aus.Temp.		-10,5	-7,0	-3,2	-9,8	-0,7	-8,8	-8,5	-4,0	-1,5	-3,5	4,1	0,9				
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.		369	422	417	404	406	400	400	389	367	386	355	388				
Max Ab.Temp.		605	622	630	545	531	554	520	501	482	478	467	567				
Min Ab.Temp.		25	25	21	25	25	25	25	25	25	25	25	25				
Betriebszeit																	
Zeit in min		364	210	180	270	274	273	171	231	240	201	41	158				
Zeit in h		6,1	3,5	3,0	4,5	4,6	4,6	2,9	3,9	4,0	3,4	0,7	2,6				

Tabelle 6.27 Mittelwerte der auf 13 Vol% O₂ bezogenen Emissionskonzentrationen (für feuchtes Abgas) und der Abgasverluste der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Hauptverbrennungsphase beim Kaminofen – Mess4

CO in mg/m ³	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert CO		3.971	2.573	4.651	4.478	4.279	5.391	6.720	6.070	6.046	6.838	6.451	7.990				
HC in mg/m³																	
Mittelwert HC		209	135	245	236	225	284	354	319	318	360	340	421				
NO_x in mgNO₂/m³																	
Mittelwert NO_x		121	126	127	126	111	113	114	97	86	97	98	94				
Abgasverlust q_A in %																	
Mittelwert q_A		31,2	32,3	33,2	33,0	32,9	33,2	33,9	33,0	32,3	32,7	30,8	32,4				

In **Bild 6-32** bis **Bild 6-35** sind jeweils die Mittelwerte für die Betriebswochen der Langzeitmessung sowie die minimalen und maximalen Messwerte in den jeweiligen Betriebswochen für die untersuchten Messgrößen für die Hauptverbrennungsphasen dargestellt.

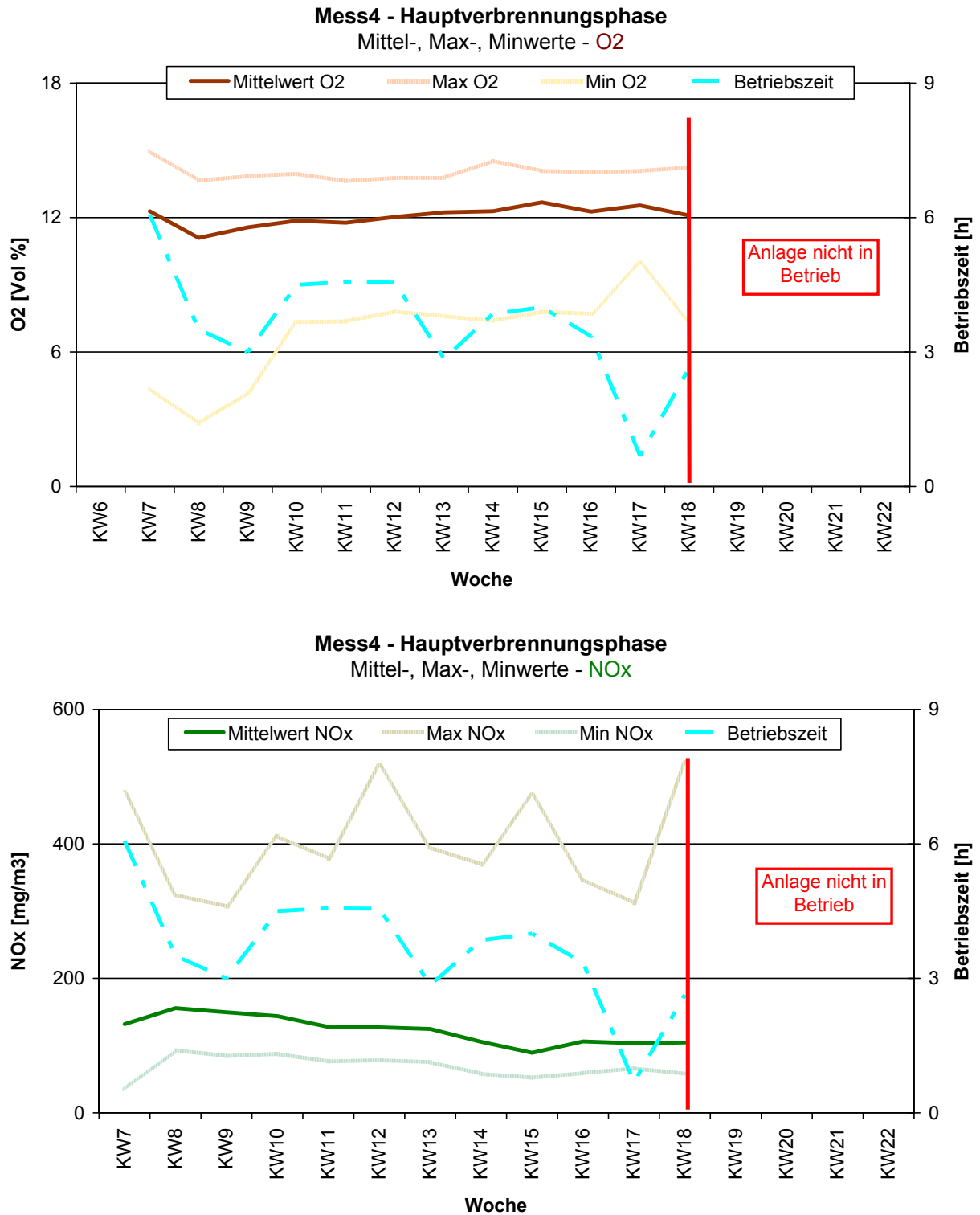


Bild 6-32 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für O₂ und NO_x – Messbox4

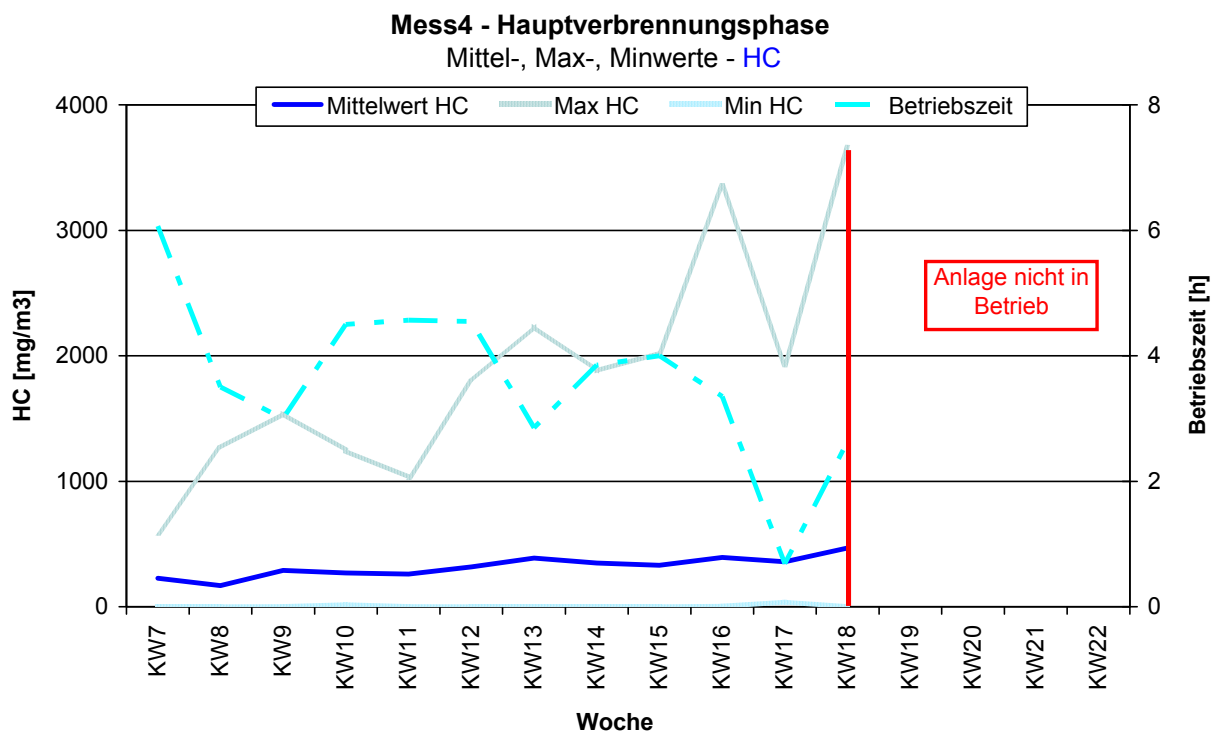
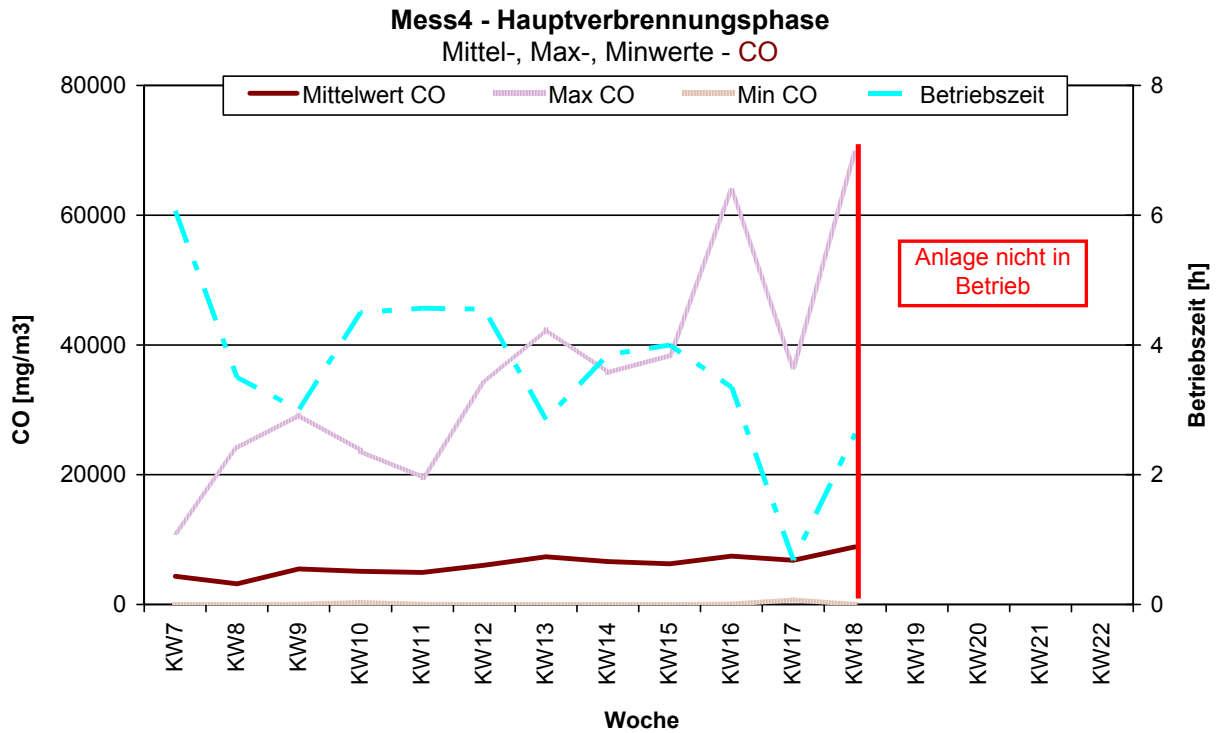


Bild 6-33 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für CO und HC – Messbox4

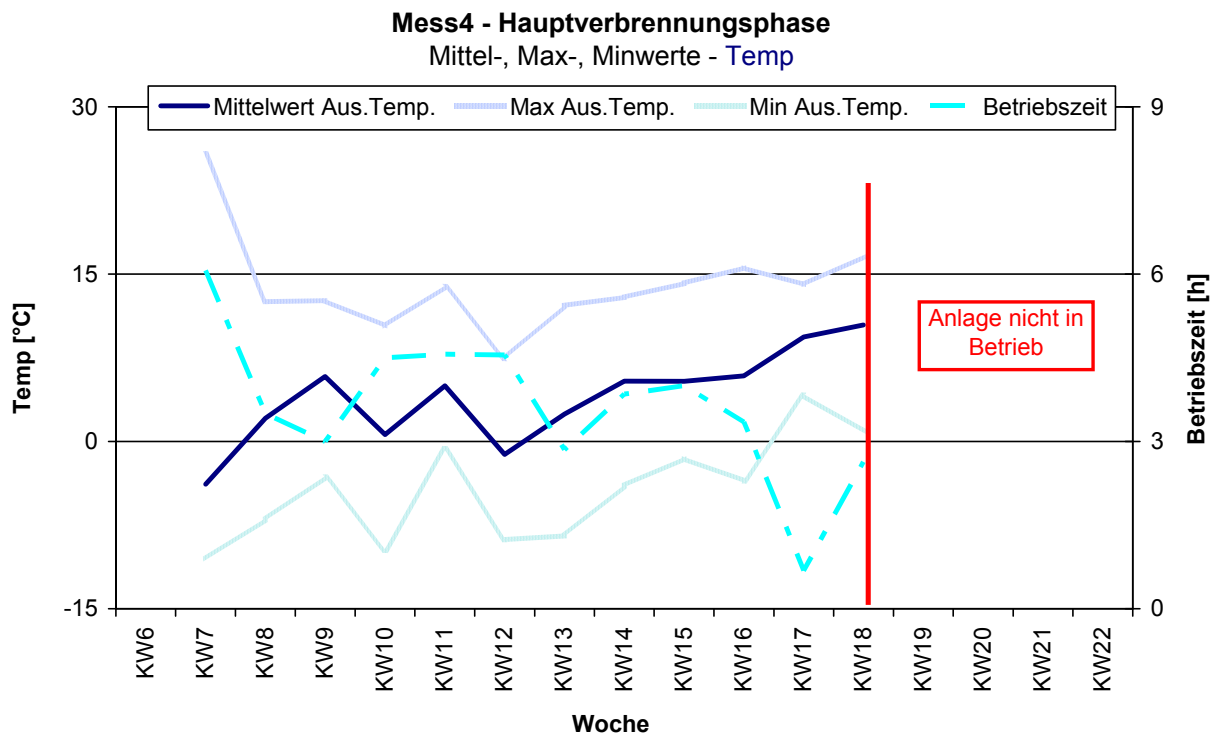
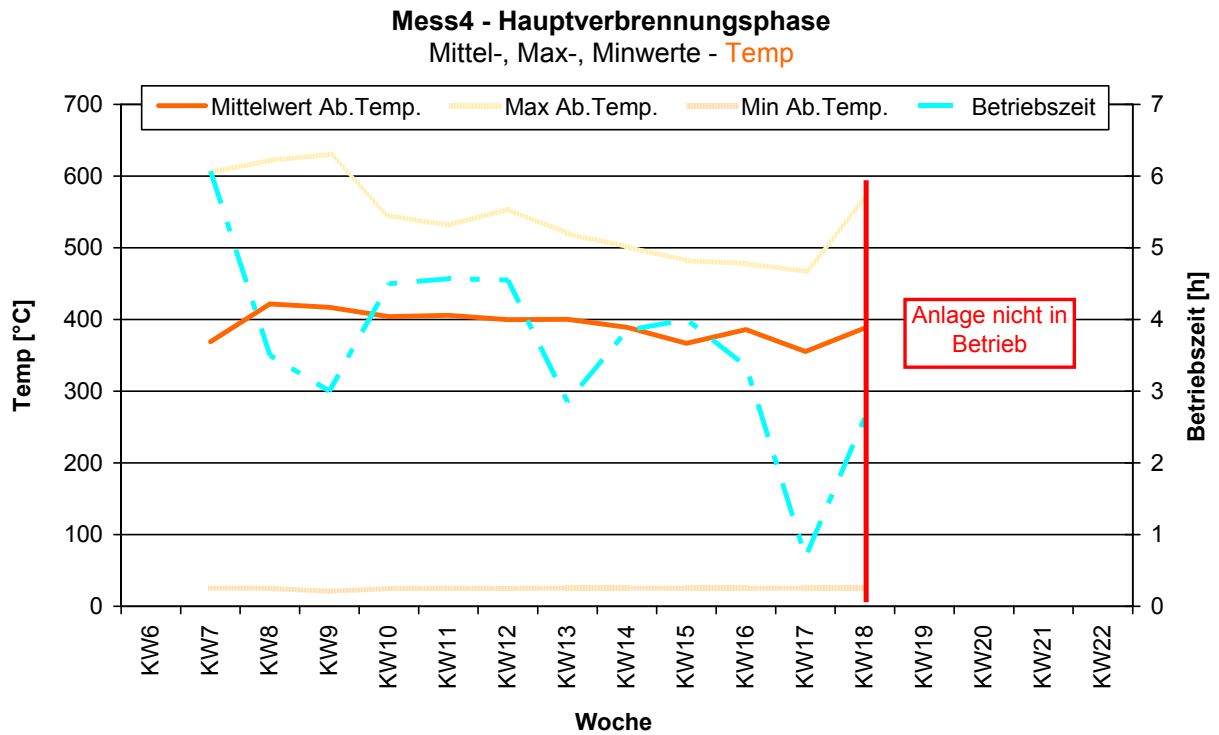


Bild 6-34 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für Abgas- und Außentemperaturen (Aus.Temp.: Außentemperatur; Ab.Temp.: Abgastemperatur) – Messbox4

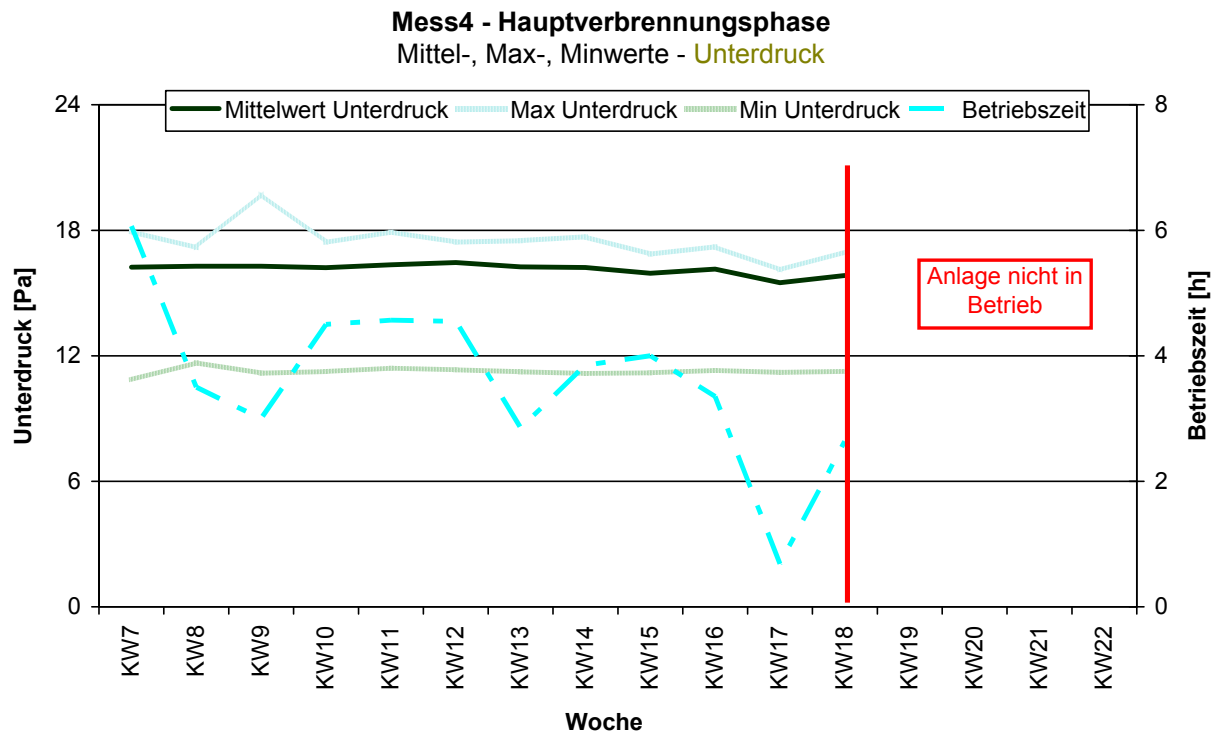


Bild 6-35 Mittelwerte der Betriebswochen sowie minimale und maximale Messwerte beim Kaminofen für den Schornsteinzug (Unterdruck) – Messbox4

In **Tabelle 6.28** sind für den Kaminofen die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Anbrennvorgänge und in **Tabelle 6.29** für die Ausbrandvorgänge aufgeführt. Bei höheren mittleren O_2 -Konzentrationen wurden hohe bis sehr hohe mittlere CO-Konzentrationen gemessen, die während der Betriebszeit deutlich zunehmen.

Tabelle 6.30 enthält für den Kaminofen die Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für den Restglutabbrand.

Tabelle 6.28 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Anbrennvorgänge beim Kaminofen – Mess4

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	17,1	17,3	17,3	17,3	17,3	17,4	17,3	17,2	17,4	17,1	17,2	17,3	17,2				
Max O2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0				
Min O2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	15,0				
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	6.203	8.758	9.271	12.532	14.692	14.505	12.191	15.490	16.408	21.314	16.064	21.145					
Max CO	13.761	18.288	21.854	29.586	34.750	38.349	41.564	48.516	51.608	57.871	51.952	83.650					
Min CO	341	351	347	555	480	596	544	167	165	1.426	1.355	888					
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	326	461	488	660	773	763	642	815	864	1.122	845	1.113					
Max HC	724	963	1.150	1.557	1.829	2.018	2.188	2.553	2.716	3.046	2.734	4.403					
Min HC	18	18	18	29	25	31	29	9	9	75	71	47					
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	43	52	54	57	35	45	47	33	30	35	35	37					
Max NOx	155	118	175	329	117	107	98	82	80	80	74	83					
Min NOx	10	10	20	19	7	11	14	7	10	13	4	12					
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	15,8	15,5	15,6	15,7	16,0	16,4	16,5	15,9	16,0	15,8	15,3	15,9					
Max Unterdruck	17,2	16,9	18,3	17,5	18,7	21,8	18,5	16,9	17,1	17,1	16,3	17,3					
Min Unterdruck	10,9	12,1	12,3	12,3	11,6	12,7	12,6	12,8	11,6	12,3	12,0	12,3					
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	-6,7	0,4	2,7	-1,4	3,3	-5,1	-2,5	1,2	1,5	3,2	7,1	5,5					
Max Aus.Temp.	24,8	12,7	12,3	10,5	13,2	6,8	12,1	12,5	13,8	15,4	13,7	16,5					
Min Aus.Temp.	-11,1	-7,3	-4,7	-10,8	-3,2	-11,5	-8,6	-4,6	-5,3	-5,5	1,4	-0,4					
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	230	252	262	269	265	258	273	247	263	254	254	261					
Max Ab.Temp.	374	396	391	381	395	388	404	378	391	397	370	389					
Min Ab.Temp.	60	41	74	52	34	60	47	51	30	40	43	44					
Betriebszeit																	
Zeit in min	454	496	555	535	636	830	729	453	685	369	159	383					
Zeit in h	7,6	8,3	9,3	8,9	10,6	13,8	12,2	7,6	11,4	6,2	2,7	6,4					

Tabelle 6.29 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Ausbrandvorgänge (Holzkohleabbrand) beim Kaminofen – Mess4

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	17,1	17,3	17,3	17,3	17,4	17,3	17,2	17,4	17,1	17,2	17,3	17,2					
Max O2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0				
Min O2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	15,0				
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	6.203	8.758	9.271	12.532	14.692	14.505	12.191	15.490	16.408	21.314	16.064	21.145					
Max CO	13.761	18.288	21.854	29.586	34.750	38.349	41.564	48.516	51.608	57.871	51.952	83.650					
Min CO	341	351	347	555	480	596	544	167	165	1.426	1.355	888					
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	326	461	488	660	773	763	642	815	864	1.122	845	1.113					
Max HC	724	963	1.150	1.557	1.829	2.018	2.188	2.553	2.716	3.046	2.734	4.403					
Min HC	18	18	18	29	25	31	29	9	9	75	71	47					
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	43	52	54	57	35	45	47	33	30	35	35	37					
Max NOx	155	118	175	329	117	107	98	82	80	80	74	83					
Min NOx	10	10	20	19	7	11	14	7	10	13	4	12					
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	15,8	15,5	15,6	15,7	16,0	16,4	16,5	15,9	16,0	15,8	15,3	15,9					
Max Unterdruck	17,2	16,9	18,3	17,5	18,7	21,8	18,5	16,9	17,1	17,1	16,3	17,3					
Min Unterdruck	10,9	12,1	12,3	12,3	11,6	12,7	12,6	12,8	11,6	12,3	12,0	12,3					
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	-6,7	0,4	2,7	-1,4	3,3	-5,1	-2,5	1,2	1,5	3,2	7,1	5,5					
Max Aus.Temp.	24,8	12,7	12,3	10,5	13,2	6,8	12,1	12,5	13,8	15,4	13,7	16,5					
Min Aus.Temp.	-11,1	-7,3	-4,7	-10,8	-3,2	-11,5	-8,6	-4,6	-5,3	-5,5	1,4	-0,4					
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	230	252	262	269	265	258	273	247	263	254	254	261					
Max Ab.Temp.	374	396	391	381	395	388	404	378	391	397	370	389					
Min Ab.Temp.	60	41	74	52	34	60	47	51	30	40	43	44					
Betriebszeit																	
Zeit in min	454	496	555	535	636	830	729	453	685	369	159	383					
Zeit in h	7,6	8,3	9,3	8,9	10,6	13,8	12,2	7,6	11,4	6,2	2,7	6,4					

Tabelle 6.30 Mittelwerte der Messwochen KW 7 bis KW 18 für die Restglutabbrände beim Kaminofen – Mess4

O2 in Vol %	KW6	KW7	KW8	KW9	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22
Mittelwert O2	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5				
Max O2	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0				
Min O2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0				
CO in mg/m3																	
Mittelwert CO	1.928	2.774	6.079	7.846	5.997	4.504	5.495	2.788	4.808	4.375	6.551	5.073					
Max CO	9.575	8.968	16.874	25.931	21.871	30.569	25.840	19.812	23.071	26.282	37.088	40.026					
Min CO	518	468	200	262	745	456	656	616	623	1.207	354	863					
HC in mg/m3																	
Mittelwert HC	101	146	320	413	316	237	289	147	253	230	345	267					
Max HC	504	472	888	1.365	1.151	1.609	1.360	1.043	1.214	1.383	1.952	2.107					
Min HC	27	25	11	14	39	24	35	32	33	64	19	45					
NOx in mgNO2/m3																	
Mittelwert NOx	14	18	22	27	9	16	18	11	9	16	11	14					
Max NOx	84	93	67	93	31	45	75	65	18	86	84	69					
Min NOx	6	5	10	13	0	6	7	4	4	9	2	6					
Unterdruck in Pa																	
Mittelwert Unterdruck	15,1	15,2	15,2	15,3	15,5	15,8	16,0	15,3	15,5	15,3	14,8	15,4					
Max Unterdruck	17,0	16,1	17,1	17,7	19,7	19,5	19,7	16,2	16,5	16,4	15,9	16,7					
Min Unterdruck	10,8	12,0	12,1	12,0	13,2	12,2	12,2	11,9	12,8	11,9	12,1	12,0					
Aussentemp in °C																	
Mittelwert Aus.Temp.	-8,8	-1,7	1,5	-2,3	2,0	-7,2	-3,4	-0,2	-0,3	2,3	4,6	3,3					
Max Aus.Temp.	2,1	12,5	12,1	10,6	11,1	4,5	12,1	10,7	6,6	15,5	12,8	16,4					
Min Aus.Temp.	-11,1	-5,9	-5,1	-11,2	-3,4	-12,3	-8,7	-3,8	-6,1	-6,5	1,1	-0,6					
Abgastemp in °C																	
Mittelwert Ab.Temp.	141	169	183	192	178	161	175	150	178	180	152	171					
Max Ab.Temp.	214	238	246	262	226	239	249	222	234	232	216	231					
Min Ab.Temp.	50	46	43	44	40	46	49	30	52	39	47	32					
Betriebszeit																	
Zeit in min	131	170	267	237	199	446	455	223	206	125	101	104					
Zeit in h	2,2	2,8	4,5	4,0	3,3	7,4	7,6	3,7	3,4	2,1	1,7	1,7					

7 Messbox 2 - Zusätzliche Auswertungen

Die gewerbliche Holzfeuerung verursacht erhebliche Nachbarschaftsbeschwerden durch belästigende Staub- und Rußemissionen, siehe **Bild 7-1**. Diese Beschwerden waren Anlass für die Auswahl der Feuerungsanlage im Feldmessprogramm. Durch den Einsatz der Messbox sollten die Betriebszustände mit erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung ermittelt werden. Diese Informationen sollten zur Lösung der Nachbarschaftsbeschwerden beitragen. Als mögliche Ursache der erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung kommen vor allem in Frage:

- Verwendung ungeeigneter Brennstoffe
- eine Einstellung der Kesselregelung, die schlecht an die eingesetzten Brennstoffe und die Betriebsweise des Kessels angepasst ist
- Bedingungsfehler
- Wartungs- oder technische Mängel
- eine mangelhafte Kesselkonstruktion.



Aufnahme vom 4.3.08 – 7:09 Uhr



Aufnahme vom 10.3.08 – 7:01 Uhr

Bild 7-1 Staub- und Rußemissionen der gewerblichen Holzfeuerung (Quelle: Beschwerdeführer)

Bei der Feuerung handelt es sich um eine Kombination aus Unterschub- und Stückholzfeuerung älterer Bauart. Die Verbrennungsluftzufuhr erfolgt sowohl mit Gebläseunterstützung (in den Unterschubteil) als auch über Drehschieber in einer seitlichen Ofentür und über die Fülltür für stückigen Brennstoff. Über die Drehschieber strömt Verbrennungsluft entsprechend deren Stellung und dem im Feuerraum herrschenden Unterdruck ein. Diese Drehschieber müssen vom Betreiber eingestellt werden. Der Kessel wurde nachträglich mit einer Lambdasonde ausgerüstet.

Über die genaue Funktionsweise der Verbrennungs- und Kesselregelung, die Vorgaben des Kesselherstellers zur Einstellung der Drehschieber und über die Luftführung und Verteilung im Feuerraum liegen keine Informationen vor.

Insgesamt ist diese alte Kesselkonstruktion in der Kombination von Unterschubfeuerung und Stückholzfeuerung kritisch zu sehen, da derartige Kombinationen nur mit Kompromissen zu realisieren sind, die letztlich eine optimale Anpassung an eine der beiden Brennstoffaufbereitungsformen verhindern. Außerdem ist die Stückholzfeuerung als Durchbrandfeuerung ausgebildet. Deren Emissionen sind somit stark von der aufgegebenen Holzmenge, der Stückgröße und der Brennstofffeuchte abhängig. Da bei einer Durchbrandfeuerung die gesamte Holzmenge feuer fängt, werden bei großen Aufgabemengen, der Aufgabe von sehr trockenem Holz (z.B. Spanplattenresten) oder relativ feinstückigem Holz (z.B. Bretterreste) sehr hohe Feuerungswärmeleistungen erreicht. Dies kann zu sehr hohen Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung führen, da eine entsprechende Zuführung von Sekundärluft nicht mehr erreicht werden kann und somit ausgeprägte lokale oder auch grundsätzliche Luftmangelsituationen entstehen. Außerdem sind die Reaktionszonen oft nicht für diese Feuerungswärmeleistungen ausgelegt, somit fehlt auch noch die Ausbrandstrecke.

Stückholz wird vom Betreiber der Anlage bei erhöhtem Energiebedarf (z.B. in den Morgenstunden) oder bei knappen Vorräten an Spänen zugefeuert, wobei der Entsorgungsaspekt für stückige Resthölzer und Verpackungsreste sicher auch eine Rolle spielt.

Im mechanisch beschickten Unterschubteil des Kessels werden Restholzspäne aus den Absaugungen der Holzbearbeitungsmaschinen verfeuert. Bei den Ortsterminen waren als stückige Brennstoffe meist Verarbeitungsreste (zersägte Spanplatten), holzartige Verpackungsmaterialien (z.B. Holzpaletten) und naturbelassene Holzscheite für die Verbrennung vorbereitet. Nach 1. BImSchV (2001) wären diese Brennstoffe prinzipiell für die Verbrennung in gewerblichen Anlagen zulässig. Vor allem aber die Verarbeitungsreste (trockener Brennstoff) und die Verpackungsreste (relativ feinstückiger Brennstoff mit großer Oberfläche) könnten bei höheren Aufgabemengen zu sehr hohen Feuerungswärmeleistungen führen.

Inwieweit die Einstellung der Kesselregelung oder Bedingungsfehler mit für die hohen Staub- und Rußemissionen verantwortlich sind, kann hier nicht beurteilt werden, da keine entsprechenden Informationen vorliegen. Bei den Vorortterminen entstand nicht der Eindruck, dass vorsätzliche oder nachlässige Bedingungsfehler des Betreibers vorliegen.

Der Wartungszustand des Heizkessels war, soweit sich dies bei der in Betrieb befindlichen Anlage beurteilen lässt, ohne Auffälligkeiten. Technische Mängel im Bereich der Unterschubfeuerung waren dem Betreiber bekannt, dieses teilweise defekte Bauteil sollte am Ende der Heizperiode ausgetauscht werden, was auch durchgeführt wurde.

In **Bild 7-2** sind die Konzentrationsverläufe für O_2 , CO+HC (dargestellt als CO-Äquivalente) und NO_x für die beiden in Bild 7-1 dokumentierten Tage mit erhöhten Staub- und Rußemissionen dargestellt. In beiden Fällen wurden im Beobachtungszeitraum erhöhte CO+HC-Emissionen gemessen. Vor den CO+HC-Spitzenwerten war beim Heizkessel nur die Unterschubfeuerung in Betrieb. Hierbei erfolgte ein regelmäßiger Wechsel von Last- und Gluterhaltebetrieb, wobei sich die CO+HC-Emissionen in einem engen Bereich bewegten. In Folge einer Stückholzaufgabe, parallel zum Unterschubbetrieb, gegen 7:00 Uhr nahm der Luftüberschuss deutlich ab und dementsprechend stiegen die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung stark an.

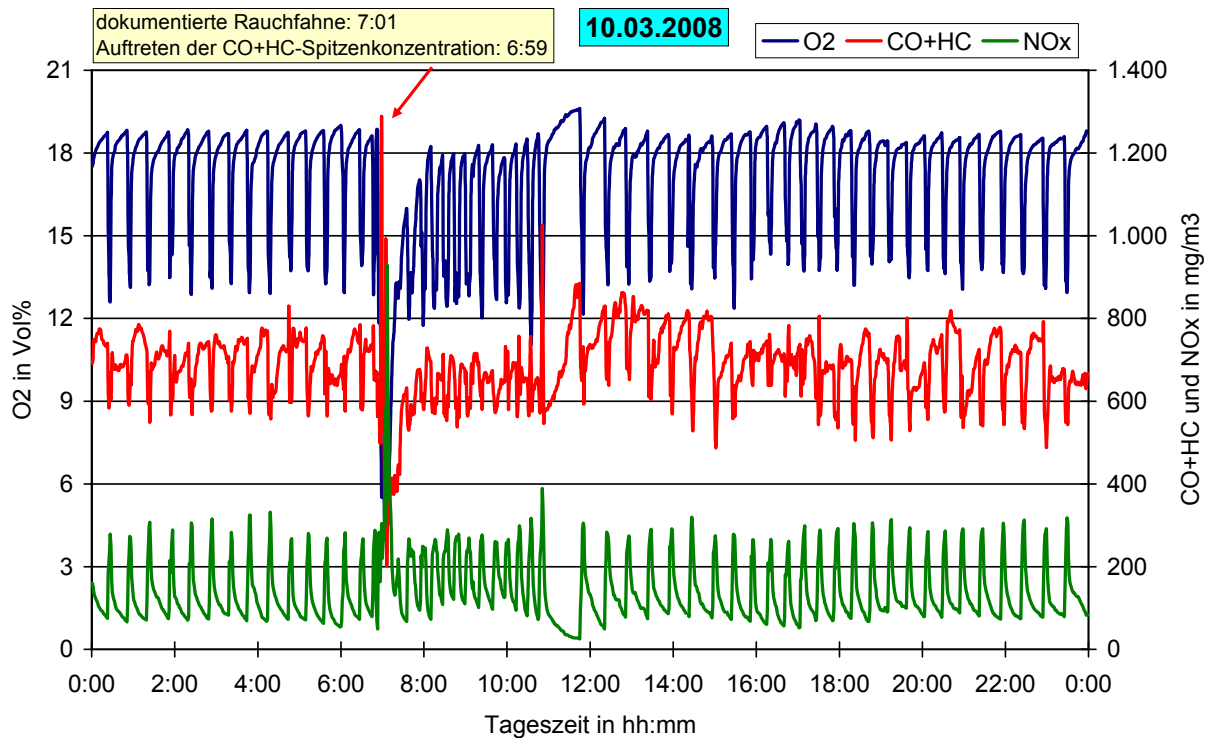
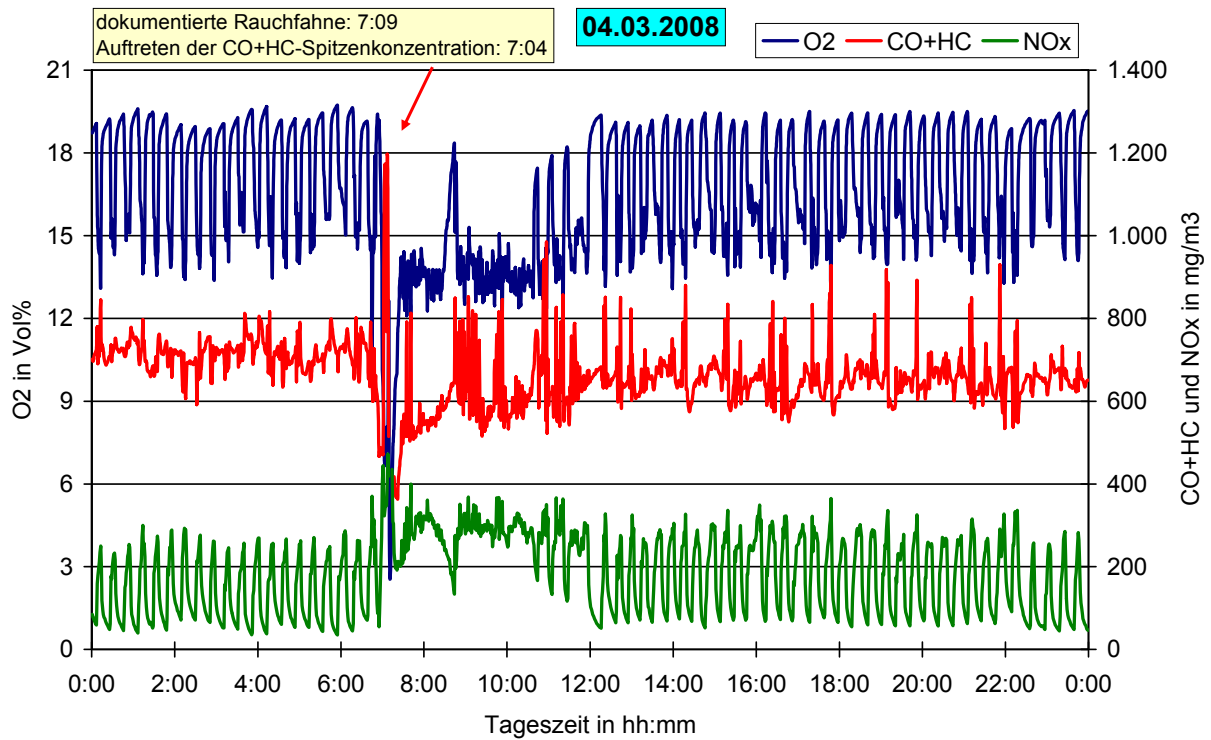


Bild 7-2 Konzentrationsverläufe für O₂, CO+HC (dargestellt als CO-Äquivalente) und NO_x bei erhöhten Staub- und Rußemissionen

Nach dem Abbrand des Stückholzes (am 4.3.08 gegen 12:00 Uhr – hier wurde vermutlich zumindest noch einmal Holz nachgelegt; am 10.3.08 gegen 8:00 Uhr) ist wieder der typische Unterschubbetrieb mit einem permanenten Wechsel zwischen Last- und Gluthaltebetrieb ersichtlich, wobei vor allem am 4.3.08 deutliche CO+HC-Konzentrationsspitzen auftraten.

Der Verlauf der NO_x-Konzentrationen an den beiden Tagen lässt vermuten, dass am 4.3.08 auch stückige Resthölzer (wahrscheinlich Spanplatten) und am 10.3.08 nur naturbelassenes Stückholz aufgegeben wurde.

Durch die Stückholzaufgabe ergibt sich eine wesentlich größere Feuerungswärmeleistung, wodurch sich auch die Abgastemperatur deutlich erhöht. So lag z.B. am 4.3.08 die Abgastemperatur in der Stunde vor der Stückholzaufgabe (von 5:53 bis 6:53 Uhr) im Mittel bei 176 °C. In der Stunde nach der Stückholzaufgabe (von 6:54 bis 7:54 Uhr) wurde eine mittlere Abgastemperatur von 280 °C gemessen.

Damit zeigen die Messungen ziemlich deutlich, dass die wesentlichsten Belästigungen durch den Stückholzbetrieb, der parallel zum Unterschubbetrieb erfolgt, auftreten. Im reinen Unterschubbetrieb, dies zeigen auch die Ergebnisse der Langzeitmessungen, liegen die Mittelwerte für die CO+HC-Konzentrationen im Volllast- und Teillastbetrieb deutlich niedriger, hier sind keine so starken Staub- und Rußemissionen wie bei Stückholzbetrieb zu erwarten.

Neben den hohen Emissionen des Heizkessels beim Stückholzbetrieb sprechen auch die niedrigen feuerungstechnischen Wirkungsgrade beim Volllast- und Teillastbetrieb, diese liegen zwischen 75 und 80 %, für eine Sanierung der Heizanlage. Zu diesen Verlusten kommen noch erhöhte Strahlungsverluste des schlecht wärmegeprägten Heizkessels, so dass der Kesselwirkungsgrad noch deutlich niedriger liegen dürfte. Mit der Sanierung der Heizanlage sollte auch die Möglichkeit genutzt werden, den Heizenergiebedarf insgesamt im Rahmen eines energetischen Gesamtkonzeptes für die Betriebsgebäude zu reduzieren.

Sollte sich hierbei herausstellen, dass der Anfall von Restholzspänen für die Wärmeversorgung der Gebäude auch nach Sanierungsmaßnahmen nicht ausreicht und weiterhin mit stückigen Brennstoffen zugefeuert werden muss, sollten am besten zwei Heizkessel installiert werden. Ein Heizkessel für die Verfeuerung der anfallenden Restholzspäne und ein moderner Stückholzkessel mit Lambda-Regelung und unterem oder seitlichem Abbrand für stückiges Holz. Außerdem wäre zu prüfen, inwieweit durch den Einsatz von Pufferspeichern die relativ kurzzeitigen Verbrauchsspitzen vor Arbeitsbeginn abgefangen werden könnten, so dass die installierte Wärmeleistung der Holzessel nicht nach den Spitzenverbräuchen ausgelegt werden müsste. Zur Versorgungssicherheit könnte u.U. noch ein Gas-Spitzenlastkessel installiert werden.

8 Zusammengefasste Ergebnisse

Für die vier untersuchten Feuerungsanlagen sind die Mittelwerte für die gesamte Langzeitmessung für die Konzentrationen von CO+HC (als CO-Äquivalente), NO_x und O₂ sowie die Mittelwerte für die Abgastemperatur, der wöchentlichen Betriebszeit und der Abgasverluste in **Bild 8-1** bis **Bild 8-4** dargestellt. Die CO+HC- sowie NO_x-Konzentrationen gelten für feuchtes Abgas und sind auf 13 Vol% O₂ bezogen. Hierbei wird unterschieden nach Volllast und Teillastbetrieb für die Pelletfeuerung und die gewerbliche Holzfeuerung (Kombikessel aus Unterschub- und Stückholzfeuerung) sowie beim chargenweise beschickten Stückholzkessel und Kaminofen nach Gesamtabbrand und Hauptverbrennungsphase.

Der moderne Pelletkessel zeigt für beide Betriebsbereiche vergleichsweise niedrige CO+HC-Konzentrationen, wobei diese erwartungsgemäß für den Teillastbetrieb zunehmen. Die mittleren NO_x-Konzentrationen für die gesamte Langzeitmessung sind nur wenig vom Lastzustand abhängig und nehmen bei Teillast leicht ab. Die Abgastemperaturen sind ebenfalls nur wenig vom Lastzustand abhängig und liegen beim Volllastbetrieb etwa höher wie bei Teillast. Insgesamt liegen die Abgastemperaturen sehr niedrig, da sich die Messstelle hinter einem Multizyklon befand, der direkt am Kesselausgang installiert ist. Die Abgastemperatur beim Voll- und Teillastbetrieb direkt am Kesselausgang lag ungefähr 10 bis 15 °C höher als nach Multizyklon. Dies wurde bei der Berechnung der Abgasverluste berücksichtigt. Zusammen mit den niedrigen Sauerstoffkonzentrationen in den beiden Betriebsphasen ergeben sich beim Pelletkessel niedrige Abgasverluste (< 10 %), wobei sich Voll- und Teillastbetrieb etwas unterscheiden. Die durchschnittlichen wöchentlichen Betriebszeiten für die beiden Lastbereiche unterscheiden sich deutlich. Im Teillastbetrieb läuft die Anlage im Mittel über den Messzeitraum etwa doppelt so lange wie im Volllastbetrieb.

Im Vergleich zur Pelletfeuerung lagen die CO+HC-Konzentrationen beim Kombikessel für gewerbliche Holzreste älterer Bauart insgesamt deutlich höher und nahmen auch im Teillastbetrieb stärker zu. Bedingt durch die höheren Stickstoffgehalte der Holzwerkstoffreste (z.B. Spanplatten) liegen auch die NO_x-Konzentrationen deutlich höher als bei den Pellets. Voll- und Teillastbetrieb unterscheiden sich bei der gewerblichen Holzfeuerung stärker, beim Teillastbetrieb nehmen die NO_x-Konzentrationen zu. Die Abgastemperatur ist merklich vom Lastzustand abhängig und liegt bei Volllast bei über 250 °C. In Verbindung mit den vergleichsweise hohen Sauerstoffkonzentrationen bei Voll- und Teillast sind auch die mittleren Abgasverluste hoch. Beim Teillastbetrieb liegen diese im Mittel etwas über 27 %. Die Feuerungsanlage ist, wenn der mittlere Wärmebedarf herangezogen wird, überdimensioniert, was sich an den geringen mittleren wöchentlichen Betriebszeiten zeigt.

Die Ergebnisse für den Pelletkessel und die gewerbliche Holzfeuerungen sind insgesamt plausibel und liegen im Bereich vergleichbarer Feuerungsanlagen.

Beim Stückholzkessel einfacher Bauart wurden für den Gesamtabbrand und für die Hauptverbrennungsphase sehr hohe Konzentrationen von CO+HC ermittelt. Erwartungsgemäß liegen hier die CO+HC-Konzentrationen der Hauptverbrennungsphase niedriger als beim Gesamtabbrand, da in der Ausbrandphase beim Holzkohleabbrand die CO-Konzentrationen in der Regel nochmals stark ansteigen. Die Ausbrandphase ist Bestandteil des Gesamtabbrandes.

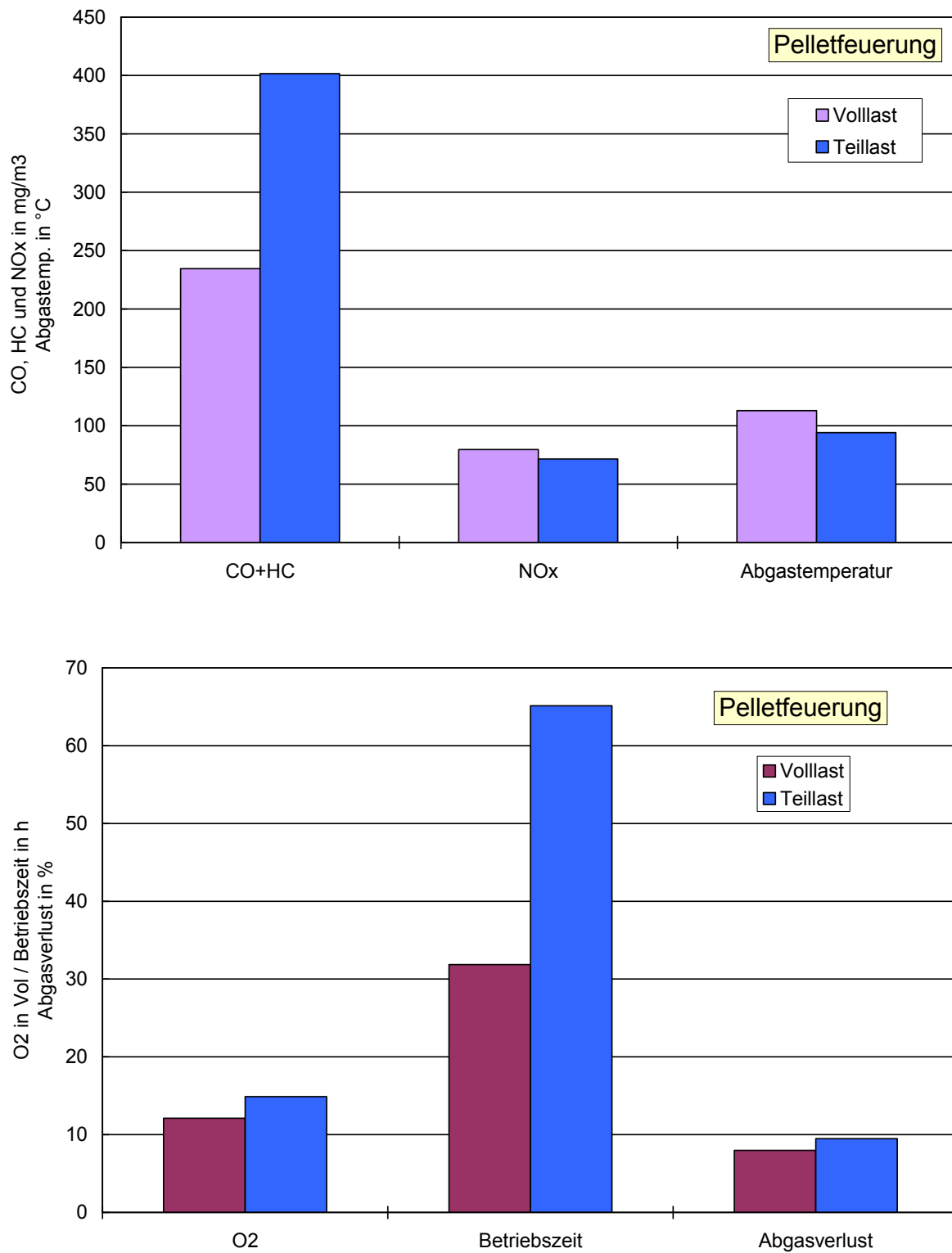


Bild 8-1 Mittelwerte über gesamte Langzeitmessung für CO+HC (als CO-Äquivalente), NO_x und Abgastemperatur (oben) sowie O₂, wöchentliche Betriebszeit und Abgasverlust (unten) für die Pelletfeuerung (Gaskonzentrationen im feuchten Abgas, CO+HC sowie NO_x sind auf 13 Vol% O₂ bezogen)

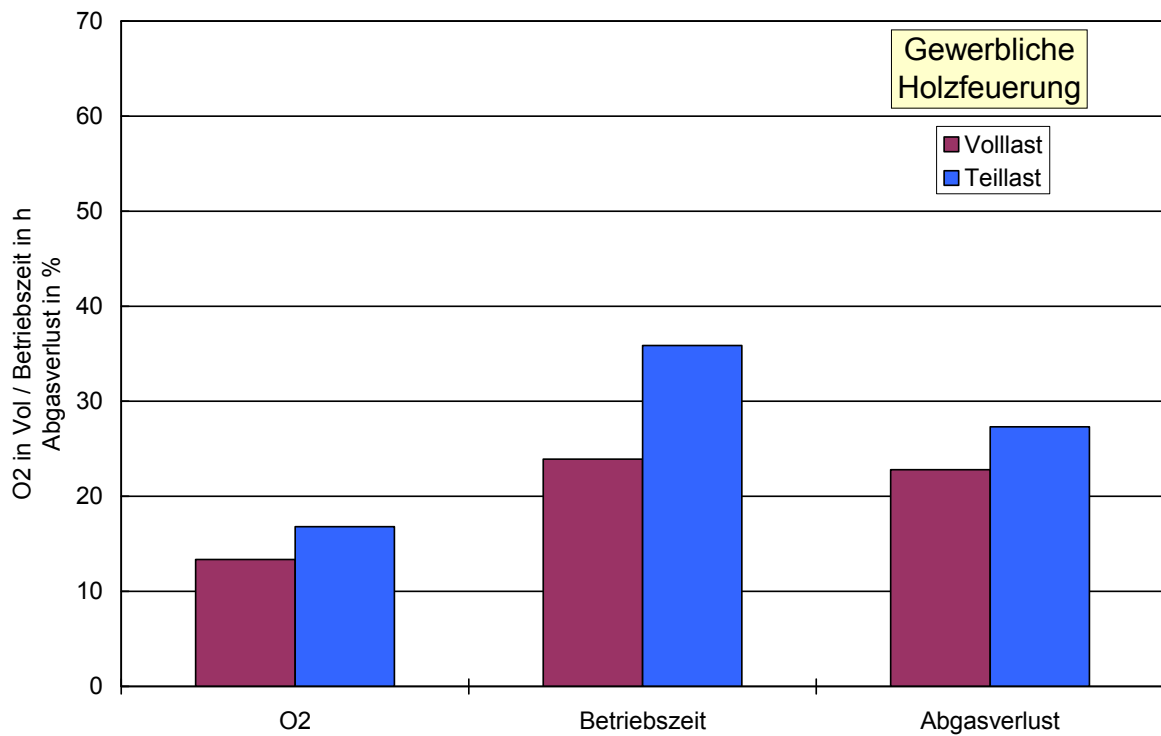
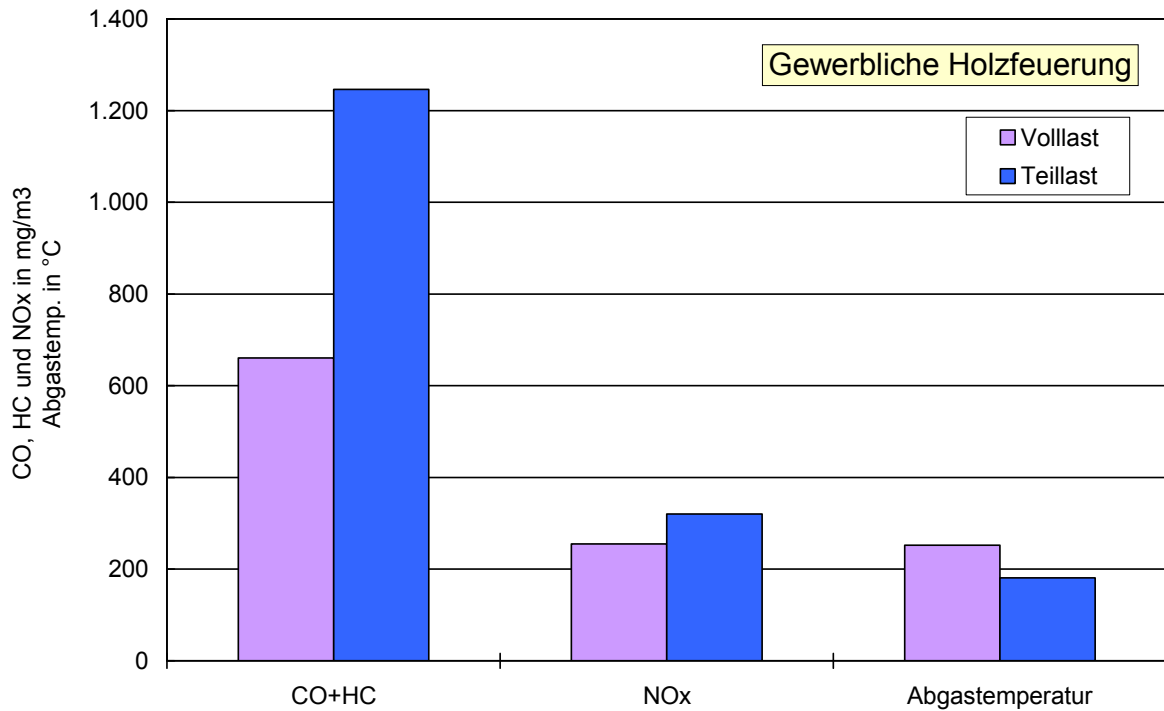


Bild 8-2 Mittelwerte über gesamte Langzeitmessung für CO+HC (als CO-Äquivalente), NO_x und Abgastemperatur (oben) sowie O₂, wöchentliche Betriebszeit und Abgasverlust (unten) für die gewerbliche Holzfeuerung (Kombikessel - Gaskonzentrationen im feuchten Abgas, CO+HC sowie NO_x sind auf 13 Vol% O₂ bezogen)

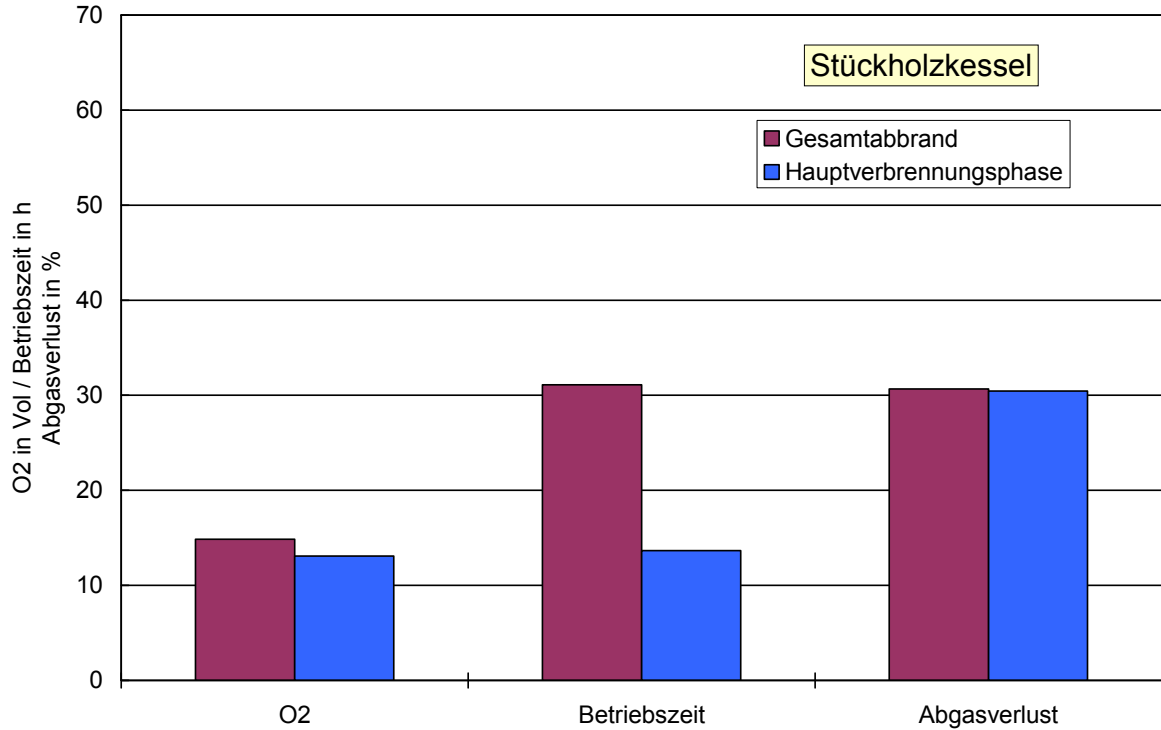
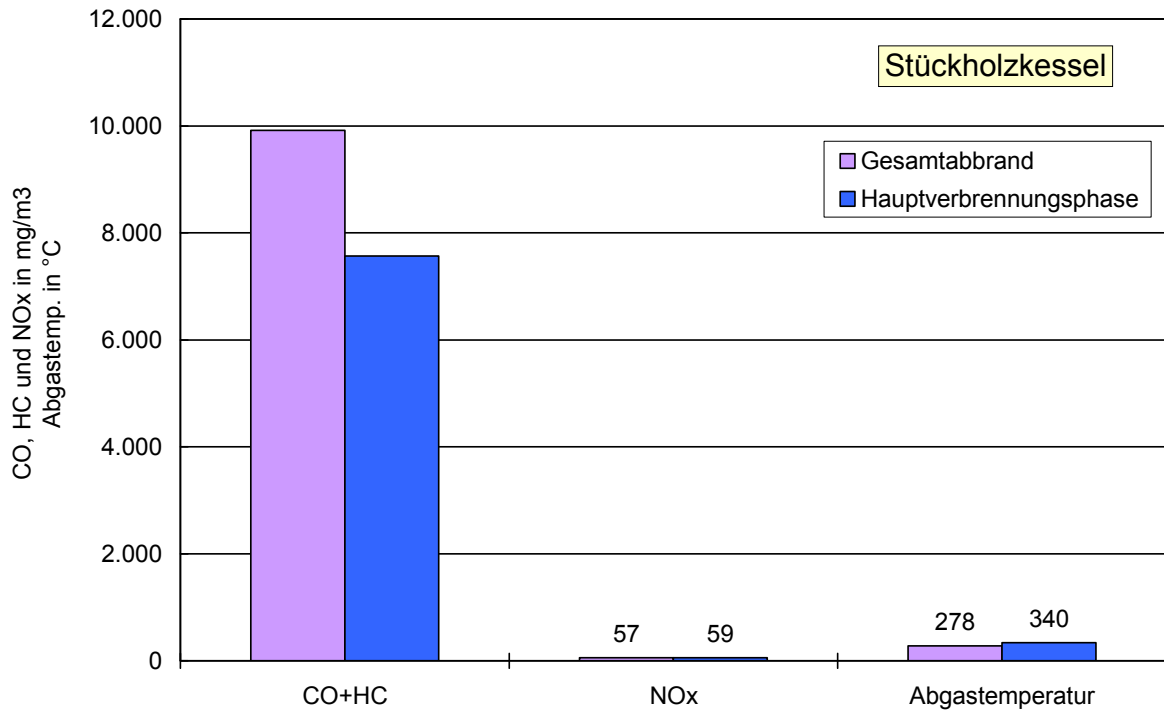


Bild 8-3 Mittelwerte über gesamte Langzeitmessung für CO+HC (als CO-Äquivalente), NO_x und Abgastemperatur (oben) sowie O₂, wöchentliche Betriebszeit und Abgasverlust (unten) für den Stückholzkessel (Gaskonzentrationen im feuchten Abgas, CO+HC sowie NO_x sind auf 13 Vol% O₂ bezogen)

Die NO_x -Konzentrationen liegen für Stückholzkessel vergleichsweise niedrig, was eine Folge der hohen CO-Konzentrationen bei den Abbränden sein kann. Aufgrund einer Sondenstörung liegen beim Stückholzkessel für NO_x nur zu Beginn der Langzeitmessung zuverlässige Messwerte vor.

Die sehr hohe Abgastemperaturen, in der Hauptverbrennungsphase werden beim Stückholzkessel im Mittel 340 °C erreicht, in Verbindung mit den höheren mittleren Sauerstoffkonzentrationen des Gesamtabbrandes und während der Hauptverbrennungsphase, liegen die Abgasverluste in beiden Fällen bei etwas über 30 %.

Im Mittel über die gesamte Messzeit liegt die durchschnittliche wöchentliche Betriebszeit des Kessels bei rund 31 h (Gesamtabbrand), die Bandbreite bewegt sich zwischen rund 4 h (Ende der Heizperiode, im wesentliche nur noch Warmwassererzeugung) und über 57 h (intensiver Heizbetrieb und Warmwassererzeugung).

Die Ergebnisse beim Stückholzkessel liegen insgesamt noch in einem plausiblen Bereich, u.U. könnten die CO+HC-Konzentrationen, vor allem zu Beginn der Langzeitmessung, etwas zu hoch berechnet sein. Diese Vermutung lässt sich aber nicht genau belegen, da sich im Verlauf der Langzeitmessung auch andere Messgrößen (z.B. Schornsteinzug) verändert haben, was auf eine andere Kesseleinstellung hindeuten könnte. Da der Betreiber den Verbrennungsablauf durch die Brennstoffaufgabemengen und die Einstellung der Verbrennungsluft bei dieser einfachen Kesselkonstruktion stark beeinflussen kann, könnten die hohen Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung auch tatsächlich in der berechneten Höhe aufgetreten sein.

Beim Kaminofen wurden die höchsten Konzentrationen von CO+HC gemessen, vor allem für den Gesamtabbrand. Dies liegt an außergewöhnlich hohen CO+HC-Konzentrationen während des Holzkohleabbrandes in der Ausbrandphase. Da bei Kaminöfen diese Verbrennungsphase einen hohen zeitlichen Anteil am Gesamtabbrand hat, liegen die CO+HC-Konzentrationen hier um rund den Faktor 3 höher als für die Hauptverbrennungsphase. In der Ausbrandphase während des Holzkohleabbrandes treten, wenn eine intensive Verbrennung in der Hauptverbrennungsphase erreicht wird, im wesentlichen nur noch CO-Emissionen auf. Organische Verbindungen sind im Abgas kaum noch vorhanden. Erfahrungsgemäß erreichen die CO-Konzentrationen aber nicht diese hohen Konzentrationen, die am Kaminofen berechnet wurden. Frühere Messungen mit konventioneller Messtechnik an diesem Kaminofen belegen diese Erfahrung. Somit muss davon ausgegangen werden, dass die CO+HC-Konzentrationen des Gesamtabbrandes viel zu hoch berechnet wurden. Die CO+HC-Konzentrationen der Hauptverbrennungsphase könnten in der richtigen Größenordnung liegen, sind aber, im Vergleich zu früheren Messungen auch etwas zu hoch. Dies gilt auch für die Abgastemperatur, die für den hohen Abgasverlust verantwortlich ist.

Die während der Langzeitmessung ermittelten mittleren O_2 - und NO_x -Konzentrationen liegen in einem üblichen Bereich für diese Feuerungsbauart. Da der Kaminofen nur als Zusatzheizung genutzt wird, sind die mittleren wöchentlichen Betriebszeiten vergleichsweise kurz.

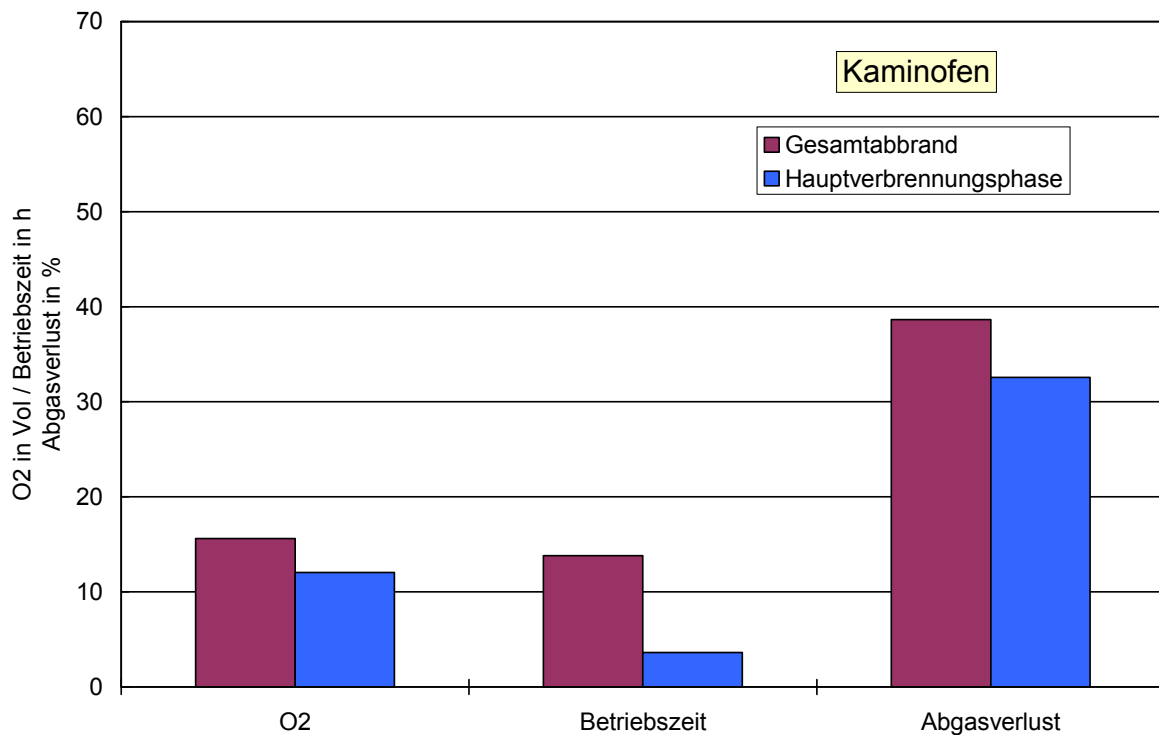
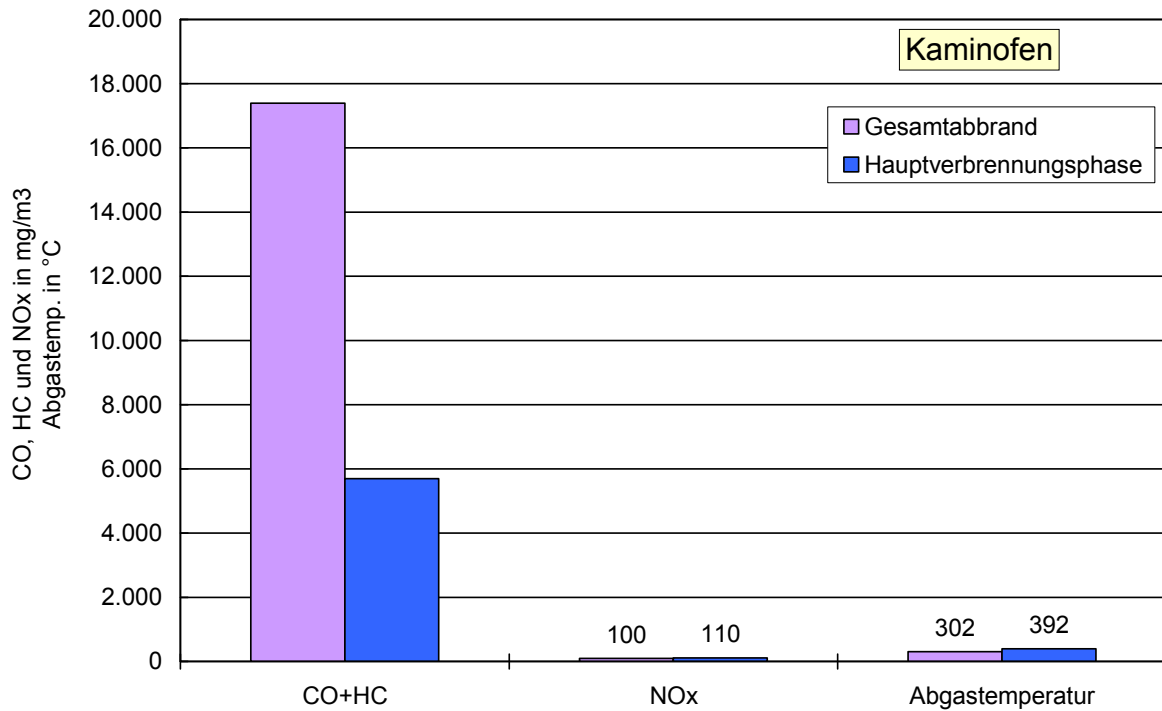


Bild 8-4 Mittelwerte über gesamte Langzeitmessung für CO+HC (als CO-Äquivalente), NO_x und Abgastemperatur (oben) sowie O₂, wöchentliche Betriebszeit und Abgasverlust (unten) für den Kaminofen (Gaskonzentrationen im feuchten Abgas, CO+HC sowie NO_x sind auf 13 Vol% O₂ bezogen)

9 Fazit

Für Emissionsmessungen an Holzfeuerungsanlagen sind derzeit nur vergleichsweise aufwendige und teure Messverfahren verfügbar, bei denen in kürzeren Abständen auch regelmäßige Wartungs- und Kontrollarbeiten anfallen. Diese Systeme sind nicht für unbeaufsichtigte Langzeitmessungen an Feuerungsanlagen geeignet. Zur Ermittlung des Langzeitemissionsverhaltens von kleinen und mittleren Biomassefeuerungen, für Breit angelegte Feldmessungen an vielen unterschiedlichen Feuerungsanlagen und zur Diagnose von Anlagen die Nachbarschaftsbeschwerden verursachen, wäre eine kompakte, vergleichsweise kostengünstige und wartungsarme Messsysteme notwendig, welches die Emissionskomponenten direkt im Abgas mittels preisgünstiger und zuverlässiger Abgassensortechnik erfasst.

Aufbauend auf Untersuchungen zur Eignung derartiger Sensoren für Biomassefeuerungen wurden vom Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik (IWE) der Universität Karlsruhe vier Systeme zur Messung von O_2 , NO_x und unverbrannten Abgasbestandteilen (CO+HC) sowie der Abgas- und Außentemperatur und des Schornsteinzuges aufgebaut. Bestandteil der Systeme ist ein PC zur Datenerfassung, Speicherung und Datenübertragung mittels Internet oder Mobilfunk.

Mit diesen mobilen Messsystemen (Messboxen) wurden an vier installierten Feuerungsanlagen Langzeituntersuchungen zum Emissionsverhalten der Anlagen im Praxisbetrieb in den Monaten Februar bis Mai 2008 durchgeführt. Die Messungen wurden an einem Pelletkessel, einem mechanisch beschickten Holzkessel im Holzver- und bearbeitenden Gewerbe, einem handbeschickten Stückholzkessel und an einem Kaminöfen durchgeführt. An Brennstoffen wurden die vom Betreiber der Anlagen üblicherweise eingesetzten Heizmaterialien verwendet.

Vor und nach den Langzeitmessungen wurden die Messsysteme anhand von Vergleichsmessungen mit Referenzmessverfahren an Feuerungsanlagen auf dem Prüfstand überprüft. Hierbei wurden Kalibrierfunktionen für die Umrechnung der Sensorsignale in Konzentrationen und Sensordriften ermittelt. Außerdem wurde das Summensignal des CO+HC-Sensors näherungsweise in eine Konzentration für Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen umgerechnet.

Mit den Ergebnissen konnte der Nachweis erbracht werden, dass die mobilen Messsysteme für Langzeitmessungen geeignet sind. Insgesamt funktionierten die eingesetzten Messsonden zuverlässig und relativ stabil. Bei einigen Sonden traten Störungen auf, die in einem Fall zu einem Totalausfall und in den anderen Fällen zu mehr oder weniger regelmäßigen negativen Messwerten (Einzelwerte) oder auch z.T. unplausibel hohen Einzelwerten führten. Diese hatten aber keinen großen Einfluss auf die Aussagekraft der Messungen, negative und unplausibel hohe Werte wurden bei der Auswertung ignoriert. Somit konnte mit den Messungen das Betriebs- und Emissionsverhalten der Anlagen über den gesamten Messzeitraum beschrieben werden. Außerdem wurde exemplarisch an einem Beschwerdefall über Rauch- und Rußemissionen gezeigt, dass mit Hilfe der Ergebnisse die Betriebszustände identifiziert werden können, welche im wesentlichen für die Nachbarschaftsbeschwerden verantwortlich sind.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Optimierung des Messsystems, z.B. Datenübertragung, einfachere Programmierung und Anwendung und der Erkennung von Unregelmäßigkeiten im Messbetrieb. Außerdem sollte untersucht werden, ob eine genauere Aufspaltung des CO+HC-Summensignals in eine CO- und HC-Konzentration möglich ist. Weiterhin wäre die Ergänzung des Messsystems um einen Sensor für Partikelemissionen sinnvoll.

10 Literaturverzeichnis

1. BImSchV (2001).

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950).

ESCUBE (2007).

Sensor zur Messung brennbarer Gase. Datenblatt für Sensor CarboSEN 1000. ESCUBE GmbH & Co. KG, Nobelstraße 15, 70569 Stuttgart (<http://www.escube.de/>).

Menesklou, Wolfgang. (2007).

Einsatz von Sensortechnik zur Überwachung von Holzfeuerungen. Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe. Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik (IWE) der Universität Karlsruhe (TH).

ÖNORM 7510-4. Vorschlag. (2007).

Überprüfung von Heizungsanlagen — Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Einfache Überprüfung. ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

M. Struschka, Michael; Brodbeck, Johannes; Carrasco, Maria; Baumbach, Günter (2007).

Vergleichsmessungen mit Abgassensoren an Biomassefeuerungen. Messbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart.

Teichler, Jens (2008).

Einsatz von Sensoren zur Bestimmung von brennbaren Gasen in Holzfeuerungsanlagen. Studienarbeit an Universität Karlsruhe (TH) im Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik (IWE) Betreuer: Dr. Ing. Wolfgang Menesklou, Karlsruhe.