



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**

# **PRÜFVERFAHREN FÜR DIE STARTPHASE AUF DER BASIS VON EN 303-5**

## **1. STÜCKHOLZKESSEL**

### **Schlussbericht**

Ausgearbeitet durch

**Jürgen Good**  
**Thomas Nussbaumer**

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw, [www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

Dezember 2010

**Auftraggeber**

Bundesamt für Energie

**Autoren**

Dr. Jürgen Good, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw

Prof. Dr. Thomas Nussbaumer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw

**Mitarbeit**

Daniel Obermayr, Verenum, 8006 Zürich

Nina Boogen, Verenum, 8006 Zürich

**Begleitgruppe**

Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie, 3003 Bern

Ruedi Bühler, Energie & Umwelt, 8933 Maschwanden

Franco Isler, Holzenergie Schweiz, 8005 Zürich

Roland Schmid, Holzfeuerungen Schweiz SFIH, c/o Schmid AG, 8360 Eschlikon

**Impressum**

Jürgen Good, Thomas Nussbaumer:

Prüfverfahren für die Startphase auf der Basis von EN 303-5, 1. Stückholzkessel,

Bundesamt für Energie, Bern, 2010

Datum: 7. Dezember 2010

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen, Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00, [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektleiterin: Dr. Sandra Hermle, [sandra.hermle@bfe.admin.ch](mailto:sandra.hermle@bfe.admin.ch)

Projektnummer: 102969

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

# Inhalt

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Ausgangslage .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Aufgabenstellung .....</b>	<b>8</b>
2.1 Zielsetzung.....	8
2.2 Einfluss des Kesselbetriebs.....	8
2.3 Beurteilung der Emissionen.....	9
2.3.1 Gasförmige Emissionen.....	9
2.3.2 Feste und kondensierbare Emissionen.....	10
2.3.3 Beurteilung der Schadstoffe und Korrelationen.....	11
<b>3 Vorgehen .....</b>	<b>12</b>
3.1 Versuchsprogramm.....	12
3.2 Versuchsanordnung und Messtechnik.....	13
3.2.1 Versuchsaufbau.....	13
3.2.2 Gravimetrische Staubmessung nach VDI 2066.....	13
3.2.3 Kondensatmessung (COC) nach EPA 5-H.....	14
3.2.4 Korngrößenanalyse und Partikelanzahl.....	15
3.3 Einbindung in die Typenprüfung nach EN 303-5 .....	16
3.4 Untersuchte Stückholzkessel.....	17
3.5 Anfeuerungsprozedur und Brennstoff.....	18
3.6 Messprozedere .....	19
3.6.1 Einzelabbrand mit Startphase.....	19
3.6.2 Zwei aufeinanderfolgende Abbrände nach EN 303-5.....	20
3.7 Untersuchte Betriebszustände.....	21
3.7.1 Startphase.....	21
3.7.2 Stationäre Betriebsphase und Ausbrand.....	21
3.7.3 Typenprüfung nach EN 303-5.....	21
3.8 Weitere Einflüsse auf die Startphase.....	22
3.8.1 Einfluss des Kaminzugs.....	22
3.8.2 Einfluss der Kesseltemperatur.....	22
3.8.3 Einfluss der Hydraulik.....	22
3.8.4 Einfluss des Startzeitpunkt des Abgasgebläses.....	23
3.9 Methoden zur Auswertung der Messdaten .....	24

<b>4 Resultate.....</b>	<b>26</b>
4.1 Gute und schlechte Starts.....	26
4.2 Schadstofffrachten .....	30
4.3 Emissionen nach EN 303-5 im Vergleich zur Startphase .....	33
4.4 Korrelationen zwischen Emissionen in der Startphase.....	35
4.4.1 Korrelationen zwischen CO, VOC, COC und Staub .....	35
4.4.2 Zeitlicher Verlauf der Schadstoffe .....	38
4.4.3 Korrelationen zwischen CO und VOC als Basis für Grenzwerte .....	38
4.5 Einfluss des Kaminzuges.....	41
4.6 Einfluss der Kesseltemperatur .....	42
4.7 Einfluss der Rücklaufhochhaltung.....	44
4.8 Einfluss des Startzeitpunkt des Abgasgebläses .....	44
4.9 Relevanz und Partitionierung von VOC .....	44
4.10 Zusammenhang Staub, Kondensat und Partikelanzahl.....	47
4.11 Einfluss der Methode zur Datenauswertung .....	49
 <b>5 Schlussfolgerungen .....</b>	 <b>50</b>
5.1 Emissionen während der Startphase .....	50
5.2 Einbezug der Startphase in die Typenprüfung EN 303-5 .....	51
5.3 Entwicklungsbedarf.....	55
 <b>6 Anhang .....</b>	 <b>56</b>
6.1 Versuchsaufbau .....	56
6.2 Messtechnik.....	57
6.2.1 Übersicht .....	57
6.2.2 Gasanalyse .....	59
6.2.3 Staubmessung .....	59
6.2.4 Kondensat (COC) .....	59
6.2.5 Korngrössenanalyse und Partikelanzahl .....	59
6.2.6 Wärmeleistungsmessung .....	60
6.2.7 Weitere Messgrößen .....	60
6.3 Wärmeabnahme .....	60
6.4 Auswertungsbeispiel.....	62
6.5 Beispiel zu gutem und schlechtem Start.....	64
 <b>7 Literatur .....</b>	 <b>65</b>

## Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist, das Startverhalten von Stückholzkesseln zu untersuchen, den Anteil der während der Startphase emittierten Schadstoffe an der Gesamtfracht zu bestimmen und eine Einbindung der Startphase in die Prüfung nach EN 303-5 als Zusatzanforderung für das Qualitätssiegel zu überprüfen. Zur Berücksichtigung in der EN ist von Interesse, welche Schadstoffe in der Startphase von Bedeutung sind und welche Leitgrößen zur Messung in Frage kommen, wozu die Korrelationen unter den verschiedenen Schadstoffgruppen untersucht werden sollen.

Zur Durchführung der Messungen wurden drei moderne, mit dem Qualitätssiegel ausgestattete Stückholzkessel sowie ein alter, nicht mehr dem Stand der Technik entsprechenden Stückholzkessel bei verschiedenen Betriebsbedingungen ausgemessen. Erfasst wurden die gasförmigen Emissionen an Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NOX) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), letztere aufgeteilt in Methan und Nicht-Methan-Verbindungen (NMVOC). Im Weiteren wurden der gravimetrische Gesamtstaub im heissen Abgas nach VDI, die kondensierbaren organischen Verbindungen nach EPA (Condensable Organic Compounds, COC) und die Anzahlkonzentration und Korngrößenverteilung der Partikel mittels SMPS und OPC bestimmt.

Die Startphase erfolgte durch Befüllung der Kessel mit Anfeuern aus kaltem und aus betriebswarmem Zustand, wobei die Kessel beim Start aus kaltem Zustand mit Rücklaufhochhaltung betrieben wurden. Im Anschluss an die Startphase ist eine Messung nach heutiger EN 303-5 durch Auflegen von Holz auf die Grundglut möglich. Dieses Verfahren hat sich bewährt und es verlängert die Betriebszeit des Kessels zur Durchführung der Prüfung nicht zwingend, wenn die Startmessung zur Erstellung der Grundglut genutzt wird. Allerdings muss die Abgasmessung bereits ab Kesselstart einsatzbereit und kalibriert sein. Wenn die Zeit zur Erstellung der Grundglut sonst zur Einrichtung der Messtechnik genutzt wird, führt dies zu einer längeren Vorbereitung der Messung.

Ein Vergleich zwischen Start der Kessel aus durch aktive Auskühlung während 12 Stunden erreichtem kaltem Zustand und aus lediglich durch passive Auskühlung ohne wasserseitige Wärmeabfuhr erreichtem Zustand zeigt, dass einer der drei Kessel bei Start aus warmem Zustand wesentlich tiefere Emissionswerte erzielte als aus kaltem Zustand. Da in der Praxis ein Start des vollständig ausgekühlten Kessels der Regelfall ist, wird vorgeschlagen, dass vor Messung des Startverhaltens ein kalter Zustand sicher zu stellen ist, wozu vorliegend eine aktive Auskühlung von 12 Stunden erfolgte.

Die Bestimmung der Emissionen zeigt, dass die Startphase bei modernen Kesseln für den Grossteil der Fracht an organischen Verbindungen verantwortlich ist. Da diese Schadstoffe besonders gesundheitsrelevant sind und in der Startphase ausserdem rund viermal mehr organische Kondensate als Russ und andere Feststoffe emittiert werden, wird die Begrenzung der organischen Schadstoffe in der Startphase als vordringlich beurteilt. Dazu kommt die Messung von VOC in Frage, da diese bereits heute für die Prüfung nach EN 303-5 für Holzkessel vorgeschrieben ist und da NMVOC während der Startphase über 70% der VOC ausmachen. Daneben kann während der Startphase aber auch ein gleichläufiges Verhalten von CO mit VOC, NMVOC und COC nachgewiesen werden, so dass auch eine einfachere Messung von CO in der Startphase als Indikator für die organischen Verbindungen in Frage kommt. Da die Fracht an Feststoffen im Gegensatz zu der organischen Fracht nicht durch die Startphase dominiert wird, wird eine Staubbmessung während der Startphase nicht als zwingend notwendig erachtet. Bezüglich Kaminzug wird vorgeschlagen, zur Einführung der Startphase entweder vorerst eine konstante Vorgabe von 12 Pa einzuhalten oder eine aufgrund von Untersuchungen noch festzulegende praxisnahe Vorgabe zu definieren. Als vereinfachte Methode zur Auswertung der

Messdaten ohne kontinuierliche Messung des Abgasvolumenstroms wird empfohlen, zuerst die Mittelwerte der Messdaten zu bestimmen und diese anschliessend auf den Bezugs-Sauerstoffgehalt zu normieren. Bei drei von vier Kesseln ergaben sich mit dieser Methode nur geringe Fehler von maximal 6%, bei einem Kessel ergab dies allerdings Fehler von über 30% im Vergleich zu mit dem Volumenstrom gewichteten Daten. Der Fehler war jedoch in allen Fällen kleiner als durch Normierung und anschliessende Mittelwertbildung. Für den Einbezug der Startphase werden im Bericht Vorschläge für Grenzwerte an CO und VOC gemacht. Basis dazu bilden die Mittelwerte der Messintervalle von 0 bis 30 Minuten und von 0 bis 60 Minuten ab Kesselstart. Als erste Stufe werden für CO wird ein Grenzwert von  $4000 \text{ mg/m}_n^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  und für VOC ein Grenzwert von 15% des CO-Grenzwerts vorgeschlagen. Diese Werte werden von allen drei Stückholzkesseln erreicht, sofern keine Fehlstarts auftreten. Als weitere Stufen können die Grenzwerte um 25% oder um 50% der für die Einführungsphase vorgeschlagenen Grenzwerte reduziert werden. Der strengste Vorschlag wäre in der Untersuchung von einem der drei Kessel erreicht worden und kann als Zielwert für künftige Entwicklungen gelten.

Einer einfachen Einbindung der Startphase in die Typenprüfung steht aufgrund der vorliegenden Untersuchung allerdings die schlechte Reproduzierbarkeit des Startverhaltens entgegen, die in den durchgeführten Messungen erkennbar wurde. So ergaben sich bei über 30% der Starts als schlechte Starts bezeichnete Anfahrbedingungen, bei denen rund fünfmal höhere Emissionen als bei guten Starts auftraten. Da unklar ist, ob dieses Verhalten typisch oder aussergewöhnlich ist, müsste diese Frage geklärt oder bei Einbindung der Startphase in die Typenprüfung berücksichtigt werden, indem zum Beispiel in einer Einführungsphase eine ausreichend grosse Anzahl Messungen durchgeführt würde. Ausserdem müsste sichergestellt werden, dass abgebrochene Starts dokumentiert werden, da die Aussagekraft einer Prüfung durch Selektion der guten Starts in Frage gestellt wird.

# 1 Ausgangslage

Holzfeuerungen müssen in der Schweiz die Emissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [1] einhalten. Für mit naturbelassenem Brennholz betriebene Feuerungen bis 70 kW ist lediglich ein Grenzwert an Kohlenmonoxid (CO) von 4000 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> vorgeschrieben [1; LRV Anhang 3, Ziffer 522]. Für Neuanlagen wurde allerdings mit der LRV 2007 auch der Nachweis einer Konformitätserklärung eingeführt, aus dem die Notwendigkeit einer Typenprüfung abgeleitet wird. Diese basiert für Holzkessel unter anderem auf der europäischen Norm EN 303-5 und beinhaltet nebst einem CO-Grenzwert auch solche für den Gesamtstaub und die Gesamtkohlenwasserstoffe. Der CO-Grenzwert für handbeschickte Stückholzkessel beträgt aktuell 800 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>, während der Staubgrenzwert per 1.1.2011 von 60 auf 50 mg/m<sup>3</sup> verschärft wird [1; LRV Anhang 4, Ziffer 212].

Die EN 303-5 [2] verlangt in der aktuell besten Klasse der handbeschickten Stückholzkessel bis 50 kW Emissionsgrenzwerte für CO von 2'500 mg/m<sup>3</sup>, für organische gasförmige Stoffe (OGC) von 100 mg/m<sup>3</sup> und für Staub von 150 mg/m<sup>3</sup> bei 10 Vol.-% O<sub>2</sub>. Die EN 303-5 ist in Revision und die Grenzwerte werden voraussichtlich per Ende 2011 deutlich verschärft. Die für die neue beste Klasse vorgeschlagenen Emissionsgrenzwerte betragen für CO 700 mg/m<sup>3</sup>, für OGC 30 mg/m<sup>3</sup> und für Staub 60 mg/m<sup>3</sup> bei 10 Vol.-% O<sub>2</sub> [3]. Dies entspricht für CO rund 500 mg/m<sup>3</sup>, für OGC rund 20 mg/m<sup>3</sup> und für Staub rund 45 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>. Die nach EN als OGC bezeichneten organischen gasförmigen Verbindungen werden nachfolgend auch als Kohlenwasserstoffe (KW) oder Volatile Organic Compounds (VOC) bezeichnet.

In der Schweiz wird von Holzenergie Schweiz zudem ein freiwilliges Qualitätssiegel für Holzöfen und Holzkessel vergeben. Für das Qualitätssiegel werden zusätzliche Anforderungen verlangt, die über das gesetzliche Minimum hinausgehen. Dies können strengere Grenzwerte und/oder zusätzliche Anforderungen sein.

Trotz kontinuierlicher Verbesserungen der Holzheizungen treten in der Praxis immer wieder Klagen und Nachbarschaftsbeschwerden wegen Belästigung durch Geruch und Feinstaub aus Holzheizungen auf. Einzelne Erfahrungen zeigen, dass die Klagen nicht nur alte Feuerungen, sondern auch solche, die über das Qualitätssiegel verfügen oder die EN 303-5 erfüllen. Es gibt Hinweise, dass vor allem die Startphasen zu Klagen führen. Messungen im Zusammenhang mit dem Einfluss der Betriebsweise bestätigen, dass die Startphase bei korrekt betriebenen Holzheizungen zu erhöhten Emissionen führt [4]. Bei schlecht betriebenen Holzheizungen können die Emissionen demgegenüber während langer Zeit auf einem hohen Niveau verbleiben, was zum Beispiel an einem schlecht betriebenen Holzofen in der Schweiz sowie an Stückholzkesseln ohne Speicher in Schweden gezeigt wurde [5].

Da die Startphase bei der EN 303-5 nicht erfasst, jedoch als häufige Ursache für Klagen vermutet wird, soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchung abgeklärt werden, ob und wie die Startphase allenfalls als Anforderung für das Qualitätssiegel bewertet werden kann [6]. Der vorliegende Bericht behandelt als Teil 1 die Abklärungen für Stückholzkessel. Als Ergänzung dazu sollen in einem Folgeprojekt Abklärungen für automatische Holzkessel und Pelletfeuerungen durchgeführt werden [6].

## 2 Aufgabenstellung

### 2.1 Zielsetzung

Die Startphase wird bisher weder bei der Typenprüfung nach EN 303-5 noch bei der LRV erfasst, jedoch als häufige Ursache für Klagen vermutet. In der vorliegenden Untersuchung soll abgeklärt werden, ob es sinnvoll ist, die auf das Anzünden folgende Startphase bei Stückholzkesseln in die Prüfung nach EN 303-5 einzubeziehen, um damit Kessel mit gutem Startverhalten zu belohnen. Die eigentliche Startphase wird auch als „Kaltstartphase“ bezeichnet, um sie vom Nachlegen auf die Grundglut, was auch als „Warmstart“ bezeichnet wird, zu unterscheiden. Beim Nachlegen handelt es sich allerdings nicht um einen eigentlichen Start, da dieser nur beim Anfeuern erfolgt.

Falls eine Messung der Startphase empfohlen werden kann, soll aufgezeigt werden, wie das Startverhalten zu definieren und bewerten ist. Dazu ist abzuklären, ob bei geeigneter Festlegung des Vorgehens eine verwertbare Reproduzierbarkeit des Abbrands und der resultierenden Emissionen erzielt werden kann. In Bezug auf Emissionen soll aufgezeigt werden, welche Schadstoffkomponenten gemessen werden sollen, um die Startphase im Hinblick auf die Geruchsbelästigung und den Beitrag an die Feinstaub-Immissionen zu beurteilen. Für die Geruchsbelästigung wird davon ausgegangen, dass diese durch gasförmige, kondensierbare und feste organische Verbindungen bestimmt wird, während Kohlenmonoxid und anorganischer Feinstaub nicht als relevante Geruchsquellen betrachtet werden. Für die Geruchsbelästigung ist ausserdem davon auszugehen, dass auch kurzfristige Emissionen von weniger als 2 Minuten Dauer störend sein können, welche nur unwesentlich zur Gesamtfracht beitragen.

Zur Klärung dieser Fragen sollen in der vorliegenden Untersuchung beurteilt werden, welche Korrelationen zwischen Kohlenmonoxid (CO), Gesamt-Kohlenwasserstoffen (KW) und Staub bei Prüfbedingungen von Stückholzkesseln während der Startphase und über den gesamten Abbrand (Start und stationäre Phase, untergeordnet auch Ausbrand) auftreten und welche Messgrössen für eine Prüfung der Startphase empfohlen werden können.

### 2.2 Einfluss des Kesselbetriebs

Im Rahmen der Untersuchung sollen auch der Einfluss der Betriebsweise der Kessel während der Prüfung aufzuzeigen und folgende Fragen geklärt werden:

- Um die Relevanz der Startphase in Bezug auf die Schadstoffemissionen zu beurteilen, ist eine Definition für die Startphase und insbesondere für das Ende der Startphase vorzuschlagen.
- Im Weiteren ist aufzuzeigen, wie weit für die Startphasen eine ausreichende Reproduzierbarkeit erwartet werden kann.
- Es ist abzuklären, ob eine Auskühldauer von 12 Stunden zwischen zwei Messungen ausreichend ist, oder ob eine längere Auskühldauer oder eine aktive Auskühlung erforderlich ist und ob daraus Auswirkungen auf die Messung zu erwarten sind.
- Der Einfluss der Kesseltemperatur beim Kaltstart ist durch Variationen aufzuzeigen.
- Der Einfluss der Wärmeabfuhr gemäss Norm oder mit Rücklaufhochhaltung ist aufzuzeigen. Nach heutiger Norm, welche eine Messung ab betriebswarmem Kessel vorsieht, nimmt das Heizsystem die erzeugte Wärme ab. Während des Kaltstarts wird bei Stückholzkesseln in der Praxis jedoch



eine Wärmeabfuhr durch die Rücklaufhochhaltung so lange verhindert, bis der Kessel die Betriebstemperatur erreicht hat. Für eine praxisnahe Kaltstartprüfung ist deshalb ein Betrieb mit Rücklaufhochhaltung vorzusehen. Dazu kann die Bilanzgrenze des zu prüfenden Aggregats unter Einbezug der vom Kesselhersteller zu liefernden Rücklaufhochhaltung erweitert oder vom Labor eine entsprechende Einrichtung vorgegeben werden. Dabei ist sicher zu stellen, dass die Prüfung nach EN 303-5 in der anschliessenden Messung ab Nachlegen auf Grundglut ermöglicht wird. In Frage kommen folgende Varianten und Anordnungen:

1. Konstante Wärmeabnahme (Nennleistung) ab Zeitpunkt 0 mit Begrenzung der Wärmeabnahme auf Kesselnennleistung.
  2. Konstante Wärmeabnahme (Nennleistung) erst wenn die Kesseltemperatur die Temperatur der Rücklaufhochhaltung übersteigt und anschliessende Begrenzung der Wärmeabnahme auf Kesselnennleistung.
  3. Geregelte Wärmeabnahme mit Rücklaufhochhaltung und Begrenzung der Wärmeabnahme auf Kesselnennleistung.
  4. Geregelte Wärmeabnahme mit Rücklaufhochhaltung, jedoch ohne Begrenzung der Wärmeabnahme auf Kesselnennleistung (die Leistung kann die Nennleistung übersteigen).
- Nebst der hydraulischen Einbindung ist der Einfluss des Kaminzugs während der Startphase aufzuzeigen. Auf Empfehlung von BLT Wieselburg soll der Kaminzug in der Kalt-Startphase während der ersten 30 bis 50 Minuten auf 80% des vom Kesselhersteller angegebenen Wertes gesetzt werden. Diese Empfehlung soll überprüft und der Einfluss des Kaminzugs aufgezeigt werden.

In der vorliegenden Untersuchung geht es ausschliesslich um die Beurteilung der Emissionen, während für den Kesselwirkungsgrad keine neue Empfehlung und keine Messung während der Startphase vorgesehen ist.

## 2.3 Beurteilung der Emissionen

### 2.3.1 Gasförmige Emissionen

Die gasförmigen Emissionen sind gemäss heutiger Norm mit einer zeitlichen Auflösung von maximal 20 Sekunden zu erfassen. In der Untersuchung erfolgt die Datenerfassung effektiv alle 1 bis 5 Sekunden. Diese Werte werden abgespeichert oder für die weitere Verarbeitung zur Berechnung von Mittelwerten über maximal 60 Sekunden Dauer ersetzt. Für die gasförmigen Emissionen werden CO als in der LRV vorgeschriebene Referenzgrösse herangezogen und KW als für die Typenprüfung für Kessel zusätzlich einzuhaltender Grenzwert bestimmt.

Da Methan weder in Bezug auf Geruch noch als Vorläufer für Feinstaub in der Umgebungsluft relevant ist, sollen nebst den Gesamtkohlenwasserstoffen (KW) zusätzlich der Anteil an Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMKW) bestimmt und bewertet werden. Dabei soll auch aufgezeigt werden, wie gut die Bestimmung von NMKW und Gesamt-KW korrelieren, ob also des Verhältnis von Methan zu KW als in erster Näherung konstant angenommen werden kann oder nicht.

## 2.3.2 Feste und kondensierbare Emissionen

Für die Beurteilung der festen und kondensierbaren Verbindungen werden drei sich ergänzende Messverfahren eingesetzt, nämlich die gravimetrische Bestimmung der Feststoffe, die Bestimmung der organischen Kondensate sowie die Messung der Partikelanzahl und -grösse nach folgenden Verfahren:

### 1. Massenkonzentration

- a. Massenkonzentration an gravimetrisch bestimmtem Gesamtstaub im heissen Abgas gemäss VDI 2066 durch Messung in 15- bis 30-Minuten-Intervallen. Für den so ermittelten Staubgehalt werden auch die Begriffe Feststoff oder Solid Particles SP verwendet.
- b. Zusätzlich werden nach dem Filter der gravimetrischen Probenahme die kondensierbaren organischen Verbindungen in Waschflaschen bestimmt. Die entsprechenden Verbindungen werden auch als Teer oder Condesable Organic Compounds (COC) bezeichnet.

Die Summe von (SP und COC) wird auch mit SPC abgekürzt. Die Begriffe lehnen sich an die in [10] eingeführte Terminologie an, so dass die Fraktionen aufgrund der Entstehung unterschieden werden.

### 2. Anzahlkonzentration und Korngrössenspektrum

Für die Messung der Anzahlkonzentration ist der Anteil der ultrafeinen Partikel dominierend, während Grobpartikel für die Anzahlmessung weitgehend vernachlässigbar sind. Dies gilt für Stückholzkessel unter normalen Betriebsbedingungen für Partikel und Tröpfchen mit Korngrössen über 10 Mikrometer. Gemäss einer Empfehlung zu Handen des Bundesamts für Umwelt genügt gar die Messung der Partikel  $< 1$  Mikrometer [8]. Die Anzahlbestimmung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konzentriert sich deshalb ebenfalls auf Partikel bis 1 Mikrometer, so dass nicht zwingend eine isokinetische Probenahme erforderlich ist und die Probenahme auch gegen die Stromrichtung erfolgen kann [11]. Im Weiteren ist eine Vorabscheidung für grobe Partikel zum Schutz der Geräte zulässig.

Aufgrund der hohen Partikelkonzentrationen im Abgas werden Anzahlmessungen ausserdem in verdünntem Abgas durchgeführt. Um eine Kondensation und Nukleation von zu verhindern, wird die erste Verdünnung mit heisser und konditionierter Luft durchgeführt. Zur Bestimmung der Korngrössenverteilung und Anzahlkonzentration kommen ein Scanning Mobility Particle Counter (SMPS) und ein optisches Partikelmessgerät (Optical Particle Counter, OPC) zum Einsatz, die eine zeitliche Auflösung von rund 2 Minuten aufweisen. Die Anzahlkonzentration oder Particle Number Concentration (PN) bezeichnet und erfasst Feststoffe und Tröpfchen.

### Vergleich von Massen- und Anzahlkonzentration

Aufgrund der Probenahme und Analyseart liefern die gravimetrischen Methoden und die Anzahlmessungen sich ergänzende Informationen, die nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Eine alleinige Messung der Anzahlkonzentration erlaubt deshalb keinen Vergleich mit den in der LRV oder nach VDI für Holzheizungen gültigen Staubwerte, jedoch im Vergleich zur gravimetrischen Messung eine höhere zeitliche Auflösung. Da beide Messungen mit einem erheblichen Aufwand verbunden sind, sollen die

Aussagekraft der einzelnen Methoden untereinander und mit der Messung von CO und KW verglichen werden und für die Beurteilung der Startphase eine Einschränkung auf eine oder zwei Messgrößen vorgeschlagen werden, wobei insbesondere eine Messung von CO anstelle des Staubgehalts zu prüfen ist. Obwohl die Messung mittels SMPS und OPC keine zuverlässige Bestimmung der Massenkonzentration erlauben, wird in der Praxis oft unter Annahme kugelförmiger Partikel mit einer mittleren Dichte auf Masse umgerechnet. Vergleichsmessungen mit der gravimetrischen Staubmessung während stationären Betriebsphasen erlauben bis zu einem gewissen Grad eine Kalibrierung dieser Messungen. Im vorliegenden Bericht erfolgt zu Vergleichszwecken ebenfalls eine Umrechnung der Korngrössenanalyse auf eine Massenkonzentration an Partikeln, wobei mit einer Partikeldichte von  $1,2 \text{ kg/dm}^3$  gerechnet wird. Die so bestimmte Grösse wird als Particle Mass Concentration (PM) bezeichnet.

### 2.3.3 Beurteilung der Schadstoffe und Korrelationen

Als Basis für die Beurteilung der Messverfahren sollen folgende Fragen beurteilt werden:

1. Welche Korrelationen werden zwischen folgenden Emissionsparametern gefunden:

- KW(CO), SP(CO), COC(CO), SPC(CO), PN(CO)
- SP(KW), COC(KW), SPC(KW), PN(KW)
- COC(SP), PN(SP)

2. Zusätzlich soll der Anteil der Startphase an den gesamten Emissionen abgeschätzt und daraus abgeleitet werden, wie weit die Startphase für die Gesamtfracht des Abbrands entscheidend ist.

3. Welche Korrelationen werden als für eine Typenprüfung verwertbar beurteilt, wobei zwischen Geruchsbelästigung (Peaks) und Fracht zu unterscheiden ist. Aufgrund der Aussagekraft der ausgewiesenen Korrelationen sind folgende Fragen zu klären:

- Kann CO als Indikator für KW, SP, COC sowie PN verwendet werden.
- Genügt die Messung von CO in der Startphase.

Daraus soll eine Empfehlung abgeleitet werden, welche Schadstoffe zur Erfassung der Umweltrelevanz von Stückholzkesseln während der Startphase sowie während der anschliessenden, den heutigen Normen entsprechenden Messungen zu erfassen und zu bewerten sind.

## 3 Vorgehen

### 3.1 Versuchsprogramm

Im Forschungslabor wurden drei moderne, dem Stand der Technik entsprechende Stückholzkessel und zum Vergleich der Methode zudem ein alter, nicht mehr dem Stand der Technik entsprechender Stückholzkessel untersucht. Um den Einfluss der Hydraulik zu untersuchen, wurde der Versuchsaufbau mit einer Rücklaufhochhaltung und der dazu erforderlichen messtechnischen Erfassung ausgerüstet. Nach mehreren Vorversuchen wurden 32 vollständige Versuche bei Nenn-Wärmeleistung durchgeführt und folgende Messungen vorgenommen (Tabelle 3.1):

- Kontinuierliche Analyse der gasförmigen Emissionen: CO, KW, Methan, NMKW, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>).
- Semi-kontinuierliche Analyse des Korngrössenspektrums und der Anzahlverteilung: PN.
- Erfassung der Betriebsparameter wie Temperaturen, Kaminzug, Holzart, Leistung.
- Diskontinuierliche Messung der Feststoffe (Solid Particles, SP) gemäss VDI 2066 und Kondensatbestimmung (COC) in Anlehnung an EPA 5-H.

Tabelle 3.1 Versuchsprogramm.

Anzahl Versuche	Moderne Kessel			Alter Kessel	Total
	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Kessel 4	
	Unterer seitlicher Abbrand	Sturzbrand	Sturzbrand	Unterer seitlicher Abbrand	
Kaltstart	6	6	6	4	22
Typenprüfung EN 303-5	2	2	2		6
Einfluss Kaminzug	1	2	1		4
Einfluss Kesseltemperatur	1	1	1		3
Einfluss Rücklaufhochhaltung	1	1			2
Einfluss Startzeitpunkt Abgasgebläse			1		1

Während der Startphase sind die Abbrandbedingungen bei einem Stückholzkessel instationär. Aus diesem Grund wurde auch der Abgasvolumenstrom kontinuierlich gemessen. Die Auswertung der Messdaten erfolgte nach verschiedenen Berechnungsmethoden mit und ohne Berücksichtigung des Abgasvolumenstroms, was im entsprechenden Kapitel separat ausgeführt ist.



### 3.2.3 Kondensatmessung (COC) nach EPA 5-H

Während Salze und Russ bei 160°C nahezu vollständig als Feststoffe vorliegen, liegt ein Teil der NMKW als höherwertige organische Verbindungen bei 160°C noch dampfförmig vor, der bei Abkühlung auf Umgebungstemperatur kondensieren kann. Soweit diese Verbindungen selbst nach der Verdünnung in der Umgebungsluft und der damit verbundenen Reduktion des Partialdrucks kondensieren, gelten sie als primäre Aerosole und werden als COC bezeichnet. Ein Teil der kondensierbaren Verbindungen kann allerdings im unverdünnten Abgas bei Umgebungstemperatur kondensieren, jedoch durch Partialdruckabsenkung in der verdünnten Umgebungsluft dampfförmig vorliegen. Dieser Anteil ist den flüchtigen organischen Verbindungen anzurechnen, wird jedoch bei Abkühlung des unverdünnten Abgases als Kondensat erfasst und somit ebenfalls den COC zugeordnet. Zur Erläuterung ist in Bild 3.2 die Konversion des Kohlenstoffs während der Verbrennung und in der Atmosphäre dargestellt, wobei in der Grafik die flüchtigen organischen Verbindungen als VOC bezeichnet sind.

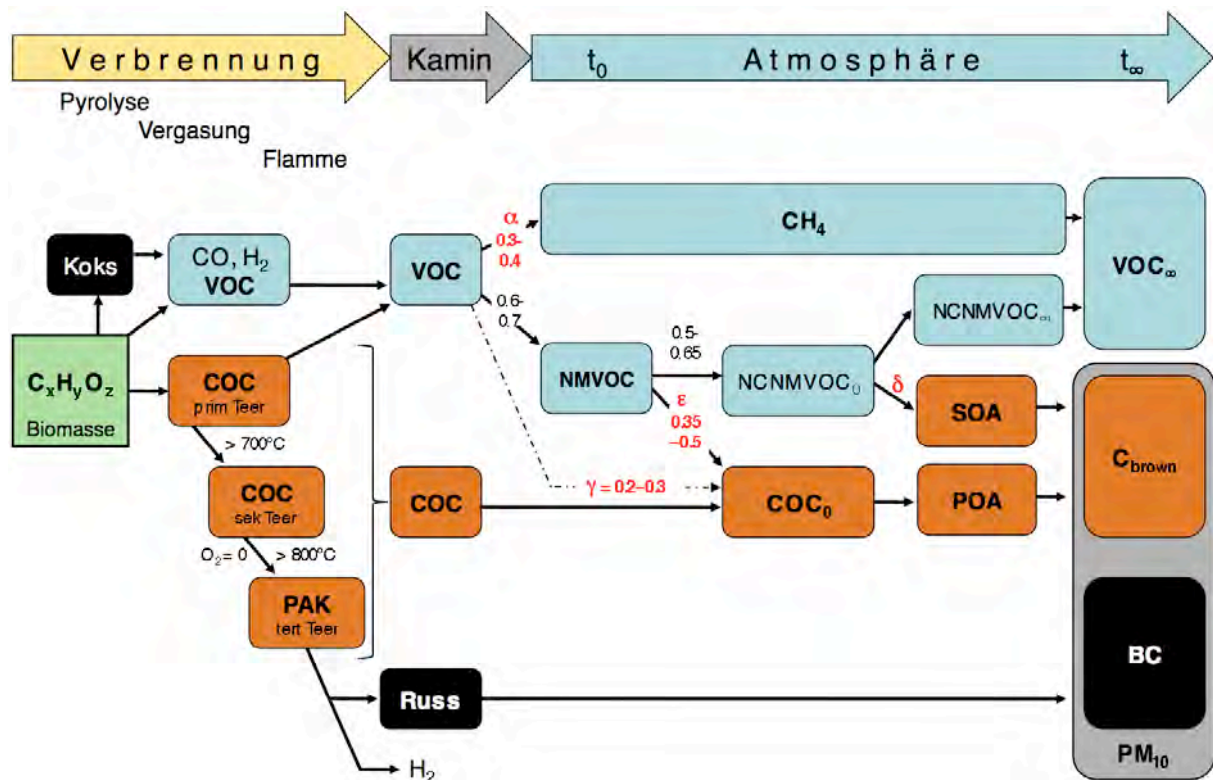


Bild 3.2 Konversion der organischen Verbindungen von der Verbrennung über den Kamin bis in die Atmosphäre, wo durch Verdünnung sowie durch fotochemische Reaktionen von VOC zu SOA eine Aufteilung in Gase und Feinstaub (PM<sub>10</sub>) erfolgt. In der Grafik werden die Fraktionierungs-Faktoren  $\alpha$ ,  $\epsilon$  und  $\gamma$  eingeführt, die durch Analysen bestimmt wurden [13]. Bei der Bildung von SOA nimmt die Masse durch Aufnahme weiterer Elemente um einen Faktor  $\delta$  zu, für den in [14] für Holzrauch ein Wert von 2.2 bis 2.6 gefunden wurde. In der Grafik werden die Begriffe VOC für KW und NMVOC für NMKW verwendet. Die Bezeichnung NCNMVOC steht für nicht-kondensierbare (non condensing) NMVOC.

Um das Potenzial an kondensierbaren organischen Verbindungen zu erfassen, wurde das Abgas unverdünnt in Waschflaschen gekühlt und durch eine Kondensatmessung bestimmt. Diese erfolgte gemäss EPA-Methode 5H, wobei in Abweichung dazu die erste Planfiltermessung nach VDI bei 160°C anstatt wie nach EPA bei 120°C erfolgte.

Die Menge an organischen Stoffen im Kondensat wird durch TOC-Analyse des Kondensats bestimmt. Organische Stoffe, welche die Waschflaschen passieren, werden auf einem nachgeschalteten Backup-Filter aufgefangen. Die Backup-Filter wurden vor den Versuchen während 2 Stunden im Trockenschrank bei 120 °C getrocknet und nach den Versuchen während 8 Stunden im Exsikkator getrocknet und ausgewogen. Die Summe aus den organischen Stoffen im Kondensat und im Backup-Filter ergeben die Gesamtfracht an organischen Verbindungen, die im Temperaturbereich zwischen 160°C und 5°C kondensierbaren und hier als COC bezeichnet werden. Ein Teil der COC wird beim Eintritt der Abgase in die Umgebung als primäre organische Aerosole (POA) in Erscheinung treten, der Rest infolge der Verdünnung durch Wieder-Verdampfung als VOC [10].

Für gute Verbrennungsbedingungen in automatischen Holzfeuerungen kann der Anteil an COC in der Regel vernachlässigt werden, es gilt somit  $COC \ll SP$ . Bei unvollständiger Verbrennung in Holzöfen kann der Anteil an COC die Feststoffe (SP) jedoch übersteigen, es gilt also  $COC > SP$ . Die Bandbreite von COC/SP beträgt für handbeschickte Holzfeuerungen je nach Verbrennungszustand oft zwischen 2 und 10 mit 4 als typischem Wert für Holzöfen [10].

### 3.2.4 Korngrössenanalyse und Partikelanzahl

Weiterhin wurde eine Korngrössenanalyse des Feinstaubes mittels SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) und OPC (Optical Particle Counter) durchgeführt. Da die Analysegeräte für die Korngrössenbestimmung zum Zählen der Partikel auf geringe Konzentrationen angewiesen ist, muss das heisse Abgas verdünnt werden. Dies erfolgt in einer zweistufigen Verdünnung. In der ersten Stufe wurde der Abgasstrom heiss mit konditionierter Luft von 150°C verdünnt, eine zweite Verdünnung erfolgte mit kalter Luft. Durch die zweistufige Verdünnung soll eine Kondensation durch direkte Abkühlung vermieden werden. Um das Partikelspektrum zu bestimmen, werden die Ergebnisse der beiden Messgeräte (SMPS und OPC) kombiniert. Die Gesamtmasse an Feinstaub während des Abbrandes kann über die gemessene Partikelanzahl und Grösse unter Annahme einer Partikeldichte und -form bestimmt werden. Dieser Wert dient nicht als exakte Partikelmassenkonzentration, kann jedoch bei stationären Betriebszuständen mit der gravimetrisch bestimmten Staubmasse verglichen werden. Da die Messung mittels SMPS und OPC eine höhere Zeitauflösung ermöglicht, kann das Signal bei Bedarf auch als ergänzender, semi-kontinuierlich erfasster Indikator für die Staubmasse dienen, obwohl dabei zu beachten ist, dass durch Änderungen der Partikelform und -dichte bei anderen Verbrennungszuständen Abweichungen zum gravimetrisch bestimmten Staubwert auftreten können.



### 3.3 Einbindung in die Typenprüfung nach EN 303-5

Im Ablauf der Typenprüfung nach EN 303-5 werden sicherheitstechnische Prüfungen durchgeführt. Weiter werden Wirkungsgrad und Emissionen bei Nennwärmeleistung geprüft, wobei mit einer ersten Brennstoffcharge zunächst stationäre Betriebsbedingungen geschaffen werden und eine Grundglut aufgebaut wird. Die eigentliche Prüfung beinhaltet zwei Abbrände. Sie beginnt beim ersten Nachlegen einer Brennstoffcharge und dauert bis zum Erreichen der ursprünglichen Grundglut, umfasst ein zweites Nachlegen einer Brennstoffcharge und endet beim Erreichen der Grundglut. Sofern vom Kesselhersteller gewünscht, wird auch eine Prüfung bei Teillast vorgenommen, wobei nur die Emissionen geprüft werden. Auch bei der Teillastprüfung werden mit einer ersten Brennstoffcharge stationäre Betriebsbedingungen geschaffen.

Der Abbrand der ersten Brennstoffcharge, mit dem stationäre Bedingungen geschaffen werden, könnte für eine Prüfung der Startphase genutzt werden. Das folgende Schema (Bild 3.3) zeigt die vorgesehene Einbindung der Startphase in die Abläufe der Typenprüfung nach EN 303-5.

#### Ablauf einer Typenprüfung nach EN 303-5

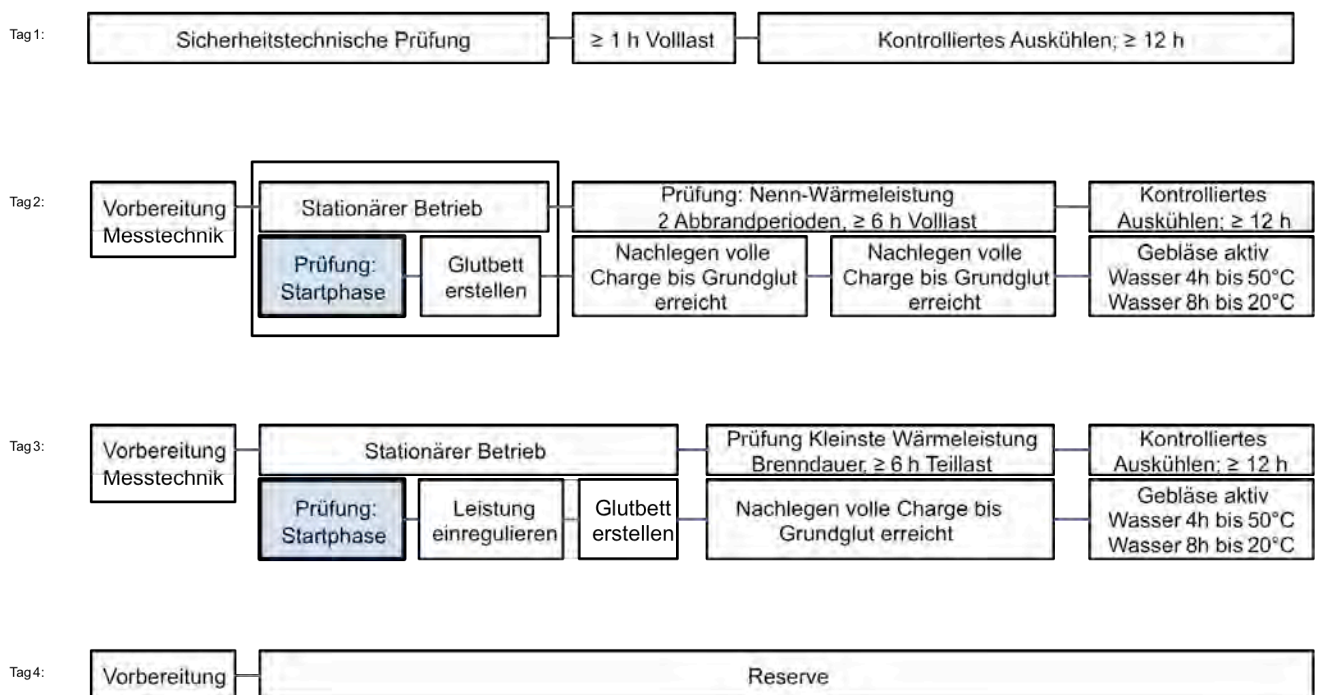


Bild 3.3 Ablauf einer Typenprüfung gemäss EN 303-5 mit möglicher Einbindung der Prüfung der Startphase.



### 3.4 Untersuchte Stückholzkessel

Für die Beurteilung der Startphase wurden vier Stückholzkessel (Bild 3.4) im Leistungsbereich von 30 kW bis 50 kW mit Sturzbrand oder unterem seitlichen Abbrand untersucht. Drei Kessel entsprechen dem Stand der Technik, ihre Emissionen liegen unter den gesetzlichen Anforderungen und die Kessel wurden in der Schweiz mit dem Qualitätssiegel ausgezeichnet. Zusätzlich wurde ein altes Modell (Baujahr 1983) in die Untersuchung miteinbezogen, das nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Dieser Stückholzkessel hat nur eine gemeinsame Zuluftklappe für Primär- und Sekundärluft, die über einen Kesselthermostaten entweder geöffnet oder bei Übertemperatur geschlossen wird. Bei den Stückholzkesseln 1 bis 3 erfolgt die Verbrennungsregelung über eine Lambda-Sonde, wobei die Primär- und Sekundärluft über getrennt gesteuerte Zuluftklappen geregelt werden. Zusätzlich unterstützt ein Abgasventilator die Überwindung des Druckverlustes im Feuerraum und in den Kesselzügen. Kessel 3 hat zudem Zuluftventilatoren für die Zuführung der Sekundär- und Primärluft. Kessel 4 hat nur eine Zuluftklappe für Primär- und Sekundärluft, was nicht mehr Stand der Technik ist. Als Regelgrösse dient lediglich die Kesseltemperatur, bei Überschreitung von etwa 90°C wird die Zuluftklappe automatisch geschlossen. Hierdurch kommt es zu ausgeprägtem Luftmangel mit unvollständiger Verbrennung. Bei Kessel 1 und 2 wurde die Kesseltüre bei der durch den Hersteller empfohlenen Abgastemperatur von 80°C bis 100 °C geschlossen.

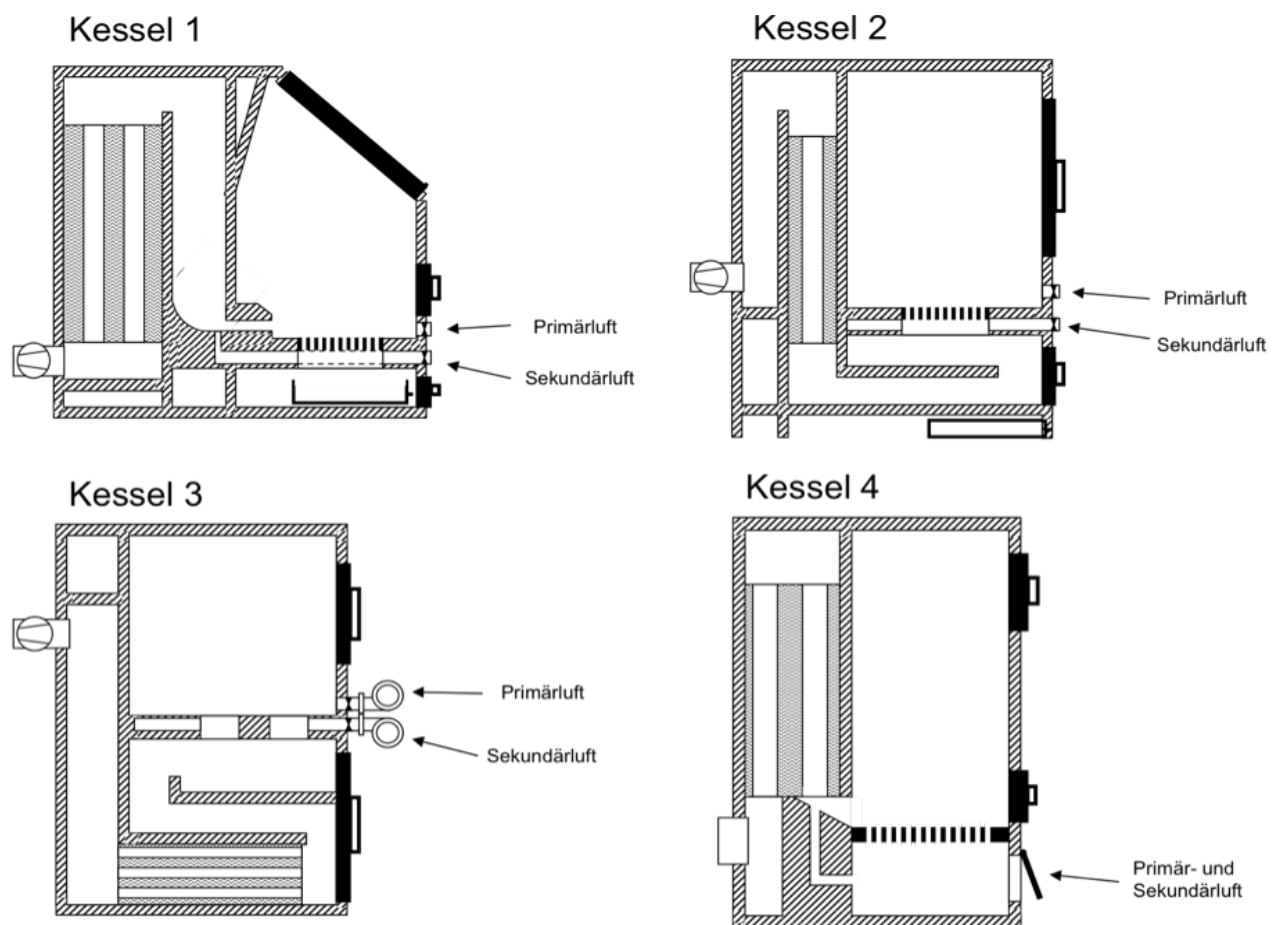


Bild 3.4 Schemata der untersuchten Stückholzkessel.  
 Kessel 1 und 4: Unterer seitlicher Abbrand, Kessel 2 und 3: Sturzbrand.  
 Kessel 1 bis 3: Moderne Kessel nach Stand der Technik 2010.  
 Kessel 4: Alter Kessel mit einfacher Feuerungs- und Regeltechnik, nicht mehr Stand der Technik.

### 3.5 Anfeuerungsprozedur und Brennstoff

Um eine gute Reproduzierbarkeit der Startphase zu gewährleisten, wurde die Anfeuerungsprozedur speziell gewählt. So wurden die Betriebsanweisungen der Hersteller mit dem aktuellen Wissensstand über 'Richtig Anfeuern' [7] kombiniert. Als Anfeuermodul von rund 1.3 kg wurden handelsübliche Kanthölzer (Fichte/Tanne) mit einer Kantenlänge von 48 mm x 24 mm und einer Länge von 30 cm bis 50 cm je nach Kessel (Bild 3.5) verwendet. Zum Anzünden wurden zwei bis drei Anzündhilfen aus wachsgetränkter Holzwolle verwendet. Die Anzündhilfen sollen dabei für eine gleichmässige Ausbreitung der Flammen über den ganzen Rostbereich sorgen. Auf das Anfeuermodul wurden erst gespaltene oder kleinere Holzscheiter aufgeschichtet, anschliessend die normalen Holzscheiter. Für die gesamte Versuchsreihe wurden Buchenscheite mit einer Länge von 50 cm und einem Wassergehalt von rund 13 Gew.-% verwendet. Für die Versuche wurde der Füllschacht jeweils mindestens zu 75 Prozent oder komplett gefüllt, dies entsprach je nach Kessel einer Füllmenge von 35 kg bis 50 kg.

Die zeitliche Abfolge von Anzünden, Starten des Abgasgebläses und Schliessen der Kesseltüre variierte je nach Kessel. Bei Kessel 1 und 2 musste die Kesseltüre nach Überschreiten einer vorgegebenen Abgastemperatur geschlossen werden. Bei Kessel 3 und 4 erfolgte das Schliessen der Kesseltüre, sobald eine ausreichende Flammenausbildung im Brennraum zu beobachten war.

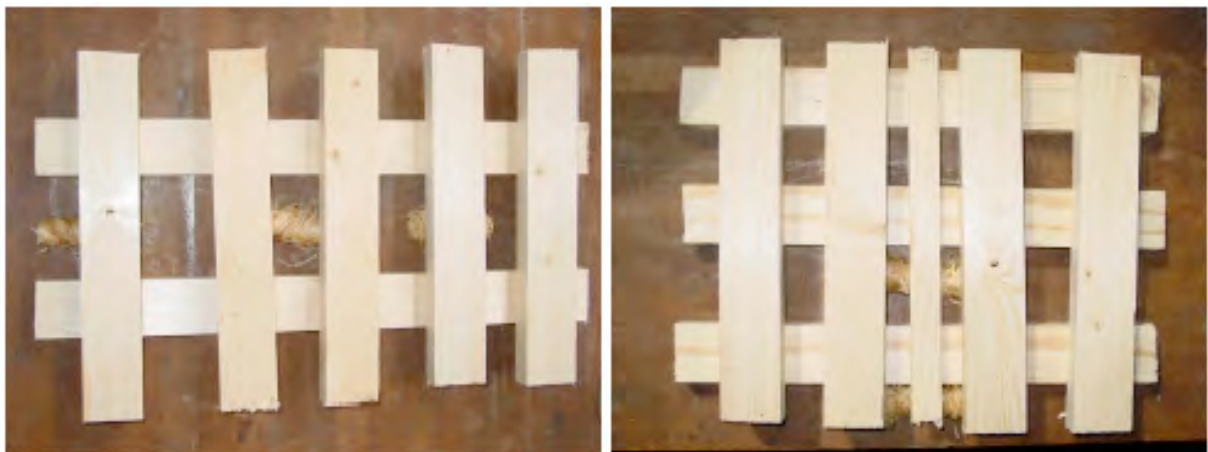


Bild 3.5 Anfeuermodul mit Anzündhilfe bei Sturzbrand (links) und unterem seitlichen Abbrand (rechts).

## 3.6 Messprozedere

### 3.6.1 Einzelabbrand mit Startphase

Bei Versuchen mit einem einzelnen Abbrand wurde das Messprozedere gemäss Bild 3.6 gewählt. Damit konnte einerseits die Startphase erfasst und charakterisiert werden, andererseits konnten Emissionen und Frachten von Startphase, stationärer Betriebsphase und Ausbrand in Bezug zueinander gebracht werden.

Die gravimetrische Staubbmessung (SP) in der Startphase wurde mit dem Einschalten des Abgasventilators gestartet. Um eine zeitlich aufgelöste Information zum Gesamtstaub während der Startphase zu erhalten, wurden jeweils drei aufeinanderfolgende Probenahmen mit einer Dauer von je 15 Minuten durchgeführt. Die erste Probenahme wurde mit dem Einschalten des Abgasventilators gestartet. Im stationären Betriebszustand bei konstanten Abbrandbedingungen (Abgastemperatur und  $O_2$ -Gehalt annähernd konstant) wurde eine 30-minütige Probenahme vorgenommen. Der Beginn des Ausbrands wurde mit dem Verhältnis von  $CO_2$ -Gehalt [Vol.-%] zu  $CO$ -Gehalt [Vol.-%]  $\leq 10$  definiert und während des Ausbrands ebenfalls eine 30- bis 45-minütige Probenahme vorgenommen. Bei ausgewählten Versuchen wurde zusätzlich zur gravimetrischen Gesamtstaubbmessung eine Kondensatmessung durchgeführt.

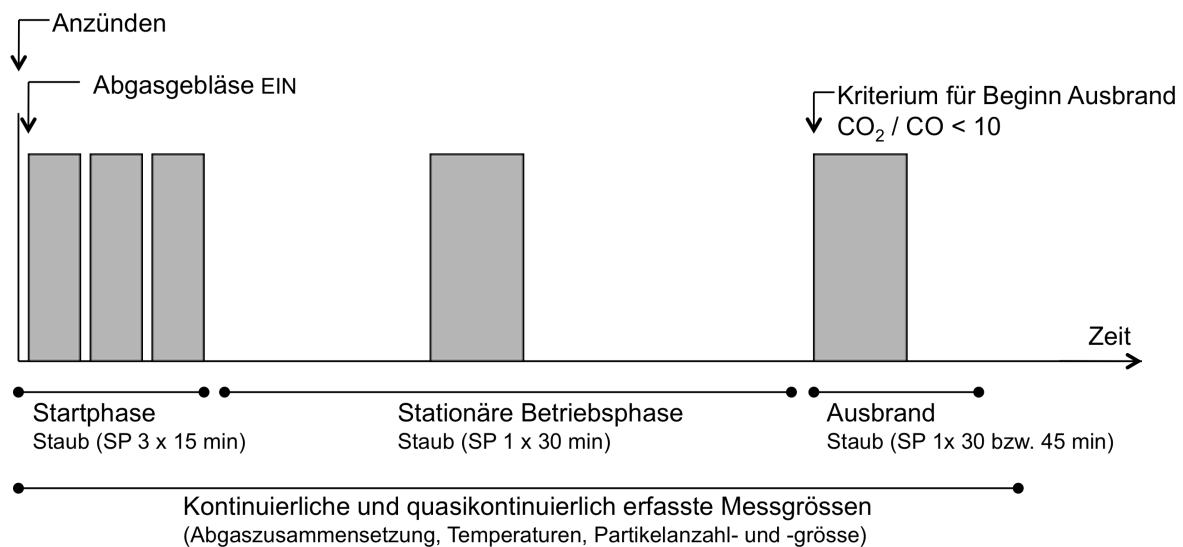


Bild 3.6 Verlauf der Messungen in der Startphase, der stationären Betriebsphase und im Ausbrand. Die gravimetrische Staubbmessung erfolgt in der Startphase nach dem Einschalten des Kesselgebläses, im stationären Betriebszustand bei konstanten Abbrandbedingungen und im Ausbrand, sobald das Verhältnis von  $CO_2/CO < 10$  wird.

### 3.6.2 Zwei aufeinanderfolgende Abbrände nach EN 303-5

Bild 3.7 zeigt das Messprozedere für Versuche mit zwei aufeinanderfolgenden Abbränden gemäss Typenprüfung nach EN 303-5 und die zeitliche Verteilung der vier gravimetrischen Staubmessungen. Nach EN 303-5 wird bei der Typenprüfung mit einer ersten Brennstoffcharge eine Grundglut aufgebaut. Die eigentliche Prüfung umfasst zwei darauf folgende Abbrände, die unmittelbar mit dem ersten Nachlegen auf die Grundglut beginnt und nach dem Erreichen der gleichen Grundglut ein weiteres Nachlegen umfasst und schliesslich wieder bis zum Erreichen der Grundglut dauert. Insgesamt werden in einer Typenprüfung somit zwei Abbrände ohne Startphase und ohne Ausbrandphase bewertet.

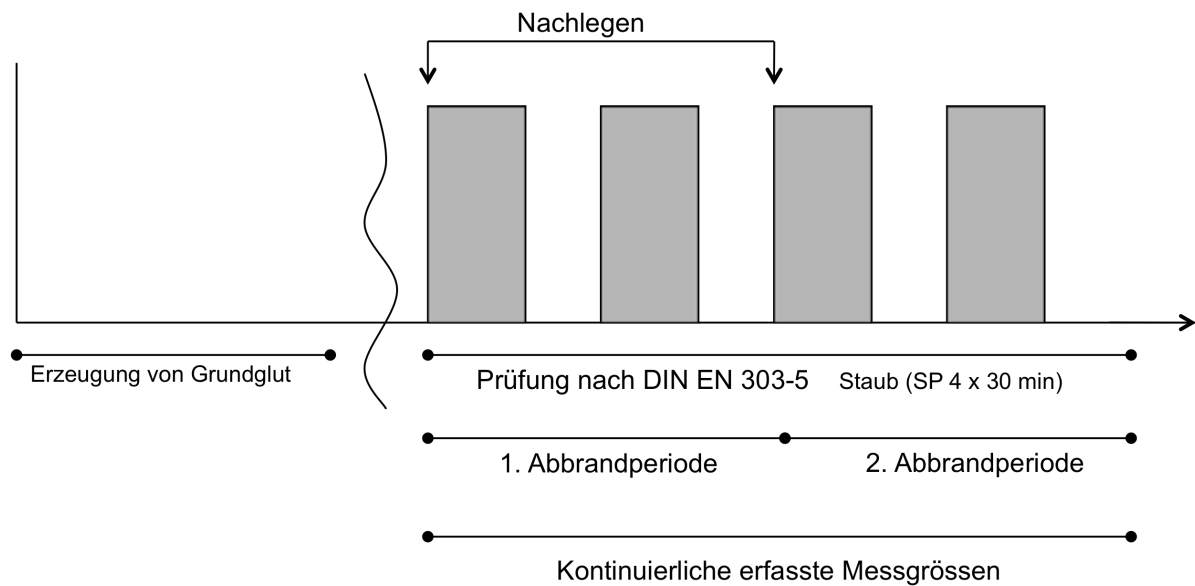


Bild 3.7 Messprozedere für Versuche mit zwei aufeinanderfolgenden Abbränden nach EN 303-5.

## 3.7 Untersuchte Betriebszustände

### 3.7.1 Startphase

In Tabelle 3.1 sind die untersuchten Betriebszustände der Kessel zusammengefasst. Um den Beginn und das Ende der Startphase festzulegen, erfolgte die Staubmessung dreimal in einem Intervall von je 15 Minuten. Die erste Messung startete mit dem Einschalten des Kesselgebläses bzw. bei Anstieg der Abgastemperatur und des Abgasvolumenstroms. Aus früheren Messungen wurde angenommen, dass die Startphase nach 45 Minuten abgeschlossen ist. Die Messungen innerhalb der Startphase (Kesseltemperatur auf  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  gehalten) beginnen mit dem Anzünden des Brennmaterials im Füllschacht. Die kontinuierlichen Analysen wurden ab Beginn des Anzündens bis Ende des Abbrandes aufgezeichnet.

### 3.7.2 Stationäre Betriebsphase und Ausbrand

Zur Beurteilung der Gesamtfracht im Verhältnis zu derjenigen während der Startphase wurden Staubmessungen in der stationären Betriebsphase sowie im Ausbrand durchgeführt. Die Probenahmedauer einer Staubmessung dauerte in der stationären Betriebsphase 30 Minuten. Im Ausbrand wurde eine Dauer von 45 Minuten oder bei kürzerer Ausbranddauer von 30 Minuten vorgesehen (Bild 3.6).

### 3.7.3 Typenprüfung nach EN 303-5

Bevor die Typenprüfung beginnen kann, muss der Heizkessel, unter Verwendung einer vollen Brennstoffcharge, auf stationäre Betriebsbedingungen gebracht werden. Der erste Abbrand dient dem Aufbau einer Grundglut. Die Prüfperiode beginnt nach dem Sicherstellen der Grundglut mittels Wägung des Kessels oder durch visuelle Beurteilung des Glutbetts. Der Versuch beginnt unmittelbar nach dem Auflegen des Brennstoffs auf die Grundglut. Die Versuchszeit dauert vom Nachlegen bis zum Wiedernachlegen. Dabei sind das Nachlegen und das Schüren in der Versuchszeit enthalten.

Die Bestimmung der Emissionen bei Nenn-Wärmeleistung erstreckt sich für handbeschickte Heizkessel über zwei aufeinanderfolgende Abbrandperioden (Bild 3.7). Das Nachlegen zwischen den beiden Abbrandphasen ist in den Messergebnissen enthalten. Der Gehalt an  $\text{CO}_2$  bzw.  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{KW}$  und  $\text{NO}_x$  wird über die gesamte Prüfdauer gemittelt. Zur Bestimmung des Staubgehalts werden in beiden Abbrandperioden je zwei Staubmessungen durchgeführt. Beide Abbrandperioden werden dazu in zwei gleiche Zeitabschnitte geteilt. Die Messungen zur Bestimmung des Staubgehalts beginnen jeweils am Anfang eines Zeitabschnitts, wobei die erste Messung unmittelbar nach dem Auflegen des Brennstoffs und dem Schliessen der Füllraumtüre beginnt. Die Probenahmedauer je Filter wird auf 30 Minuten begrenzt. Der Staubgehalt wird somit aus mindestens vier gleichmässig verteilten Halbstundenwerten gemittelt [2].

## **3.8 Weitere Einflüsse auf die Startphase**

### **3.8.1 Einfluss des Kaminzugs**

Die Kaminanlage im Labor ermöglicht die Vorgabe des Kaminzugs. Im normalen Betrieb wurden die untersuchten Stückholzkessel jeweils in allen Betriebsphasen mit einem Unterdruck von 12 Pa betrieben. Zur Untersuchung des Einflusses des Kaminzugs wurde dieser in einigen Versuchen während der Startphase bzw. während der ersten 60 Minuten auf 60 Prozent entsprechend 7 Pa eingestellt.

### **3.8.2 Einfluss der Kesseltemperatur**

Während der normalen Startphase eines kalten bzw. ausgekühlten Kessels betrug die Kesseltemperatur rund 20°C. Zur Untersuchung des Einflusses der Kesseltemperatur auf die Startphase wurde der Kessel im Temperaturband der für die Nenn-Wärmeleistung nach EN 303-5 erforderlichen Vorlauftemperatur, also bei einer Kesseltemperatur zwischen 70°C bis 90°C angefeuert.

### **3.8.3 Einfluss der Hydraulik**

Da bei einer Typenprüfung gemäss EN 303-5 nur stationäre Betriebsphasen bei vorgegebenem Temperaturniveau geprüft werden, hat die Hydraulik dort keinen Einfluss auf die Emissionen. Bei der Startphase eines Stückholzkessels kann es jedoch eine Rolle spielen, ob der Kessel mit oder ohne Rücklaufhochhaltung betrieben wird. Um die Startphase möglichst praxisnah zu untersuchen, wurden die Stückholzkessel mit Rücklaufhochhaltung betrieben. Dies bedeutet, dass der Kessel erst dann Wärme abgibt, wenn die Rücklauftemperatur einen Sollwert von z.B. 60°C übersteigt (Bild 3.8). Zur Untersuchung des Einflusses der Hydraulik auf die Startphase wurde der Stückholzkessel zum Vergleich auch ohne Rücklaufhochhaltung betrieben (Bild 3.9). Dies hat zur Folge, dass es wesentlich länger dauert, bis die Vorlauftemperatur das erforderliche Niveau zwischen 70°C bis 90°C erreicht.

Es wurde die geregelte Wärmeabnahme mit der Basisvariante verglichen. Die Basisvariante sieht eine konstante Wärmeabnahme mit Begrenzung der Wärmeabnahme auf Kesselnennleistung vor (d.h. Zu- und Lauf Kaltwasser konstant ab  $t = 0$ ).

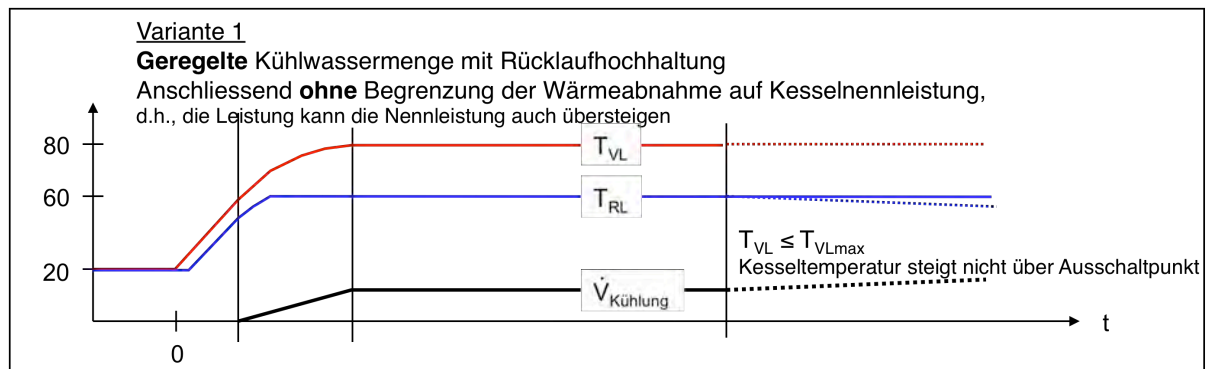


Bild 3.8 Zeitverlauf von Kesselvorlauf-, Kesselrücklauf-temperatur und Volumenstrom der Wärmeabnahme mit Rücklaufhochhaltung.

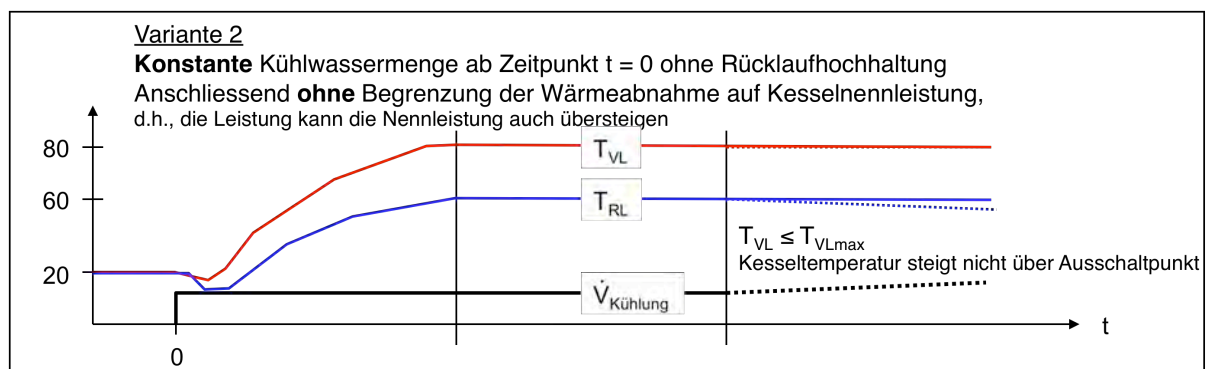


Bild 3.9 Zeitverlauf von Kesselvorlauf-, Kesselrücklauf-temperatur und Volumenstrom der Wärmeabnahme ohne Rücklaufhochhaltung.

### 3.8.4 Einfluss des Startzeitpunkt des Abgasgebläses

Weiterhin wurde der Einfluss des Kesselgebläses bzw. des Startzeitpunkts des Abgasgebläses auf das Startverhalten am Kessel 2 untersucht. Bei gutem Startverhalten wurde das Kesselgebläse 5 Minuten nach dem Anzünden gestartet. Bei späterem Einschalten des Kesselgebläses kann sich möglicherweise eine stärkere Grundglut ausbilden, welche zu verminderten Emissionen während des Abbrands führt. Dieses Verhalten wird durch Einschalten des Kesselgebläses nach 10 Minuten überprüft. Um den Einfluss aufzuzeigen, wurden die CO-Emissionen während der ersten 60 Minuten untersucht.

### 3.9 Methoden zur Auswertung der Messdaten

Eine korrekte Auswertung kontinuierlich erfasster Emissionswerte bei nicht konstanten Bedingungen setzt eine kontinuierliche Messung des Abgasvolumenstroms (oder gegebenenfalls des Zuluftvolumenstroms) voraus ([15] und [16]). In der vorliegenden Untersuchung wurden der Abgasvolumenstrom gemessen und mit dem Volumenstrom gewichtete Auswertungen durchgeführt und die so bestimmten Messdaten auf die Bezugsgrösse von 13 Vol.-% O<sub>2</sub> nach Luftreinhalte-Verordnung umgerechnet. Diese Methode liefert einen Wert, der identisch ist mit dem aus einem Abbrand gesammelten Abgas, in dem schliesslich eine Messung der resultierenden Konzentrationen vorgenommen wird. In der EN 305-3 ist die Messung des Abgasvolumenstroms nicht vorgesehen. Allerdings erfolgt die Messung bei stationären Betriebsbedingungen, so dass auch ohne Kenntnis des Abgasvolumenstroms eine sinnvolle Auswertung möglich ist.

Da jedoch in der vorliegenden Untersuchung die Startphase mit potenziell variablen Bedingungen im Vordergrund steht, stellt sich die Frage, wie eine geeignete Auswertung ohne Messung des Abgasvolumenstroms erfolgen soll. Ziel ist ein Vorgehen, das der korrekten, mit dem Abgasvolumenstrom gewichteten Methode möglichst nahe kommt und grosse Fehler vermeidet. Aus diesem Grund erfolgt in der Untersuchung ein Vergleich verschiedener Auswertemethoden. Die in Frage kommenden Methoden sind in [15] und [16] beschrieben und in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Schadstoffkonzentration, führen je nach Abbrandverhalten zu unterschiedlichen Resultaten.

Tabelle 3.2 Berechnungsmethoden zur Normierung und Mittelwertbildung [16].

Methode A: Messdaten gewichten mit Abgasvolumenstrom (korrekte Methode)

Methode B: Messdaten normieren und anschliessend mitteln

Methode C: Messdaten mitteln und anschliessend normieren.

Methode		Berechnungsgleichung
<b>Gewichtete Mittelwertbildung</b>		
A	CO und Lambda: gewichteter Mittelwert (ausführlich)	$\overline{CO}_{norm, norm} = \frac{21}{100 A \lambda_{norm}} \frac{\int CO(t) \dot{V}_{Atr}(t) dt}{\int \dot{V}_{Atr}(t) dt} \left[ \frac{100 \int \dot{V}_{Atr}(t) dt}{\int [CO(t) + CO_2(t)] \dot{V}_{Atr}(t) dt} + \left( A - 1 - \frac{\int [CO(t)] \dot{V}_{Atr}(t) dt}{2 \int [CO(t) + CO_2(t)] \dot{V}_{Atr}(t) dt} \right) \right]$
A <sub>vereinfacht</sub>	CO und Lambda: gewichteter Mittelwert (vereinfacht)	$\overline{CO}_{norm, norm} = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_{norm}} \overline{CO}_{gew} = \frac{21}{A \lambda_{norm}} \frac{\int CO(t) \dot{V}_{Atr}(t) dt}{\int [CO(t) + CO_2(t)] \dot{V}_{Atr}(t) dt}$
<b>1. Normierung, 2. Mittelwertbildung</b>		
B	CO und Lambda: Momentanwerte	$\overline{CO}_{norm} = \frac{21}{A \lambda_{norm}} \int \frac{CO(t)}{[CO_2(t)] + [CO(t)]}$
<b>1. Mittelwertbildung, 2. Normierung</b>		
C	CO und Lambda: arithmetische Mittelwerte	$\overline{CO}_{norm} = \frac{\bar{\lambda}_{arith}}{\lambda_{norm}} \overline{CO}_{arith} = \frac{21 \overline{CO}_{arith}}{A \lambda_{norm} [\overline{CO_2(t)}]_{arith} + [\overline{CO_2(t)}]_{arith}}$



Für instationäre Abbrandbedingungen, wenn weder der Holzabbrand noch die Luftzufuhr konstant sind, was zum Beispiel für die Startphase einer Naturzugfeuerung gilt, muss für eine korrekte Berechnung des Schadstoffauswurfes der Abgasvolumenstrom kontinuierlich erfasst werden. So kann eine gewichtete normierte mittlere Schadstoffkonzentration nach Methode A berechnet werden, die der Konzentration der während eines Abbrandes gesammelten Abgase entspricht.

Eine korrekte Berechnung ohne Messung des Abgasvolumenstroms ist nur möglich, wenn der Volumenstrom der trockenen Abgase proportional zum Luftüberschuss ist. Die Schadstoffkomponenten können einzeln normiert und anschliessend gemittelt werden (Methode B). In der Praxis ist diese Situation jedoch kaum zu erwarten, weshalb Methode B unüblich ist und in der Regel nicht empfohlen wird.

Eine zweite Möglichkeit zur Berechnung der Schadstoffkonzentration ohne Gewichtung mit dem Volumenstrom ist eine Mittelwertbildung der Messdaten mit anschliessender Normierung nach Methode C. Methode C liefert korrekte Resultate, wenn der Volumenstrom der trockenen Abgase konstant ist. Dies kann bei Feuerungen mit Ventilator unter gewissen Bedingungen in erster Näherung zutreffen.

Um eine mögliche Prüfung der Startphase in die bestehende Typenprüfung einzubinden ist wichtig, dass die Prüfinstitute die Möglichkeit haben, die Schadstoffkonzentration allenfalls auch ohne kontinuierliche Erfassung des Abgasvolumenstroms korrekt zu berechnen, weshalb die Abweichung zwischen der exakten und den vereinfachten Berechnungsmethoden untersucht wurden.

## 4 Resultate

### 4.1 Gute und schlechte Starts

Die Messergebnisse der einzelnen Versuche zeigen hohe Varianzen während der Startphase. Um dennoch Aussagen über das Startverhalten zu ermöglichen, wurde anhand der CO-Emissionen eine Klassierung in gute und schlechte Starts vorgenommen. Die Einteilung erfolgte an das Verhalten des jeweiligen Kessels angepasst wie folgt:

- Guter Start: geringe CO-Emissionen innerhalb der ersten 60 Minuten bzw. rasche Abnahme der CO-Emissionen nach dem Anfeuern.
- Schlechter Start mit kurzfristig hohen CO-Emissionen zu Beginn des Abbrandes, die jedoch auf ein tiefes Niveau absinken.
- Schlechter Start mit langanhaltend hohen CO-Emissionen.

Tabelle 4.1 zeigt eine Bewertung des Startverhaltens der vier untersuchten Stückholzkessel. Kessel 1 mit unterem seitlichen Abbrand zeigt in 4 von 6 Versuchen ein gutes Startverhalten, in 2 jedoch ein kurzfristig schlechtes Startverhalten. Die sehr hohen CO-Emissionen sinken jedoch immerhin vergleichsweise schnell auf das Emissionsniveau der stationären Betriebsphase ab. Die Stückholzkessel mit Sturzbrand (Kessel 2 und 3) weisen beide 3 gute und 2 schlechte Starts auf, wobei die CO-Emissionen in beiden Fällen während längerer Zeit erhöht waren. Bei beiden Kesselmodellen konnte bei schlechtem Startverhalten ein geringer Anstieg der Abgastemperatur nach Schliessen der Tür beobachtet werden. Beim alten Kessel 4 zeigen sämtliche Versuche ein Startverhalten mit hohen Emissionen, allerdings bleiben die Emissionen auch nach Abschluss der Startphase hoch, so dass der Einfluss des Starts im Gegensatz zu guten Kesseln nicht entscheidend ist.

Tabelle 4.1 Klassierung des Startverhaltens der untersuchten Stückholzkessel. Die Bewertung wurde anhand der CO-Emissionen in gute und schlechte Starts unterteilt. Schlechte Starts wurden in solche mit kurzfristig und langfristig hohen Emissionen unterteilt, wobei für kurzfristig das Intervall von 0 bis 15 Minuten und für langfristig 0 bis 60 Minuten betrachtet wurden..

	<b>Kessel 1</b> unterer seitlicher Abbrand	<b>Kessel 2</b> Sturzbrand	<b>Kessel 3</b> Sturzbrand	<b>Kessel 4</b> Sturzbrand
Anzahl Versuche	6	5	5	4
Anzahl guter Starts	4	3	3	0
Anzahl schlechte Starts (kurzfristig (0-15 Minuten) hohe CO-Emissionen)	2	0	0	0
Anzahl schlechter Starts (langfristig (0 bis 60 Minuten) hohe CO-Emissionen)	0	2	2	(4)

Bild 4.1 zeigt das gute und schlechte Startverhalten im Zeitverlauf der ersten 60 Minuten anhand von Luftüberschuss, CO-Emissionen (unterschiedliche Skala) und Abgastemperatur.

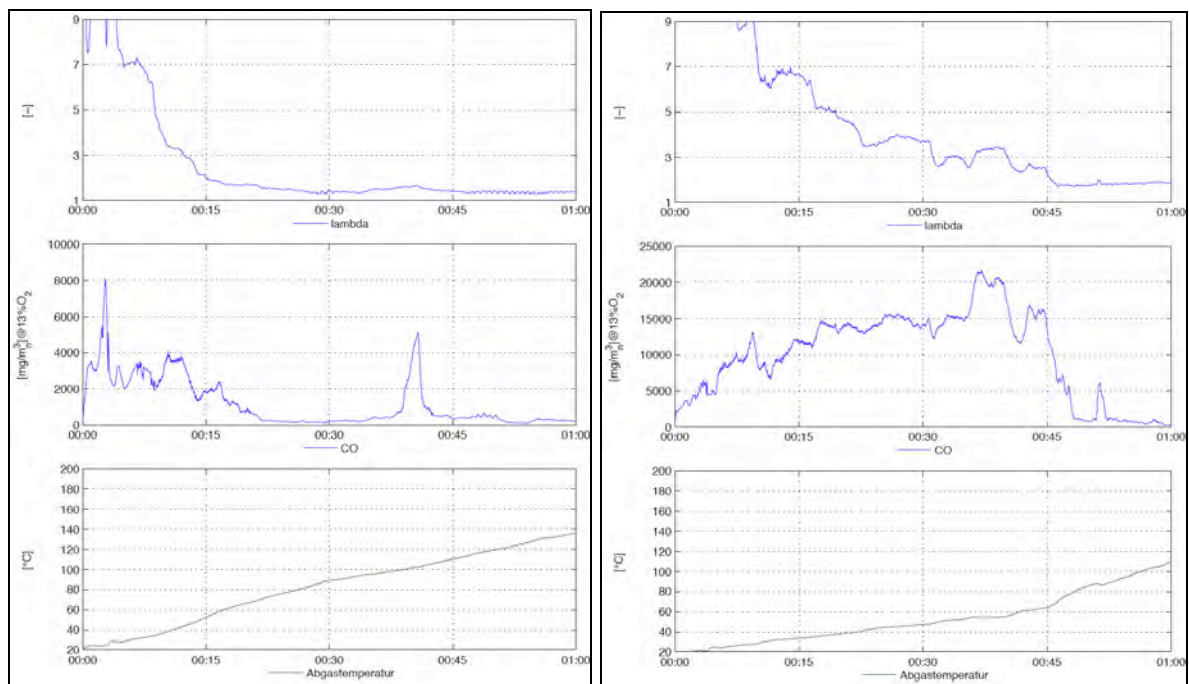


Bild 4.1 Zeitverlauf der ersten 60 Minuten eines 'guten' Starts (links) und eines 'schlechten' Starts (rechts, langanhaltend hohe CO-Emissionen) eines Stückholzkessels mit vertikalem unterem Abbrand (CO-Skala unterschiedlich).

Bild 4.2 zeigt das Startverhalten der Stückholzkessel anhand der CO-Emissionen während der Startphase. Es werden jeweils die berechneten CO-Mittelwerte für den Zeitbereich 0-15 Minuten, 0-30 Minuten, 0-45 Minuten und 0-60 Minuten dargestellt. Diese Einteilung der Zeitbereiche soll der späteren Auswahl der Mittelungsdauer für die Beurteilung des Startverhaltens und für die Festlegung möglicher Grenzwerte dienen. Tabelle 4.2 zeigt die entsprechenden CO-Mittelwerte für den jeweiligen Zeitbereich, Tabelle 4.3 zeigt die entsprechenden VOC-Mittelwerte.

Bei den drei modernen Kesseln sind die Werte bei guten Starts vergleichsweise gut reproduzierbar. Bei Kessel 1 unterschreiten sie beispielsweise bereits nach rund 20 Minuten den Wert an CO von  $2000 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ , bei Kessel 2 und 3 nach rund 30 bis 45 Minuten. Unerwarteterweise ist jedoch rund jeder dritte Start schlecht. Bei einem schlechten Start zeigen Kessel 2 und 3 ein sehr kritisches Startverhalten, die CO-Emissionen sind auch nach 60 Minuten noch über  $4000 \text{ mg/m}^3$ . Bei Kessel 1 traten auch schlechte Starts auf, die Phasen mit hohen Emissionen waren jedoch kürzer, das Startverhalten somit weniger kritisch. Nur während der ersten 15 Minuten sind die CO-Emissionen hoch, nach rund 30 Minuten sind sie unter  $4000 \text{ mg/m}^3$  und nach 45 Minuten unter  $2000 \text{ mg/m}^3$ .

Der alte Kessel 4 zeigt nur schlechte Starts. Nach einer anfänglichen Abnahme der CO-Emissionen ist nach rund 45 Minuten wieder eine Zunahme zu beobachten. Dies wird auf Luftmangel zu Beginn der stationären Betriebsphase zurückgeführt.

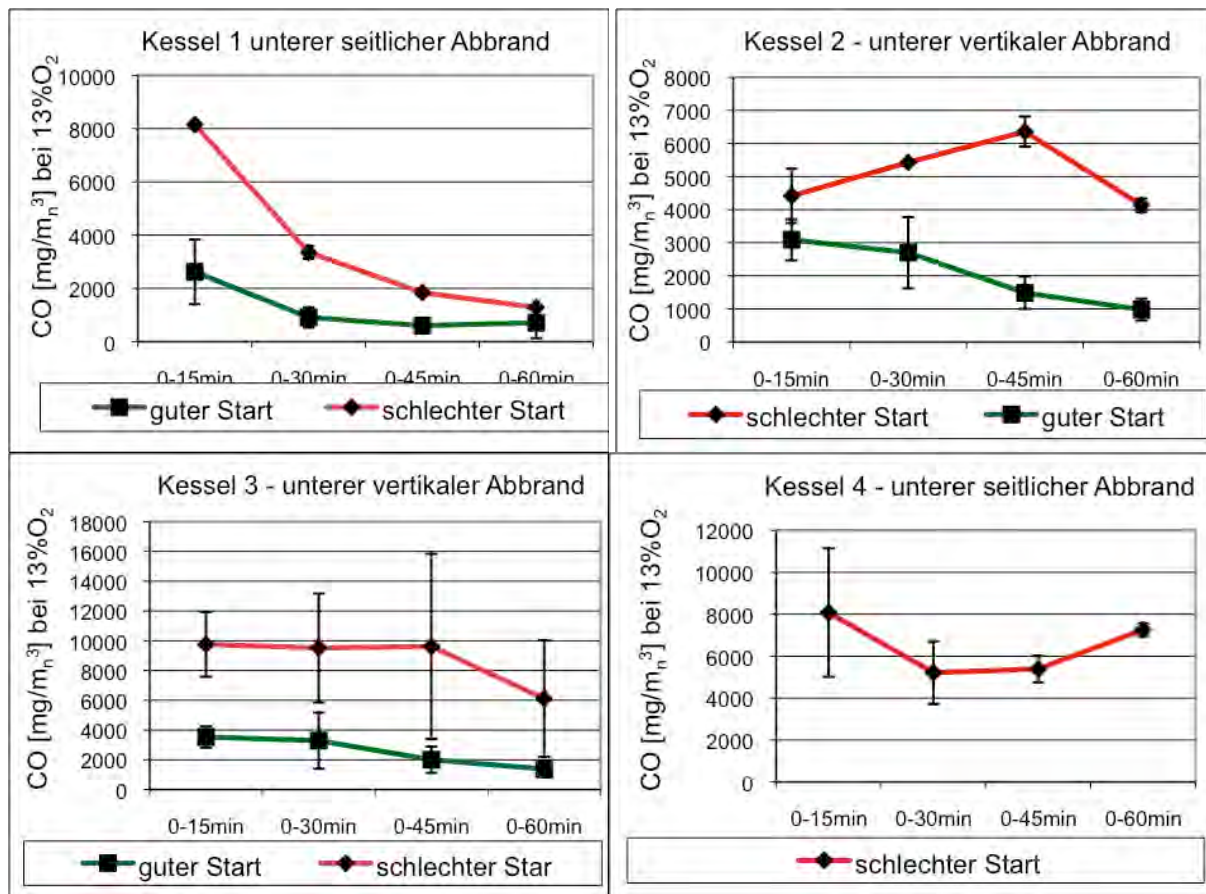


Bild 4.2 CO-Emissionen während der Startphase. Dargestellt sind die CO-Emissionen der einzelnen Kessel, wobei die ersten 60 Minuten der Startphase in vier Intervalle von jeweils 0-15, 0-30, 0-45 und 0-60 Minuten aufgeteilt wurden. Zu jedem Intervall ist der Mittelwert der CO-Emissionen und dessen Varianz dargestellt, unterteilt in Versuche mit gutem Startverhalten (grün) und Versuche mit schlechtem Startverhalten (rot).

Tabelle 4.2 CO-Emissionen der Startphase als Mittelwerte von 0 – 15, 0 – 30, 0 – 45 und 0 – 60 Minuten für Kessel 1 – 4 mittels Berechnungsmethode C (Normierung der Mittelwerte).

Kessel	Startverhalten	CO			
		[mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei 13 Vol.-% O <sub>2</sub>			
		0- 15 min	0- 30 min	0- 45 min	0- 60 min
1	gut	2619	911	601	710
	schlecht	8152	3352	1840	1283
2	gut	3088	2699	1485	976
	schlecht	4416	5426	6359	4131
3	gut	3531	3285	2005	1377
	schlecht	9755	9517	9617	6115
4	schlecht	8079	5219	5386	7264

Tabelle 4.3 VOC-Emissionen der Startphase als Mittelwerte von 0 – 15, 0 – 30, 0 – 45 und 0 – 60 Minuten für Kessel 1 – 4 mittels Berechnungsmethode C (Normierung der Mittelwerte).

Kessel	Startverhalten	VOC			
		[mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei 13 Vol.-% O <sub>2</sub>			
		0- 15 min	0- 30 min	0- 45 min	0- 60 min
1	gut	363	129	81	89
	schlecht	1326	568	323	230
2	gut	560	279	149	101
	schlecht	1073	908	1035	600
3	gut	657	390	216	154
	schlecht	2881	2284	1945	1187
4	schlecht	2054	866	679	784

Zusammenfassend wurden folgende Beobachtungen gefunden:

- Beim Startverhalten der drei modernen Stückholzkessel zeigen sich zwei Klassen; gute Starts und schlechte Starts.
- Bei einem guten Start sind die Emissionen bereits nach rund 30 Minuten niedrig.
- Gute Starts sind vergleichsweise gut reproduzierbar. Nach 30 Minuten liegen die CO-Emissionen im kumulierten Mittel unter 4'000 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>.
- Bei einem schlechten Start kann die Startphase über 60 Minuten dauern. Trotz Anfeuern nach Bedienungsanleitung ergab sich bei rund jedem dritten Start eine schlechte Startphase.
- Schlechte Starts sind unbedingt zu verhindern. Die Gründe für den hohen Anteil an schlechten Starts sind unklar. Es ist offen, ob der in den vorliegenden Messungen gefundene grosse Anteil schlechter Starts typisch oder untypisch ist und ob dieser durch bessere Kenntnis der jeweiligen Geräte verringert werden kann. In den Untersuchungen konnte keine Systematik der schlechten Starts gefunden werden.

## 4.2 Schadstofffrachten

Bild 4.3 zeigt die prozentuale Aufteilung der gesamten emittierten Frachten und umgesetzten Brennstoffmengen für die Startphase, die stationäre Betriebsphase und den Ausbrand, gemittelt über alle Versuche mit einem einzelnen Abbrand. Kessel 1, 2 und 3 verhalten sich für die einzelnen untersuchten Emissionen analog. Der alte Kessel 4 verhält sich dagegen atypisch, da sich die Gesamtluftklappe in der stationären Betriebsphase periodisch öffnet und schliesst.

Lediglich 10% bis 20% der CO-Fracht werden während der Startphase emittiert. Der grösste Teil der CO-Fracht wird im Ausbrand freigesetzt. Die drei modernen Kessel weisen einen ähnlichen Verlauf der CO-Emissionen auf. Für den alten Kessel 4 entsprechen die CO-Emissionen 6,6 kg normiert auf einen Abbrand mit 50 kg Brennstoff, während die modernen Kessel mit durchschnittlich 1,1 kg rund 6-mal weniger CO emittieren.

Rund 60% bis 85% der gesamten VOC-Fracht werden während der Startphase freigesetzt. Die im VOC enthaltenen NMVOC stellen eine potenziell geruchsbelästigende und gesundheitsrelevante Wirkung dar. Geruchsbelästigung tritt somit vor allem während der Startphase auf. Für Kessel 4 entsprechen die VOC-Emissionen 643,1 g normiert auf 50 kg Brennstoff, während für Kessel 1 bis 3 lediglich 33,8 g VOC in einem Abbrand emittiert werden, also rund 20-mal weniger. Der hohe Anteil von VOC während der Startphase wird auch im zeitlichen Verlauf der Schadstofffrachten (Bild 4.5) deutlich.

Da die gravimetrische Feststoffmessung (SP) nicht kontinuierlich erfolgen kann, wird zur Berechnung der kumulierten Fracht der Feststoffe die aus der kontinuierlich erfassten Anzahlkonzentration und Korngrössenanalyse berechnete Partikelmasse (PM) verwendet. Die Feststofffrachten unterscheiden sich je nach Kesselmodell deutlich. In der Startphase werden rund 10% bis 30% der Feststoffe freigesetzt, in der stationären Betriebsphase wird die grösste Feinstaubmenge freigesetzt. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen weisen ebenfalls die höchste Fracht (ca. 90 %) während der stationären Betriebsphase auf.

Bild 4.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der kumulierten Frachten eines einzelnen Abbrands mit gutem Start bei Kessel 1. Bei CO werden rund 90% der emittierten Fracht in der Ausbrandphase freigesetzt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Sekundärluftklappe im Ausbrand vollständig geschlossen wird, um eine Auskühlung des Kessels zu vermeiden. Gerade umgekehrt verhält es sich bei VOC, rund 70 % der emittierten Fracht werden in der Startphase freigesetzt. Bei den Feststoffen werden rund 30% der Fracht in der Startphase freigesetzt. In Bild 4.5 sind auch die kumulierten Feststofffrachten von Kessel 2 und 3 dargestellt.



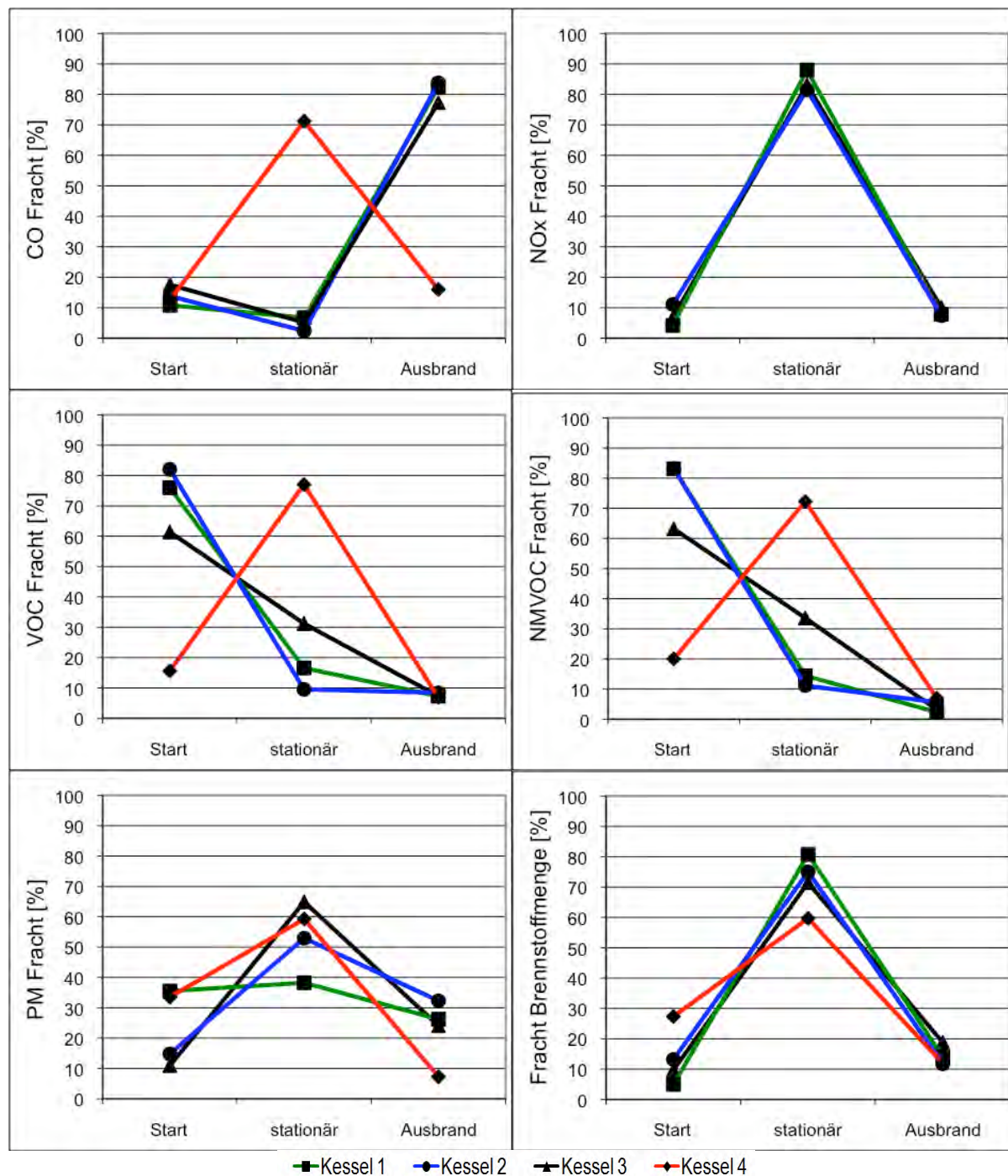


Bild 4.3 Aufteilung der Gesamtfracht der Emissionen von Einzel-Abbränden der untersuchten Kessel in Start, stationär und Ausbrand. Kessel 1 (grün), Kessel 2 (blau), Kessel 3 (schwarz) und Kessel 4 (rot). Mittel über mehrerer Versuche mit Einzelabbrand. Die Dauer der Startphase ist kesselspezifisch, als Ende wurde definiert, sobald die Emissionen das tiefere Emissionsniveau erreichten, das während der stationären Betriebsphase anschliessend während längerer Zeit aufrecht erhalten wurde.

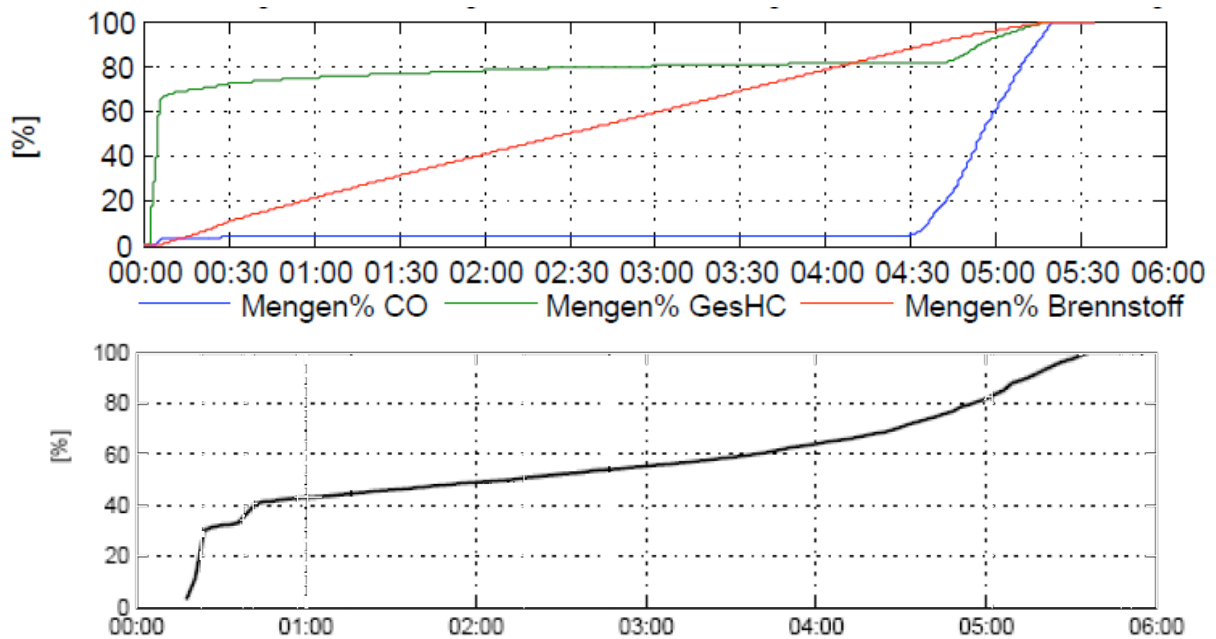


Bild 4.4 Kumulierte Frachten im Verlauf eines einzelnen Abbrands bei Kessel 1 mit gutem Start.  
oben: CO, Gesamt-Kohlenwasserstoffe VOC und Brennstoff;  
unten: Feststoffe (PM, berechnet aus Anzahlkonzentration und Korngrößenanalyse SMPS /OPC).

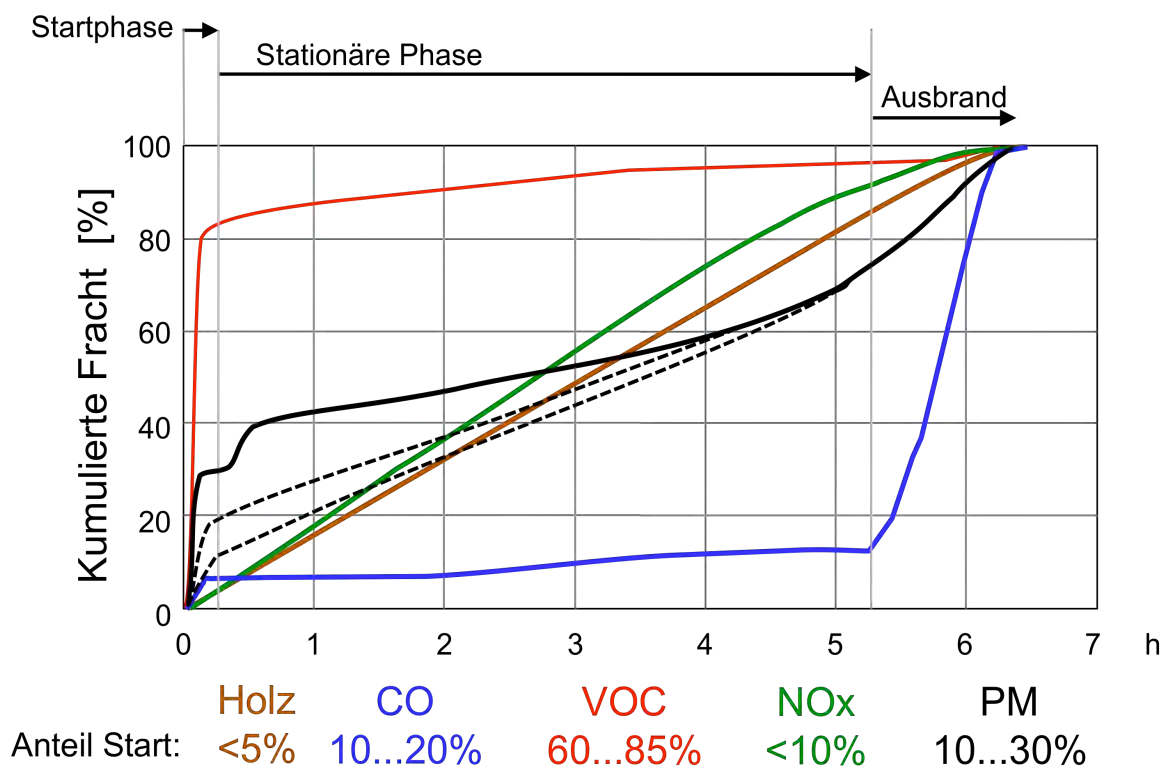


Bild 4.5 Zeitverlauf der Frachten eines Abbrands von Kessel 1 (unterer seitlicher Abbrand, guter Start). sowie der Frachten für Feinstaub (PM) aus der Anzahlkonzentration von SMPS und OPC von Kessel 2 und 3 (gestrichelt).



Zusammenfassend wurden folgende Beobachtungen gefunden:

- Die Frachten an VOC und auch an NMVOC der Startphase machen rund 60% bis 90% der Gesamtfracht aus und sind damit von grosser Relevanz. Bei einem schlechten Start wird im Vergleich zu einem guten Start in der Startphase rund die 5-fache Masse an VOC freigesetzt.
- Anstelle der gravimetrischen Feststoffe wird die aus der Anzahlkonzentration und Korngrössenanalyse berechnete Fracht an Partikeln beurteilt. Der Anteil der Startphase macht bei den drei modernen Stückholzkesseln zwischen rund 10% und 30% aus. Die Startphase ist damit für die Partikelemissionen weniger wichtig als für VOC und NMVOC.
- Die CO-Frachten der Startphase sind meist nur von untergeordneter Bedeutung, da rund 80% bis 90% des CO in der Ausbrandphase freigesetzt werden.
- Die NO<sub>x</sub>-Frachten der Startphase machen nur rund 10% der Gesamtfracht aus und sind damit von untergeordneter Bedeutung.

### 4.3 Emissionen nach EN 303-5 im Vergleich zur Startphase

Um die Relevanz der Startphase zu beurteilen, werden die Emissionswerte der Startphase der modernen Kessel mit solchen aus Versuchen gemäss Typenprüfung nach EN 303-5 verglichen. Für die CO- und VOC-Emissionen der Startphase werden die Mittelwerte der ersten 30 Minuten (0 – 30 min) verwendet. Für die Feststoffemissionen der Startphase werden die Werte der ersten beiden gravimetrischen Staubbmessungen (0 – 15 min und 15 – 30 min) gemittelt. Die Emissionswerte nach EN 303-5 sind aus zwei Typenprüfungsversuchen je Kessel gemittelt. Zusätzlich werden die Emissionswerte der offiziellen Typenprüfung aufgeführt.

Bild 4.6 zeigt die Emissionen (CO, VOC und Feststoffe SP) nach EN 303-5 im Vergleich zu Emissionen während der Startphase (Mittelwert von 0 – 30 Minuten mit Berechnungsmethode C) für gute und schlechte Starts. Tabelle 4.4 zeigt den Vergleich für gute Starts.

Für die modernen Kessel sind die Feststoffemissionen (SP) in der Startphase um einen Faktor 1.4 bis 3.7 höher als nach EN 303-5. Da die Emissionswerte nach EN auf einem niedrigen Niveau liegen und lediglich geringe Unterschiede zwischen den Kesseln aufweisen, sind somit keine sicheren Rückschlüsse von der Typenprüfung auf das Startverhalten möglich. Der Vergleich der Versuche nach EN mit Emissionswerten von Prüfinstituten (Tabelle 4.4) zeigt kleine Varianzen auf. Kleine Störungen innerhalb der stationären Betriebsphasen (Bild 4.7) können diese Unterschiede hervorrufen.

Zusammenfassend wurden folgende Beobachtungen gefunden:

- Die nach EN 303-5 ermittelten Emissionen lassen keine Rückschlüsse auf das Emissionsverhalten während der Startphase zu.
- Gute Starts:
  - Feststoffe (SP) höher Typenprüfungs-Wert, Faktor 1,4 bis 3,7
  - CO und VOC höher als Typenprüfungs-Wert, Faktor rund 5 bis 10
- Schlechter Start:
  - Feststoffe (SP) höher als Typenprüfungs-Wert, Faktor rund 5 bis 10
  - CO und VOC markant höher als Typenprüfungs-Wert, Faktor rund 20 bis 200.

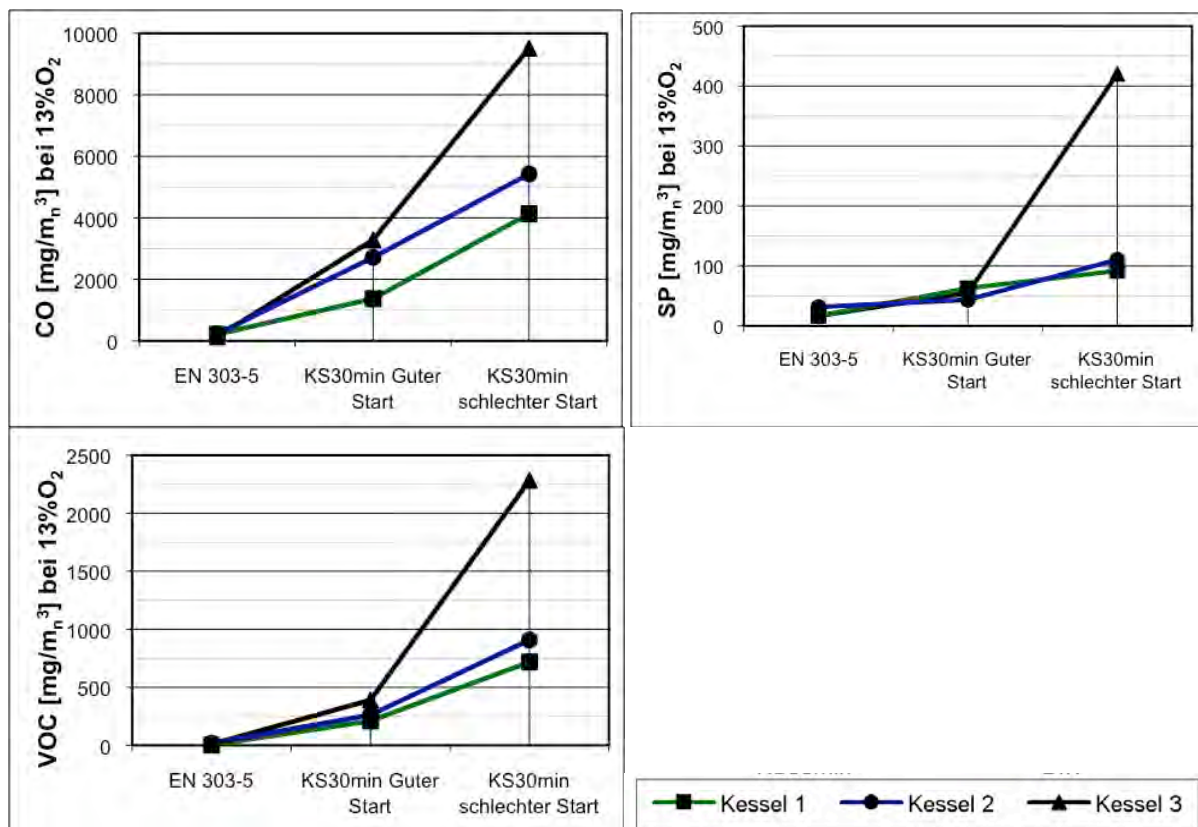


Bild 4.6 Emissionen (CO, VOC und Feststoffe SP) gemäss Typenprüfung (EN 303-5) im Vergleich zu Emissionen während der Startphase (Mittelwert von 0-30 Minuten mit Berechnungsmethode C) für gute Starts und schlechte Starts.

Tabelle 4.4 Emissionen (CO, VOC und Feststoffe SP) während der Startphase (Mittelwert von 0 – 30 Minuten mit Berechnungsmethode C) für gute Starts im Vergleich zu Emissionen nach EN 303-5. Die Ergebnisse der Versuche nach EN-303-5 wurden mit offiziellen Ergebnissen von Prüfinstituten (rot) für Kessel 1 und 2 verglichen.

<sup>1</sup>Prüfstelle: TÜV SÜD, Abteilung Feuerung- und Wärmetechnik DIN-Prüfstelle; München 2005

<sup>2</sup>Auszug aus Konformitätserklärung; 2008

Kessel	Test	CO [ $\text{mg/m}_n^3$ ] bei 13%O <sub>2</sub>	VOC [ $\text{mg/m}_n^3$ ] bei 13%O <sub>2</sub>	SP [ $\text{mg/m}_n^3$ ] bei 13%O <sub>2</sub>
1	KS <sub>30min</sub>	911	129	63
	EN 303-5	211 / 131 <sup>1</sup>	3	17 / 27 <sup>1</sup>
2	KS <sub>30min</sub>	2714	262	44
	EN 303-5	224	20	32
3	KS <sub>30min</sub>	3285	390	55
	EN 303-5	131 / 321 <sup>2</sup>	9	17 / 8 <sup>2</sup>

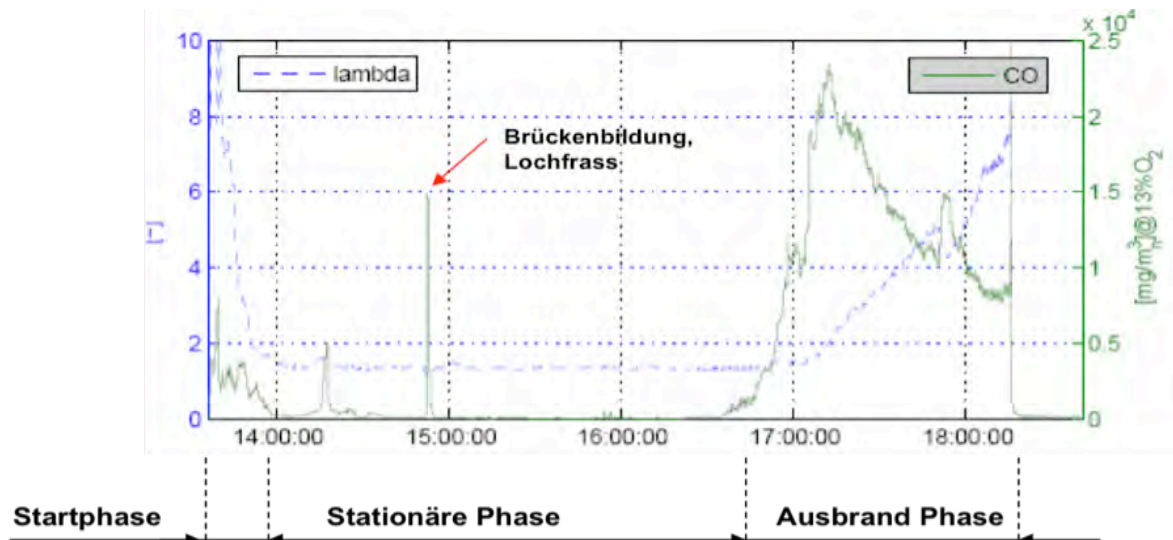


Bild 4.7 Typischer Verlauf von Lambda und Kohlenmonoxid mit Start-, stationär-, und Ausbrandphase, bei der in der stationären Phase eine kurzfristige Störung durch Brückenbildung oder Lochfrass auftrat.

## 4.4 Korrelationen zwischen Emissionen in der Startphase

### 4.4.1 Korrelationen zwischen CO, VOC, COC und Staub

Gesundheitlich besonders relevant sind die kondensierbaren organischen Substanzen COC und organische Feststoffe. Da die Messung von Kondensaten und gravimetrischen Feststoffen aufwändig ist, sind einfach zu messende Leitsubstanzen gesucht. Aus den Korrelationen in Bild 4.8 werden folgende Erkenntnisse abgeleitet:

- COC und NMVOC korrelieren in der Startphase sehr gut mit VOC.
- VOC korrelieren in der Startphase sehr gut mit CO und sind knapp einen Faktor 10 tiefer.
- Gravimetrische Feststoffe SP korrelieren in der Startphase mit CO und VOC.

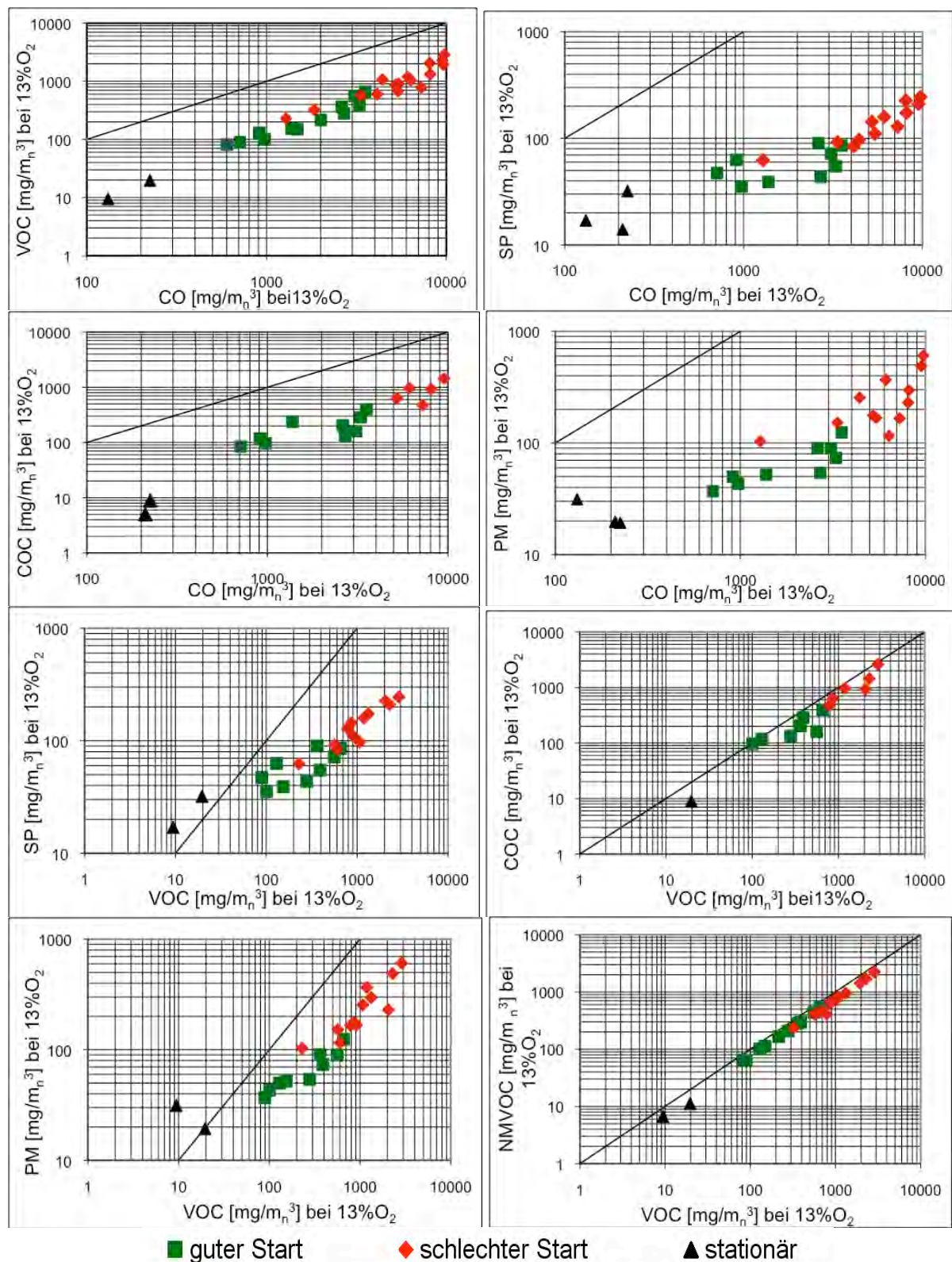
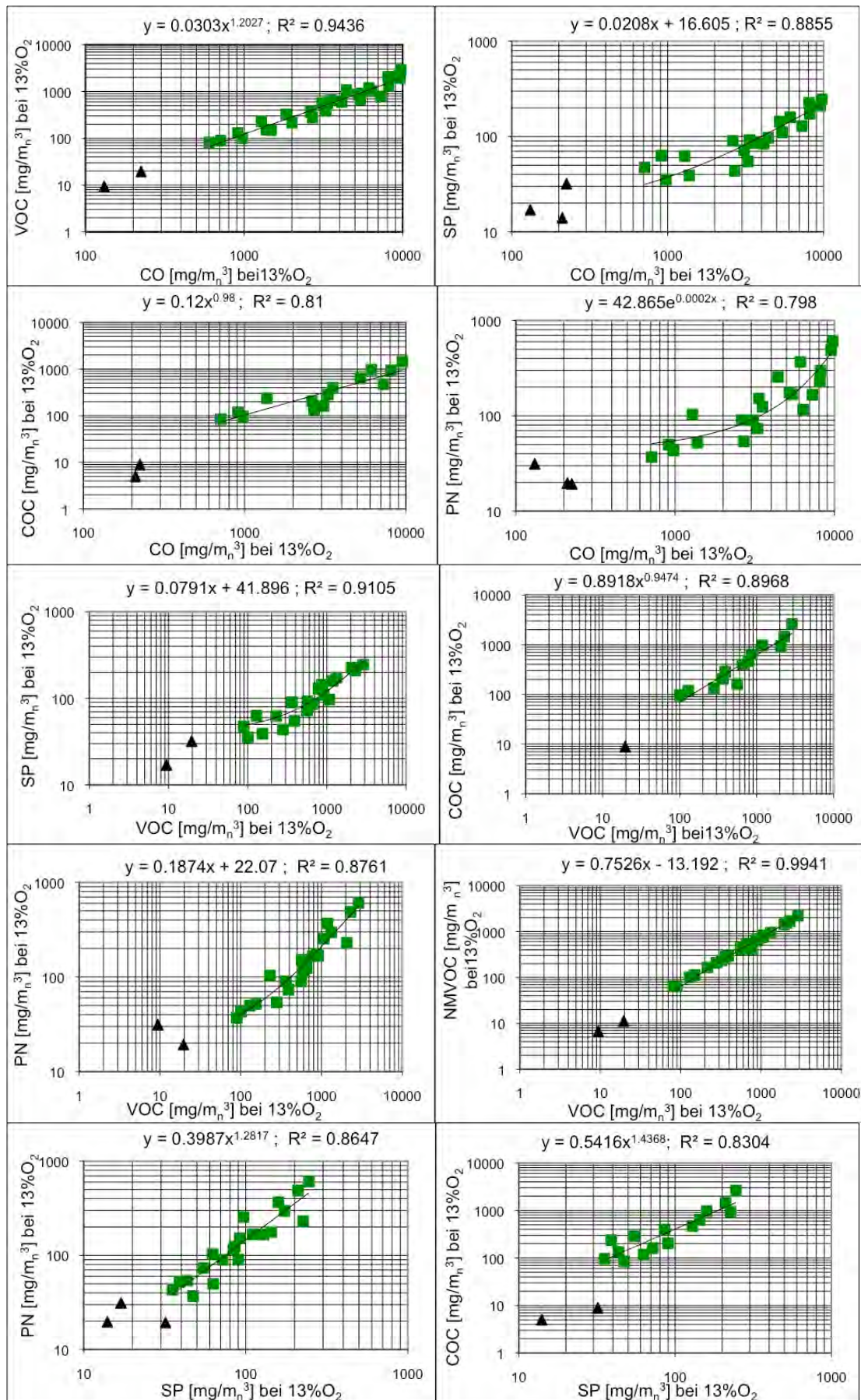


Bild 4.8 Korrelationen zwischen verschiedenen Emissionen während der Startphase aller untersuchten Stückholzkessel. Mittelwerte von 0-15, 0-30, 0-45 und 0-60 Minuten aufgeteilt in Versuche mit gutem Start (grün) und schlechtem Start (rot). Mittelwerte der stationären Phase (schwarz) zum Vergleich.





■ guter Start

◆ schlechter Start

▲ stationär

Bild 4.9 Korrelationen zwischen verschiedenen Emissionen während der Startphase aller untersuchten Stückholzkessel. Mittelwerte von 0-15, 0-30, 0-45 und 0-60 Minuten aufgeteilt in Versuche mit gutem Start (grün) und schlechten Start (rot). Mittelwerte der stationären Phase (schwarz) zum Vergleich.

Für VOC(CO) konnte eine lineare Korrelation festgestellt werden. Die CO Emissionen sind in der Regel um etwa den Faktor 10 höher als die der Kohlenwasserstoff-Emissionen, was sich auch mit früheren Erfahrungen deckt. Für SP(CO) konnte ebenfalls eine Korrelation festgestellt werden, die bei erhöhten Staubkonzentrationen besser erkennbar ist, während bei niedrigeren Staubkonzentrationen eine grössere Streuung gefunden wird (Mittelwerte von 45 und 60 Minuten). CO kann somit für die Startphase von Stückholzkesseln als qualitativer Indikator für die aus der gravimetrischen Staubbemessung gewonnenen Feststoffe (SP) genutzt werden<sup>1</sup>.

Eine Korrelation ist auch für COC(CO) und SPC(CO) Emissionen zu erkennen, wobei leichte Abweichungen einzelner Werte erkennbar sind. Dies kann auf die Messunsicherheit zurückzuführen sein, die sich aus der gravimetrischen Staubbemessung, Kondensatmessung und Analyse zusammensetzt. Da während der stationären Phase nur noch geringere Konzentration von VOC emittiert werden, liegt das Niveau der Kondensate (COC) sowie der Kondensate und Feststoffe (SPC) auf einem verhältnismässig tiefen Wert im Vergleich zur Startphase.

Die aus der Anzahlkonzentration (PN) berechnete Massenkonzentration (PM) an Feinstaub in Abhängigkeit der CO-Emissionen weist eine höhere Streuung im Bereich hoher Emissionen auf, dies ist besonders bei schlechten Starts der Fall. Für gute Starts sowie während des stationären Abbrands ist eine deutliche Korrelation erkennbar. Ebenfalls konnte eine gute Korrelation zwischen Feststoffen (SP) und Kohlenwasserstoffen (VOC) aufgezeigt werden, da auch SP und VOC mit CO korrelieren.

Zwischen Kohlenwasserstoffen und COC sowie SPC ist ebenfalls eine Korrelation erkennbar. Die Feinstaub-Emission (PM) korreliert mit den aus der Gravimetrie gewonnenen Partikeln (SP) und VOC. Es konnte ebenfalls eine sehr gute Korrelation der Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC) und VOC festgestellt werden. Der Anteil an NMVOC im VOC beträgt in der ersten Stunde eines Abbrands bei den vier verwendeten Stückholzkesseln  $75\% \pm 3\%$ . Das geruchsneutrale Methan macht demnach nur 25% der VOC aus, was bereits durch frühere Messungen gezeigt wurde.

#### 4.4.2 Zeitlicher Veraluf der Schadstoffe

Durch Überprüfung der Korrelationen als zeitlich aufgelöste Werte kann an einzelnen Versuchen gezeigt werden, dass CO und VOC bei höheren Emissionswerten, wie während der Startphase, korrelieren. Bei einem hohen CO-Ausstoss ist dies auch anhand der Feinstaub-Emissionen (PM) ersichtlich. Lediglich kleinere CO-Schwankungen sind in der Feinstaubanalyse nicht erkennbar (Bild 4.10).

#### 4.4.3 Korrelationen zwischen CO und VOC als Basis für Grenzwerte

Bild 4.11 zeigt die Mittelwerte der Massenkonzentration von VOC als Funktion der Mittelwerte von CO während der ersten 30 Minuten ab Start und während der ersten 60 Minuten ab Start. Im zweiten betrachteten Intervall sind somit die Daten des ersten Intervalls enthalten. Für beide Intervalle werden signifikante Korrelationen zwischen VOC und CO mit  $R^2 > 0,9$  gefunden, wobei in den Grafiken ein Po-

---

<sup>1</sup> Die Korrelation SP(CO) gilt zwar in der Startphase der untersuchten Stückholzkessel, sie gilt aber nicht allgemein. So werden etwa bei sehr guter Verbrennung Salze emittiert, die nicht mit CO korrelieren, sondern im Gegenteil eine gegenläufige Tendenz aufweisen. Weitere Abweichungen können durch zusätzliche Einflüsse wie die Brennstoffart oder den Verbrennungszustand verursacht werden.



tenz-Ansatz verwendet wird. Bei Betrachtung eines beschränkten Bereichs kann auch als einfache lineare Abschätzung abgeleitet werden, dass die Werte von VOC knapp 15% der CO-Werte betragen.

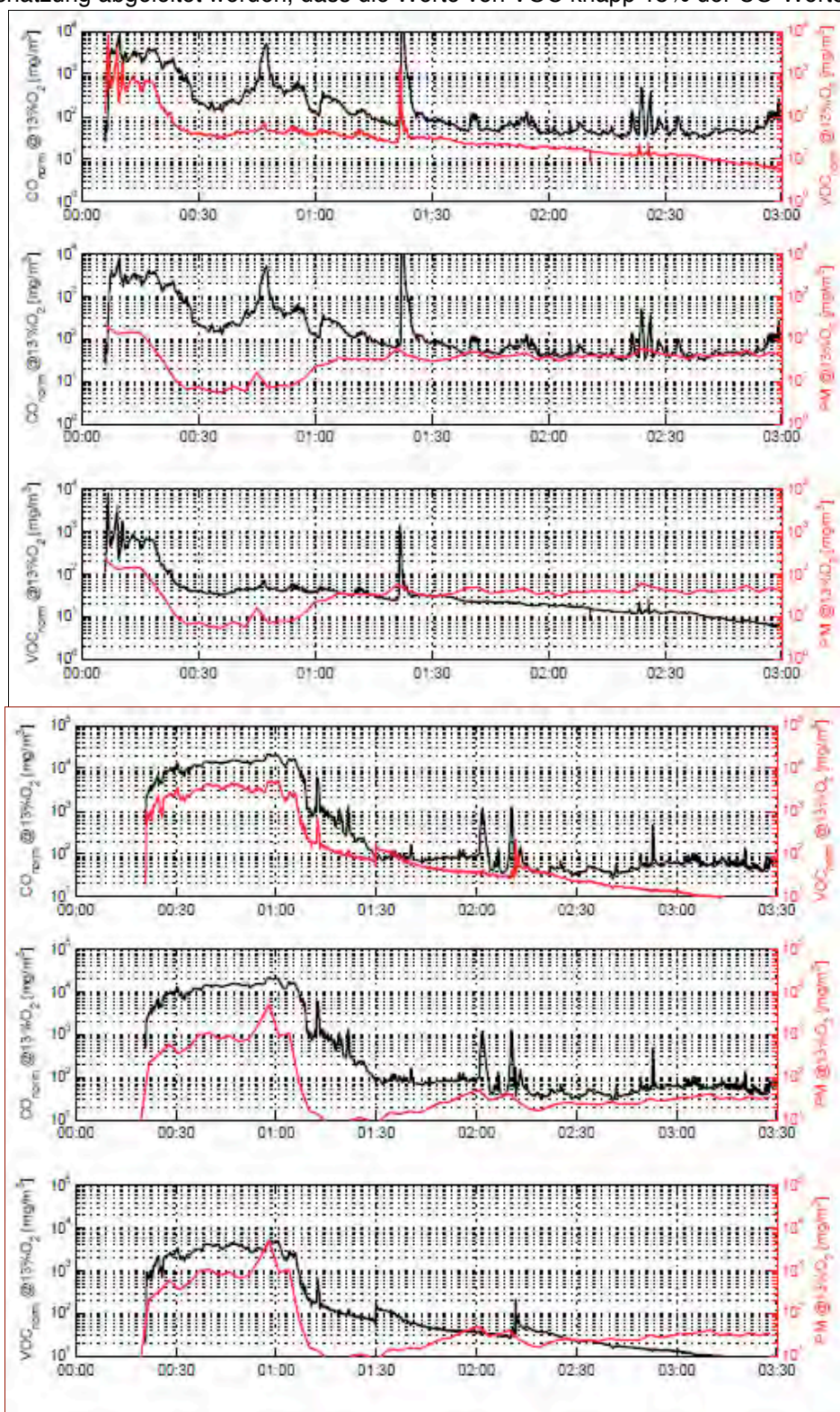


Bild 4.10 Beispiel der Überprüfung möglicher Korrelationen von CO, VOC und PM für Kessel 3 in zeitlicher Auflösung für die Start- und stationäre Phase. Dargestellt ist gutes Startverhalten (oben) und schlechtes Startverhalten (unten). Je Diagramm sind zwei Emissionen (rot und schwarz) aufgezeigt. Bei einer Korrelation der aufgezeigten Emissionen ist der Kurvenverlauf annähernd identisch bzw. um einen Faktor verschoben.

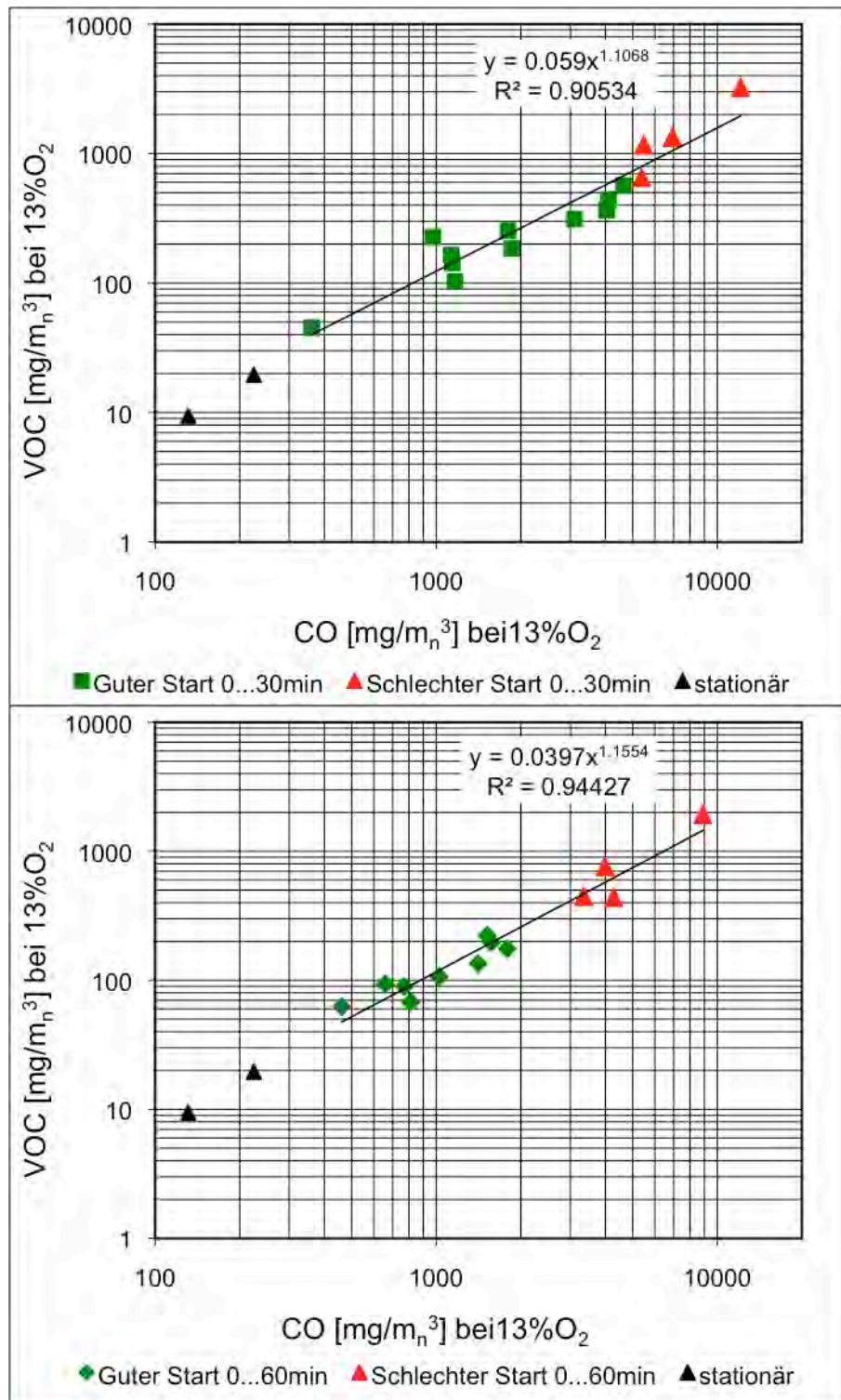


Bild 4.11 Korrelationen zwischen VOC- und CO-Emissionen während der Startphase der modernen Stückholzkessel. Versuche mit gutem Start (grün) und schlechtem Start (rot). Korrelationsfunktionen gelten für Daten der guten und schlechten Starts. Mittelwerte der stationären Phase (schwarz) zum Vergleich. Mittelwertbildung nach Methode C (zuerst mitteln und dann normieren).  
 Oben: Mittelwerte von 0 bis 30 Minuten.  
 Unten: Mittelwerte jeweils von 0 bis 60 Minuten.



## 4.5 Einfluss des Kaminzuges

Der Versuchsaufbau erlaubt es, einen Kaminzug vorzugeben und zu regeln. Es wurde der vom Kessellieferant vorgegebene Kaminzug eingestellt. In der Regel wurde der Kaminzug während der gesamten Versuchsdauer auf 12 Pa geregelt. Um den Einfluss des Kaminzugs auf die Startphase zu untersuchen, wurden die ersten 60 Minuten eines Versuchs mit auf 60% reduziertem Kaminzug, also mit ca. 7 Pa durchgeführt.

Der Einfluss eines reduzierten Kaminzugs während der Startphase wurde an allen modernen Kessel untersucht. Bild 4.12 zeigt für Kessel 1, dass die CO-Emissionen über diejenigen der schlechten Starts liegen. Anhand der zwei Versuche an Kessel 1 konnte zudem gezeigt werden, dass es sich nicht nur um ein schlechtes Startverhalten handelt, sondern dass der reduzierte Unterdruck die Emissionen leicht erhöht. Bei Kessel 2 und 3 sind die CO-Emissionen bei reduziertem Kaminzug im Gegensatz zu Kessel 1 niedriger als diejenigen der guten Starts, wobei die Werte bei Kessel 2 innerhalb der Varianz der guten Starts liegen. Bei Kessel 3 liegen die CO-Emissionen bei 7 Pa Kaminzug sogar unter der Varianz der guten Starts.

Im vorliegenden Fall wirkt sich eine Reduktion des Kaminzugs während des Starts somit für die zwei Sturzbrandkessel positiv aus, für den Kessel mit seitlichem unterem Abbrand jedoch negativ. Daraus kann zwar abgeleitet werden, dass der Kaminzug die Messung beeinflusst, die Wirkung aber positiv oder negativ und anlagenspezifisch sein kann.

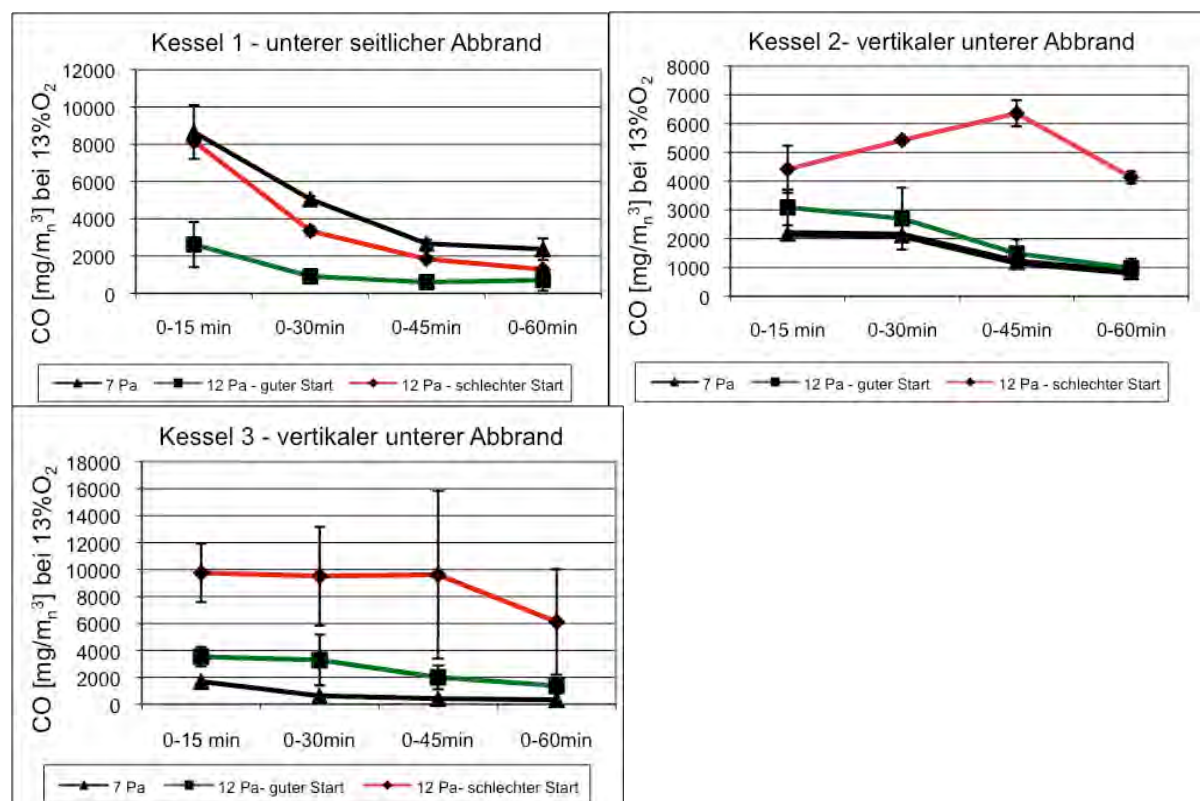


Bild 4.12 Einfluss von reduziertem Kaminzugs während der Startphase. Kumulierte Mittelwerte.

## 4.6 Einfluss der Kesseltemperatur

Die Referenzversuche wurden jeweils mit kaltem bzw. ausgekühltem Kessel durchgeführt, also mit einer Kesseltemperatur von 20 °C bis 25 °C. Um diesen Zustand zu erreichen, wurde der vom vorangegangenen Versuch betriebswarme Kessel über Nacht durch das Wärmeabnahmesystem aktiv ausgekühlt.

Um den Einfluss der Kesseltemperatur auf die Startphase zu untersuchen, wurden ausgewählte Versuche mit erhöhten Kesseltemperaturen durchgeführt (Tabelle 4.5). Dazu wurden die Kessel nicht aktiv ausgekühlt, also keine Wärme an das Wärmeabnahmesystem abgeführt. Im Weiteren war der Abgasventilator ausgeschaltet. Es erfolgte jedoch eine geringfügige 'passive' Auskühlung durch Strahlung und Konvektion über die Kesseloberfläche.

Tabelle 4.5 Kesseltemperatur bei Versuchsbeginn.

Versuch	Kessel	Kesseltemperatur bei Versuchsbeginn [°C]	Vermutete Brennkammer- temperatur bei Versuchsbeginn	Auskühldauer zum voran- gegangenen Versuch	Effekt
Referenz = kalt	1,2,3,4	20 – 25	niedrig	12 h aktiv	–
Warm	1	70 – 90	hoch	2 h passiv	kein Unterschied
	2	70 – 90	mittel	12 h passiv	deutlich besser
	3	55	mittel	12 h passiv	geringfügig besser

Bei den modernen Kesseln wurde je ein Start mit erhöhter Kesseltemperatur durchgeführt und mit dem Startverhalten des kalten Kessels verglichen. Die erhöhten Kesseltemperaturen bei Versuchsbeginn betrugen bei den Stückholzkesseln 1 und 2 rund 70 bis 90°C, bei Kessel 3 etwa 55°C. Bei den Stückholzkesseln 2 und 3 wurde der Kessel ohne aktive Kühlung während rund 12 Stunden ausgekühlt, bevor der nächste Versuch begann, bei Kessel 1 hingegen nur während rund zwei Stunden (Tabelle 4.5).

Bei Kessel 1 zeigte die erhöhte Kesseltemperatur keinen Einfluss auf die CO- und VOC-Emissionen während der Startphase (Bild 4.13).

Bei Kessel 3 ist während der ersten 15 Minuten kein wesentlicher Unterschied zwischen kaltem und warmem Start erkennbar, danach sind die Emissionswerte beim Start des warmen Kessels geringfügig tiefer und die CO-Emissionen am unteren Ende des Schwankungsbereichs der guten Starts.

Bei Kessel 2 wurden dagegen beim Starten des warmen Kessels von Anfang an sehr tiefe Emissionen an CO und VOC erzielt, so dass das Startverhalten durch die Temperatur der Feuerung positiv beeinflusst wurde. So lagen die CO-Emissionen in den ersten 15 Minuten um rund einen Faktor 6 tiefer als bei guten Starts mit tiefer Kesseltemperatur.

Eine Auskühldauer von 12 Stunden zwischen zwei Messungen ohne aktive Kühlung des Kesselkreislaufs reicht je nach Kesselmasse und Wasserinhalt nicht aus, um tiefe Kesseltemperaturen zu erreichen. Für eine reproduzierbare Beurteilung der Startphase ist demnach eine Auskühldauer mit aktiver Auskühlung von 12 Stunden erforderlich.

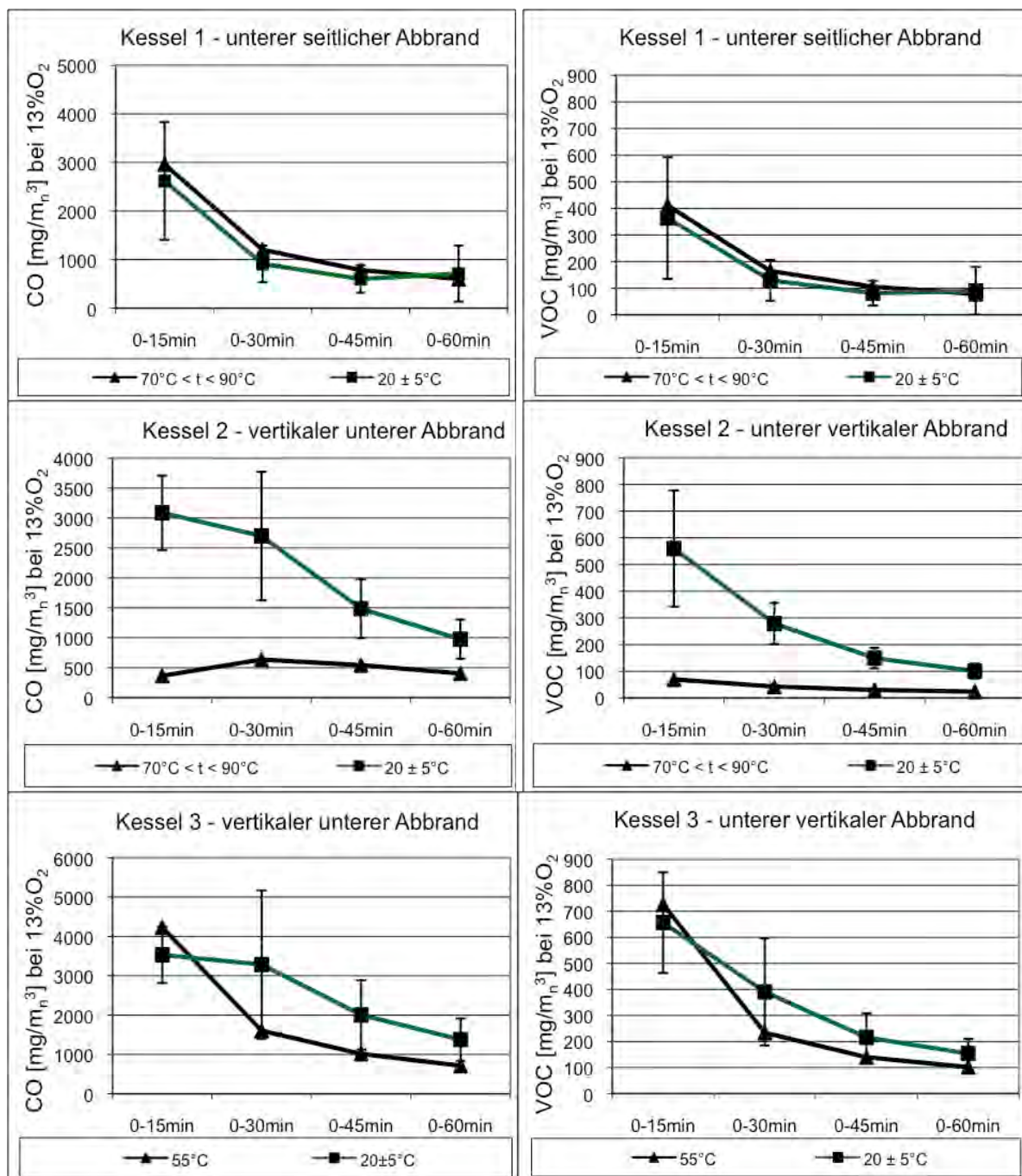


Bild 4.13 Einfluss der Kesseltemperatur auf die CO- und VOC-Emissionswerte für Kessel 1, 2 und 3. Untersucht wurde der Einfluss bei hoher Temperatur (schwarz; kesselspezifisch) und geringer Temperatur (grün; 20 ± 5 °C; gute Starts bei geringer Kessel- und Brennkammertemperatur). Dargestellt sind die Mittelwerte.

Kessel 1: Kesseltemperatur 70 – 90 °C bei Versuchsstart; vermutete Brennkammertemperatur hoch; Auskühldauer zum vorherigen Versuch 2 h.

Kessel 2: Kesseltemperatur 70 – 90 °C bei Versuchsstart; vermutete Brennkammertemperatur hoch; Auskühldauer zum vorherigen Versuch 12 h.

Kessel 3: Kesseltemperatur 70 – 90 °C bei Versuchsstart; vermutete Brennkammertemperatur hoch; Auskühldauer zum vorherigen Versuch 12 h..

## 4.7 Einfluss der Rücklaufhochhaltung

Um praxisnahe Versuchsbedingungen zu erreichen, wurden die Kessel beim Anfeuern im Referenzfall mit Rücklaufhochhaltung betrieben (Bild 3.8) und die Kesselvorlauftemperatur anschliessend auf ca. 80°C geregelt, so dass keine Kesselabschaltung infolge Übertemperatur auftrat und die kesselinterne Steuerung keine Verminderung der Kesselleistung auslösen konnte. Um den Einfluss der Rücklaufhochhaltung zu untersuchen, wurde der Kessel während der Startphase ohne Rücklaufhochhaltung betrieben, also bereits von Versuchsbeginn an gekühlt (Bild 3.9). Es war kein signifikanter Einfluss von aktiver oder inaktiver Rücklaufhochhaltung auf die Emissionen während der Startphase erkennbar.

## 4.8 Einfluss des Startzeitpunkts des Abgasgebläses

Der Zeitpunkt des Startens des Abgasventilators wurde bei Kessel 2 untersucht. In der Regel wurde das Abgasgebläse rund 5 Minuten nach dem Anzünden gestartet. Um den Einfluss des Startzeitpunkts zu untersuchen, wurde der Abgasventilator erst 10 Minuten nach dem Anzünden gestartet.

Bei Kessel 2 (Sturzbrand) ist ein deutlich positiver Einfluss des verzögerten Startzeitpunkts (10 Minuten anstatt 5 Minuten nach Anzünden) auf die Emissionen während der Startphase erkennbar. Bei diesem Kessel mit Sturzbrand hatte der Zeitpunkt des Startens des Abgasventilators somit einen grossen Einfluss auf die Emissionen während der Startphase. Es wird vermutet, dass bei frühem Start des Kesselgebläses noch kein ausreichendes Glutbett ausgebildet ist, wodurch höhere Emissionen entstehen. Wenn das Kesselgebläse später aktiviert wird, bildet sich bereits ein Glutbett aus und die Gefahr des Temperaturabfalls durch Schliessen der Tür wird verringert.

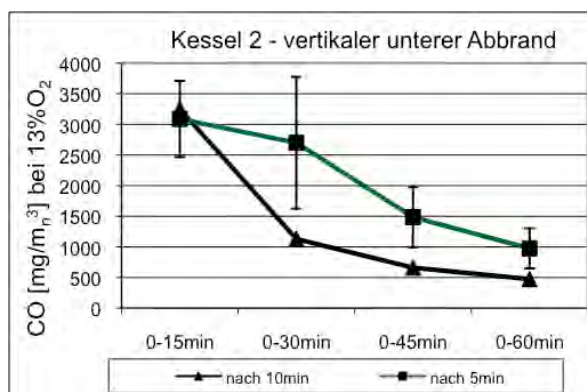


Bild 4.14 Einfluss des Startzeitpunkts des Abgasventilators. Kumulierte Mittelwerte.

## 4.9 Relevanz und Partitionierung von VOC

Die Messung von VOC, Methan und NMVOC im gasförmigen Zustand sowie die Messung und Analyse der kondensierbaren organischen Substanzen (COC) ermöglichen eine Partitionierung der VOC. Bild 4.16 zeigt die Partitionierungsfaktoren  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  und  $\gamma$  in den jeweiligen Verbrennungsphasen und den Mittelwert für einen ganzen Abbrand. Bild 4.15 zeigt die entsprechenden mittleren Faktoren für jeweils einen ganzen Abbrand.

Die Partitionierungsfaktoren wurden für die jeweilige Verbrennungsphase (Start: Kessel 1 bis 4, stationär: Kessel 1, Ausbrand; Kessel 1 und 4) für alle Kessel sowie unter Luftmangel (stationäre Phase von Kessel 4) dargestellt. Zum Vergleich ist für jeden Faktor der Mittelwert, welcher sich aus den einzelnen Verbrennungsphasen bildet, aufgezeigt. Es wird deutlich, dass die Partitionierungsfaktoren in den einzelnen Betriebsphasen unterschiedliche Werte aufweisen. Für die Berechnung des Faktors Gamma wurde berücksichtigt, dass die COC-Werte an sich nicht grösser als die VOC-Werte sein können, sofern die VOC-Messung sämtliche Kohlenwasserstoffe erfasst. In der stationären Phase und bei sehr geringen Konzentrationen trat dies in einigen Fällen auf, weshalb diese Messwerte für die Bestimmung der Faktoren nicht berücksichtigt wurden.

Die COC-Konzentration setzt sich aus der Kondensatanalyse (Masse Kohlenstoff) und der Massenzunahme des Backup-Filters zusammen. Die Masse auf dem Backup-Filter kann jedoch durch angelagerte Elemente wie O, N und S erhöht werden. Dies ist eine mögliche Erklärung für die erhöhten COC-Werte in der stationären Phase.

Tabelle 4.6 zeigt einen Vergleich der erhobenen Fraktionierungsfaktoren.

Zusammenfassend wurden folgende Beobachtungen gefunden:

- Über 70% der VOC in der Startphase sind NMVOC.
- Über 50% der NMVOC in der Startphase sind kondensierbar, also COC.
- Die COC-Fracht der Startphase macht gut 40% der in der Startphase freigesetzten VOC-Fracht aus. Die Startphase ist damit für die Gesundheitswirkung relevant.

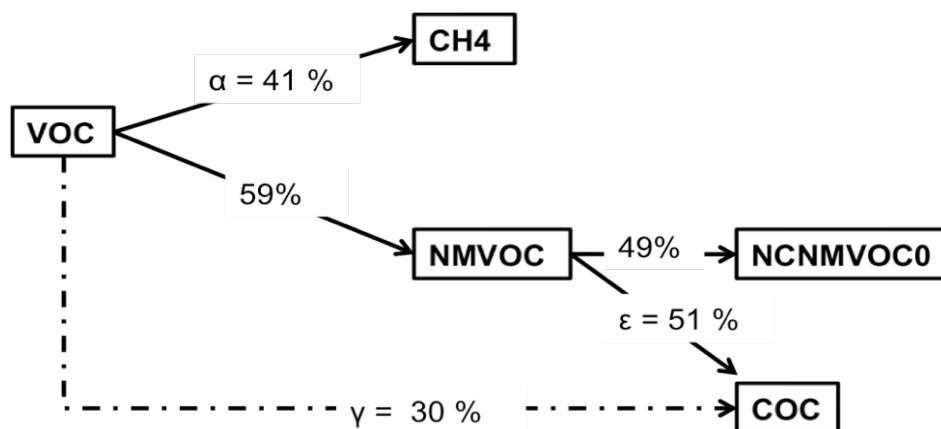


Bild 4.15 Fraktionierungsfaktoren für VOC der untersuchten Stückholzkessel für einen gesamten Abbrand.

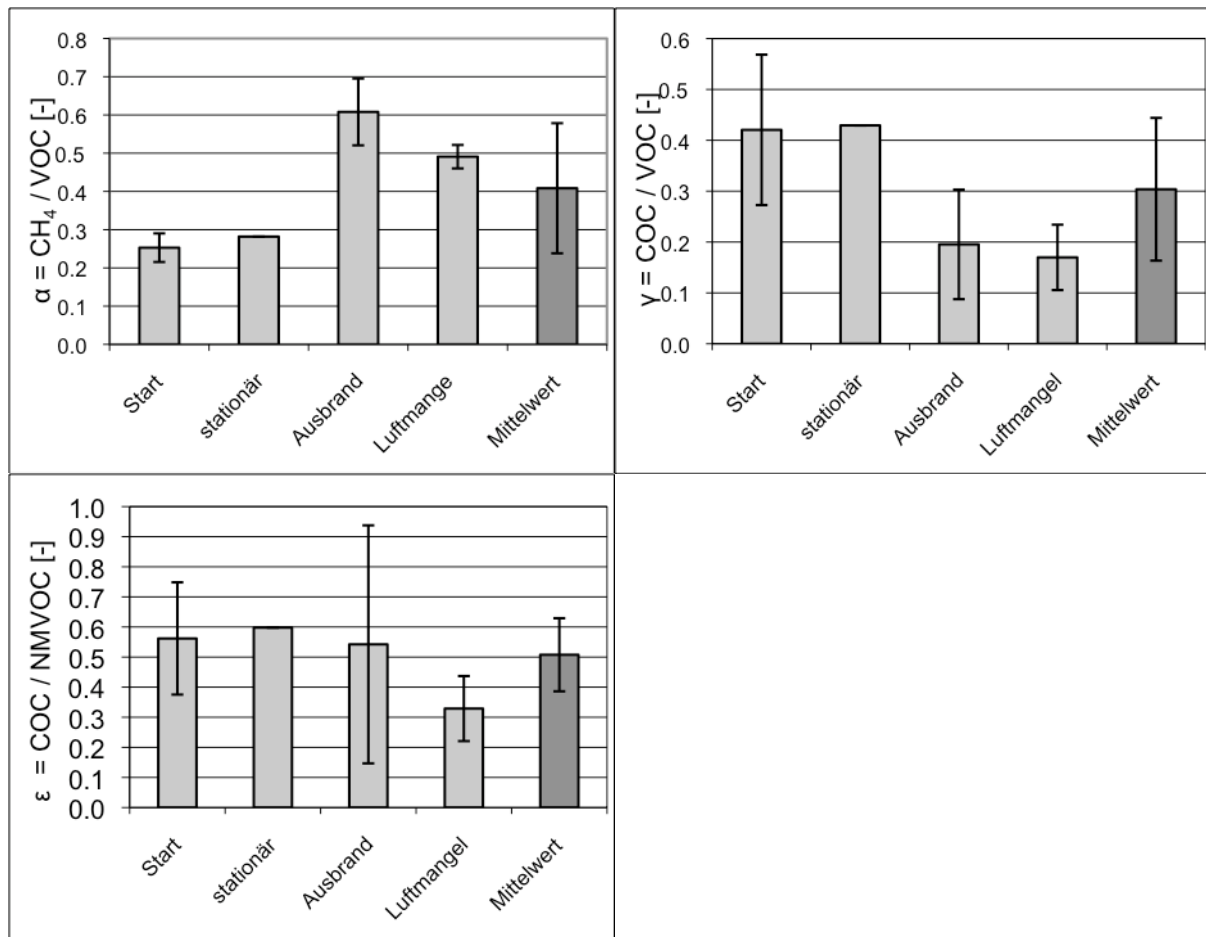


Bild 4.16 Bestimmung der Partitionierungsfaktoren  $\alpha$ ,  $\epsilon$  und  $\gamma$  in der jeweiligen Verbrennungsphase. Berücksichtigt wurden folgende Kessel und Verbrennungsphasen:

- Start und Ausbrand: Kessel 1 – 4
- stationär: Kessel 1
- Luftmangel: stationäre Phase Kessel 4
- Die Faktoren für die einzelnen Phasen ergeben sich aus den gemittelten Messwerten der Kessel. Mittelwert (gebildet aus den Werten aller vier Verbrennungsphasen).
- Anzahl Versuche  $n$ :  $n_{\text{Start}}=9$ ;  $n_{\text{stationär}}=1$ ;  $n_{\text{Ausbrand}}=2$ ;  $n_{\text{Luftmangel}}=4$



Tabelle 4.6 Vergleich von Fraktionierungsfaktoren für  $\alpha$ ,  $\gamma$  und  $\varepsilon$  mit BAFU, Ortega und Verenum.

Quelle	1	2	3	4	5	6
Faktor	BAFU 2005	Ortega 2008	Verenum 2009	Verenum 2010	Diese Messungen	Verenum/ BAFU 2010
$\alpha$	75%	-	40%	30%	41 ± 17%	40%
$\gamma$	-	35%*	36%	24%	30 ± 14%	
$\varepsilon$	-	-	60%	(34%)	51 ± 12%	

1. BAFU Emissionsfaktoren Feuerung, Stand September 2005 [BAFU]  
 2. [Ortega 2008]  
 3. Emissionsfaktoren Vorschlag Verenum Dezember 2009 zu Handen BAFU (erste Schätzwerte)  
 4. Messwerte nach [Nussbaumer & Boogen 2010],  $\alpha$  von Messungen in Vorjahren an mehreren Kesseln,  $\gamma$  von Messungen an einem Holzofen,  $\varepsilon$  aus  $\gamma$  und einem Schätzwert für  $\alpha$   
 5. Diese Messungen; direkte Bestimmung von  $\alpha$ ,  $\gamma$  und  $\varepsilon$  an vier Stückholzkesseln für VOC > COC  
 6. BAFU Emissionsfaktoren Feuerungen 2010 nach [Nussbaumer & Boogen 2010].

## 4.10 Zusammenhang Staub, Kondensat und Partikelanzahl

Die Auswertungen und Analysen der Filterproben sind in [12] weiter ausgeführt. Es zeigt sich, dass in der Startphase vorwiegend Russ (schwarze Partikel) emittiert wird, anschliessend zeigte eine hellere Verfärbung den Rückgang der Russkonzentration und in einigen Fällen durch gelblich-braune Farbe die Anwesenheit organischer Verbindungen.

Untersucht wurde ausserdem die Abweichungen der aus Anzahlkonzentration und Korngrössenanalyse bestimmten Partikelmasse (PM) und der gravimetrischen Staubmessung (SP), sowie der Anteil von SP in SPC. Für alle Kessel wurden die Werte der Start-, stationären- und Ausbrandphase gemittelt dargestellt (Bild 4.17). Aus Tabelle 4.7 wird deutlich, dass die aus der Anzahlkonzentration und Partikelgrösse berechnete Masse für PM während der Startphase und stationären Phase um den Faktor 1,4 bis 1,7 der Staubmasse aus der Gravimetrie entspricht. Da die Umrechnung auf Massenkonzentration jedoch durch die Partikelform und -dichte bestimmt wird und dafür mit der Kugelform von 1,2 kg/dm<sup>3</sup> Dichte eine feste Annahme verwendet wird, sind entsprechende Abweichungen möglich. Die PM-Messung dient deshalb in erster Linie zur Illustration des zeitlichen Verlaufs der Partikelkonzentrationen, ohne dass die Zahlenwerte quantitativ verwendet werden.

Während der Startphase ergibt sich allerdings auch ein grosser Messfehler beim Vergleich von PM und SP. Im Ausbrand wird mit der Gravimetrie eine geringfügig grössere Staubmenge festgestellt als durch die Feinstaubanalyse.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil Feststoff (SP) an SPC (also SP + COC) während der Startphase nur etwa 20% beträgt (Bild 4.17 rechts und Tabelle 4.8), während COC, zusammengesetzt aus TOC im Kondensat und der abgeschiedenen Masse auf dem Backup-Filter rund 80% an der Gesamtfracht von SPC ausmachen. In der stationären und Ausbrandphase setzt sich SPC zu über 50% aus Feststoff (SP) zusammen.

Beim Kondensat konnte zudem festgestellt werden, dass in den ersten 15 Minuten nach dem Anzünden nur rund 55% in den Waschflaschen abgeschieden werden und rund 45% auf dem Backup-Filter anfallen. In der stationären Phase und der Ausbrandphase konnten hingegen 90% des COC in den Waschflaschen abgeschieden werden.

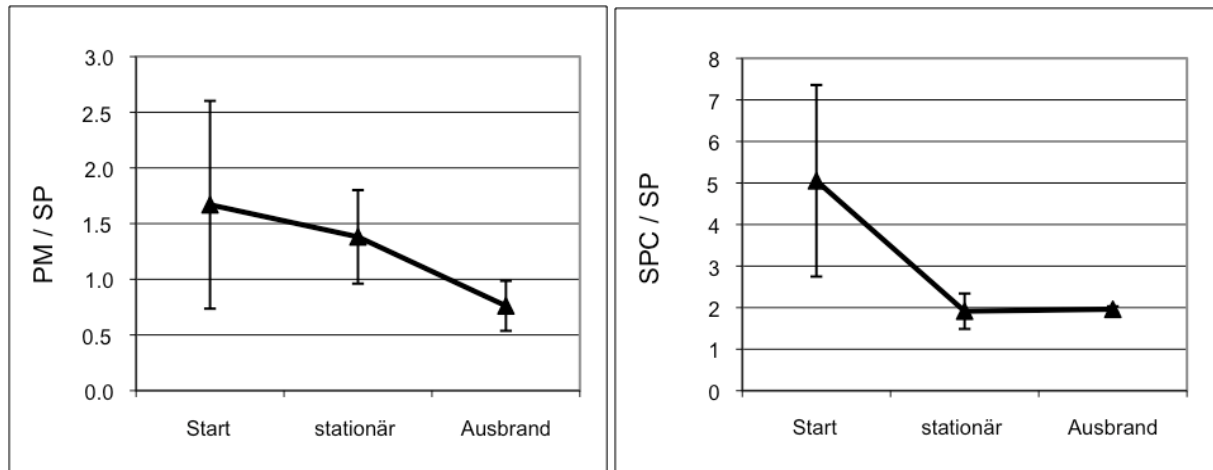


Bild 4.17 Verhältnis von PM zu SP in verschiedenen Abbrandphasen (links) und Verhältnis von SPC zu SP in verschiedenen Abbrandphasen (rechts). Einfluss der Probenahme während eines Abbrandes für die Kessel 1 bis 4. Untersucht wurde der Unterschied zwischen der aus der Anzahlkonzentration von SMPS und OPC berechneten (PM) und aus der gravimetrischen Staubbemessung ermittelten Feststoffmenge (SP) während Start (0-30 min), stationärer und Ausbrandphase. Zudem wird der Anteil SP im SPC untersucht. Dargestellt wurden die Mittelwerte.

Tabelle 4.7 Verhältnis von PM zu SP in verschiedenen Abbrandphasen.

Kessel	PM/SP					
	Start	$\sigma$	stationär	$\sigma$	Ausbrand	$\sigma$
1	1.3	1.2	1.2	0.2	0.8	0.3
2	1.7	1.4	0.9	0.7	0.9	0.3
3	1.7	0.8	2.0	0.5	1.0	0.1
4	2.0	0.4	1.4	0.3	0.4	
<b>Mittelwert</b>	<b>1.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>	<b>0.2</b>

Tabelle 4.8 Verhältnis von SPC zu SP in verschiedenen Abbrandphasen.

Kessel	SPC/SP					
	Start	$\sigma$	Stationär	$\sigma$	Ausbrand	$\sigma$
1	3.7	3.5	1.7	0.7	3.1	
2	3.8	1.7	1.4	0.3	1.1	0.0
3	7.5	3.0				
4	5.2	1.0	2.7	0.3	1.7	0.1
<b>Mittelwert</b>	<b>5.1</b>	<b>2.3</b>	<b>1.9</b>	<b>0.4</b>	<b>2.0</b>	



## 4.11 Einfluss der Methode zur Datenauswertung

Berechnungsmethode A (mit dem Volumenstrom gewichtet) wird als Referenzmethode angesehen und eignet sich auch für instationäre Abbrandbedingungen.

Berechnungsmethode B (zuerst normieren und dann mitteln) kann bei variabler Zufuhr von Falschluff vor der Probennahme angewendet werden, was in der Praxis jedoch kaum von Bedeutung ist.

Berechnungsmethode C (zuerst mitteln und dann normieren) wird in der Praxis häufig angewendet.

Für den Vergleich der Berechnungsmethoden wurden die Versuche mit gutem Startverhalten berücksichtigt. Der Vergleich der Methoden für die einzelnen Kessel zeigt, dass die Messmethode C für Kessel 2, 3 und 4 mit Abweichungen zwischen –6% und +4% relativ exakte Ergebnisse liefert. Demgegenüber verursacht Methode B Abweichungen zwischen 1% bis 63% und kann somit zu einer erheblichen Überschätzung der Emissionswerte führen.

Eine noch grössere Abweichung von bis zu +76% vom wahren Wert wird bei Kessel 1 beobachtet. Bei diesem Kessel liefert allerdings auch die Methode C erhebliche Abweichungen von – 27% bis – 35% vom korrekten Wert, im Gegensatz zur Methode B wird der Wert allerdings durch Methode C unterschätzt. Auffällig war bei Kessel 1 ein sehr hoher Volumenstrom nach Einschalten des Kesselgebläses, weshalb eine Auswertung ohne Gewichtung mit dem Volumenstrom zu grossen Abweichungen von Methode A führen kann.

Tabelle 4.9 Einfluss der Berechnungsmethode auf den berechneten Mittelwert der CO-Emission. Dargestellt ist die prozentuale Abweichung der Ergebnisse der Methoden B (rot) und C (blau) von der Referenzmethode A der Versuche mit gutem Startverhalten.

Gewichteter und normierter Wert von CO in[mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei 13 Vol.% O <sub>2</sub> Abweichung zu Berechnungsmethode A in %		Intervall			
Kessel	Formel	0 - 15 min	0 - 30 min	0 - 45 min	0 - 60 min
1	A (Referenz)	3429	1372	911	871
	ΔB (A) [%]	26%	65%	76%	46%
	ΔC (A) [%]	–27%	–34%	–35%	–27%
2	A (Referenz)	3266	2786	1567	1019
	ΔB (A) [%]	1%	13%	40%	63%
	ΔC (A) [%]	–5%	–4%	–6%	–4%
3	A (Referenz)	3470	3261	1972	1313
	ΔB (A) [%]	6%	21%	38%	58%
	ΔC (A) [%]	2%	1%	2%	4%
4	A (Referenz)	8079	5219	5386	7264
	ΔB (A) [%]	25%	36%	21%	3%
	ΔC (A) [%]	–1%	1%	0%	–1%

Berechnungsmethode	Vorgehen
A	Volumenstromgewichtete Mittelwertbildung als Referenz (100%)
B	1. Schritt: Normierung → 2. Schritt: Mittelwertbildung
C	1. Schritt: Mittelwertbildung → 2. Schritt: Normierung

## 5 Schlussfolgerungen

### 5.1 Emissionen während der Startphase

- Bei modernen Stückholzkesseln führt die Startphase im Vergleich zur stationären Phase zu deutlich erhöhten Emissionen an flüchtigen und kondensierbaren organischen Verbindungen (VOC und COC). Während der Startphase werden rund 60% bis 85% der Gesamtfracht an VOC freigesetzt. Davon liegen gut 70% als NMVOC vor, die wiederum zu über 50% aus COC bestehen.
- Während der Startphase treten vor allem kurzfristig auch erhöhte Partikelemissionen sowie hohe Anzahlkonzentrationen an Partikeln auf. Anhand von Analysen und der schwarzen Farbe der Partikel handelt es sich bei den während der Startphase emittierten Feststoffen vorwiegend um Russ. Im Gegensatz zu den organischen Verbindungen wird die Gesamtfracht an Staub jedoch nicht durch die Startphase dominiert, sondern die Startphase verursacht lediglich zwischen 10% und 30% des Gesamtstaubs. Während der Startphase übersteigt zudem die Emission an COC diejenige an Feststoff um rund 400%, das heisst COC macht rund 80% der Gesamtfracht an Feststoff und COC aus. Für die Beurteilung der Startphase wird deshalb die Bewertung der organischen Verbindungen als vordringlich beurteilt, obwohl die Feststoffe vorwiegend aus Russ bestehen und damit als ebenfalls stark schädliche Stoffe als zweitwichtigster Parameter für die Startphase bewertet werden.
- Während der Startphase treten auch erhöhte Emissionen an Kohlenmonoxid auf. Diese sind in Bezug auf die Lufthygiene jedoch von geringer Bedeutung. Ausserdem wird die Gesamtfracht an CO bei guten Feuerungen mit einem Anteil von 80% bis 90% durch den Ausbrand dominiert, die Startphase ist somit bei guten Feuerungen für die CO-Fracht kaum relevant.
- Während der Startphase besteht ein gleichläufiger Trend zwischen CO und organischen Verbindungen, weshalb CO während der Startphase als Indikator für die organischen Verbindungen in Form von VOC, NMVOC und COC dienen kann.
- Für die Stickoxidemissionen ist die Startphase unbedeutend, da während des restlichen Abbrands rund 80% bis 90% der Gesamtfracht emittiert werden und unvollständige Verbrennung tendenziell zu tieferen Stickoxidemissionen während des Starts führt.
- Beim alten Kessel ergeben sich deutlich abweichende Verhältnisse für die Relevanz der Startphase. Da die Emissionen beim alten Kessel auch nach dem Anzünden auf unverändert hohem Niveau verbleiben oder infolge Luftmangelbetrieb sogar noch ansteigen, trägt die Startphase nicht überproportional zum Schadstoffauswurf bei. Im Vergleich zu den drei modernen Kesseln sind aber die Gesamtfrachten an organischen Verbindungen, Feststoff und Kohlenmonoxid auf einem viel höheren Niveau. Der alte Kessel würde damit auch bei der heutigen Typenprüfung die Anforderungen nicht erfüllen, weshalb der Vergleich mit den modernen Kesseln zeigt, dass sehr schlechte Feuerungen auch durch eine alleinige Messung des stationären Betriebszustands von der Zulassung ausgeschlossen werden.

## 5.2 Einbezug der Startphase in die Typenprüfung EN 303-5

- Die Emissionswerte der Typenprüfung nach EN 303-5 erlauben keinen sicheren Rückschluss auf das Emissionsverhalten in der Startphase eines Stückholzkessels. Da die Qualität der Startphase durch Messung des stationären und betriebswarmen Zustands nicht sicher erfasst wird und die Startphase bei heutigen Kesseln für einen Grossteil der organischen Schadstoffe verantwortlich ist, ist ein Einbezug der Startphase für künftige Typenprüfungen empfehlenswert, um Kessel mit gutem Startverhalten zu fördern.
- Da Kohlenmonoxid während der Startphase ein guter Indikator für VOC, NMVOC und COC ist und da gleichzeitig die Emissionen an COC diejenigen an Feststoffen während der Startphase um ein Mehrfaches übersteigen, kann bereits eine CO-Messung als wichtige Orientierungsgrösse zur Beurteilung der Startphase dienen.
- Eine direkte Messung von VOC erhöht die Aussagekraft in Bezug auf die gesundheitsrelevanten Emissionen weiter. Da eine VOC-Messung für Kessel während der stationären Betriebsphase vorgesehen ist, bietet sich deren Anwendung grundsätzlich auch in der Startphase an, obwohl demgegenüber zu beachten ist, dass die VOC-Messung in der Regel wesentlich störungsanfälliger ist und dass die Startphase auch für die Analytik kritischer ist als die stationäre Phase.
- Obwohl eine Unterscheidung der VOC-Emissionen in Methan und NMVOC die Beurteilung zusätzlich präzisiert und das Verhältnis zwischen Methan und NMVOC in gewissen Bereichen variiert, erscheint dies für die Typenprüfung nicht zwingend erforderlich. Da der Anteil NMVOC an VOC während der Startphase über 70% beträgt, ist der Grossteil der VOC gesundheitsrelevant und die Summenmessung von VOC als nützliche Messgrösse zu bewerten.
- Für die Prüfung wurden neben dem Kaminzug und dem Einfluss des Betreibers vor allem auch der Zeitpunkt des Startens des Abgasventilators und des Schliessens der Fülltüre als sensitive Parameter identifiziert. Diese Faktoren müssen für die Anleitung zur Typenprüfung berücksichtigt werden und sie können auch Anlass für künftige Entwicklungen sein.
- Eine Reduktion des Kaminzugs von 12 Pa auf 7 Pa während des Starts wirkte sich auf das Startverhalten der drei modernen Stückholzkessel unterschiedlich aus. Bei den zwei Sturzbrandkesseln wurden die Emissionen durch sanfteres Anfahren reduziert, beim Kessel mit seitlichem unterem Abbrand jedoch erhöht, weshalb aufgrund der vorliegenden Untersuchung keine sichere Empfehlung zur Vorgabe des Kaminzugs möglich ist. Der Einfluss des Kaminzugs war aber geringer als das Auftreten nicht reproduzierbarer schlechter Starts. Um eine möglichst praxisnahe Prüfung vorzuschreiben, müsste sich die Vorgabe des Kaminzugs nach Möglichkeit am Verhalten in der Praxis orientieren. Zu dessen Festlegung wären allerdings weitere Abklärungen erforderlich.
- Im Anschluss an die Messung der Startphase wurde eine Messung nach heutiger EN 303-5 durch Auflegen von Holz auf die Grundglut durchgeführt. Dieses Verfahren hat sich bewährt und es verlängert die Betriebszeit des Kessels nicht zwingend, wenn die Startmessung zur Erstellung der Grundglut genutzt wird. Allerdings muss die Abgasmessung bereits ab Kesselstart einsatzbereit und kalibriert sein. Wenn die Zeit zur Erstellung der Grundglut sonst zur Einrichtung der Messtechnik genutzt wird, führt dies zu einer längeren Vorbereitung der Messung.
- Um eine praxisgerechte Prüfung zu beurteilen, wurde das Startverhalten der Kessel bei betriebswarmem Zustand und bei kaltem Kessel verglichen, wobei die Kessel beim Start aus kaltem Zustand mit einer Rücklaufhochhaltung betrieben wurden, wie dies in der Praxis üblich ist. Einer der untersuchten Sturzbrandkessel zeigte bei betriebswarmem Zustand ein deutlich besseres Anfahrverhalten, während sich der Start aus dem kalten Zustand bei den zwei anderen Kesseln nicht

signifikant auf die Emissionen auswirkte. Da in der Praxis im Regelfall von einem Start aus kaltem Zustand auszugehen ist, wird auch für eine Einbindung des Starts in eine Typenprüfung ein Starten aus kaltem Zustand empfohlen. Um vergleichbare Randbedingungen sicher zu stellen, wurden die Kessel dazu während 12 Stunden mit aktiver Rückkühlung auf Raumtemperatur gebracht, was sich bewährt hat. Für eine technisch sinnvolle Kaltstartprüfung ist ein Betrieb mit Rücklaufhochhaltung bei einer Rücklauftemperatur von zum Beispiel 60°C vorzusehen.

- In der vorliegenden Untersuchung wurde der Abgasvolumenstrom kontinuierlich gemessen und zur Gewichtung der Schadstofffrachten berücksichtigt (Methode A). Sofern bei der Typenprüfung keine Gewichtung der Momentanwerte mit dem momentanen Abgasvolumenstrom oder allenfalls mit der mittels Abbrandwaage gemessenen Massenabnahme vorgesehen wird, können die Emissionsdaten entweder durch Normierung mit anschliessender Mittelwertbildung (Methode B) oder durch Mittelwertbildung mit anschliessender Normierung (Methode C) ausgewertet werden. Methode B liefert bei konstantem Abgasvolumenstrom korrekte Resultate und sie verursachte bei allen Kesseln und in allen Betriebsphasen deutlich geringere Abweichungen von einer mit dem Volumenstrom gewichteten Auswertung. In drei von vier Fällen betrugen die Abweichungen weniger als 6% gegenüber Abweichungen bis zu 60% mit Methode B. An einem Kessel ergaben sich jedoch auch mit Methode C Abweichungen von bis zu 34% (gegenüber bis zu 76% bei Methode C). Aus diesem Grund wird für Auswertungen ohne Gewichtung der Emissionswerte Methode C mit Mittelwertbildung und anschliessender Normierung der Messdaten empfohlen. Allerdings ist zu beachten, dass unter bestimmten Umständen auch mit dieser Methode erhebliche Abweichungen zu einer korrekten Auswertung möglich sind. Um entsprechende Fälle zu identifizieren, wären vertiefende Abklärungen erforderlich.
- Die Berücksichtigung der Startphase bei der Typenprüfung wird allerdings dadurch erschwert, dass aufgrund der vorliegenden Erfahrungen mit einer ungenügenden und im Vergleich zum stationären Zustand viel geringeren Reproduzierbarkeit des Startverhaltens zu rechnen ist. So traten im vorliegenden Fall bei über 30% der Starts eine schlechte Anfahrphase mit bis zu fünfmal höheren Emissionen auf. Sofern sich dies als typisches Verhalten bestätigt, müsste es bei der Typenprüfung berücksichtigt werden, was allerdings eine grosse Anzahl Messungen (deutlich mehr als 2, eher mehr als 5) erforderlich machen würde. Die Frage der ungenügenden Reproduzierbarkeit müsste deshalb zur Einführung der Startphase noch vertieft werden. Ausserdem müsste sichergestellt werden, dass auch schlechte Starts bewertet und nicht abgebrochen werden oder der Startabbruch dokumentiert und bewertet werden muss, da die Aussagekraft einer Prüfung durch Selektion der guten Starts grundsätzlich in Frage gestellt wird.

- Aufgrund der Erfahrungen mit den drei modernen Stückholzkesseln kommen zur Einführung der Startphase als Zusatzanforderung für das Qualitätssiegel zum Beispiel nachfolgende Vorschläge für Grenzwerte an CO und VOC für die Startphase in Frage. Die Zahlenwerte sind dabei so gewählt, dass bei Einhaltung der Anforderung an CO in der Regel auch der VOC-Grenzwert eingehalten wird. Unter den zwei Anforderungen für CO und VOC ergibt die CO-Anforderung für die untersuchten Stückholzkessel und Betriebszustände eine tendenziell etwas strengere Beurteilung.<sup>2</sup> Dies ist so gewählt, weil CO eine einfach messbare Einzelsubstanz ist, die ausserdem auch für Holzöfen sowie für Praxismessungen zur Anwendung kommt und die im Falle einer Beschränkung auf eine einzige Messgrösse vorgeschlagen wird.

Stufe	Messintervall	CO [mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei 13 Vol.-% O <sub>2</sub>	VOC angegeben als C [mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei 13 Vol.-% CO
1	0 bis 30 Minuten	4000	600
	0 bis 60 Minuten	2000	300
2	0 bis 30 Minuten	3000	450
	0 bis 60 Minuten	1500	225
3	0 bis 30 Minuten	2000	300
	0 bis 60 Minuten	1000	150

- Als Bewertungszeitraum werden die Zeitintervalle von 0 bis 30 Minuten und von 0 bis 60 Minuten vorgeschlagen. Aus Sicht der Lufthygiene ist ein tiefer Mittelwert über einen möglichst langen Zeitraum entscheidend, was mit der Bewertung des 60 Minuten-Mittels berücksichtigt werden soll. Aus Sicht der Geruchsbelästigung ist ein deutlich kürzeres Messintervall erforderlich. Immerhin ist davon auszugehen, dass Peaks von wenigen Sekunden nicht zu einer ausreichenden Fracht für eine Belästigung der Nachbarschaft führen, weshalb ein Intervall zur Beurteilung der Geruchsbelästigung voraussichtlich im Bereich von Minuten erforderlich wäre.<sup>3</sup> Allerdings ist aus verbrennungstechnischer Sicht nicht zu erwarten, dass Stückholzkessel mit grosser Masse innert weniger Minuten auf Betriebstemperatur gebracht werden können, weshalb die Dauer von 0 bis 30 Minuten als kürzeres Intervall vorgeschlagen wird. Aus methodischer Sicht ist zu beachten, dass bei diesem Vorschlag die Emissionen der ersten 30 Minuten doppelt bewertet werden, da sie zum Mittelwert der ersten und zum Mittelwert der zweiten Beurteilungsperiode beitragen. Dies hat zur Konsequenz, dass eine anschliessende Mittelwertbildung aus dem ersten und dem zweiten Auswertintervall mathematisch unzulässig wird. Ausserdem kann vom ersten Mittelwert nicht sicher

<sup>2</sup> In diesem Bereich beträgt die Massenkonzentration von VOC als C knapp 15% und über 10% von CO.

<sup>3</sup> Dazu wäre gegebenenfalls ein zusätzlicher Grenzwert zur Berücksichtigung von Schadstoff-Peaks denkbar. Dies erscheint allerdings nur im Zusammenhang mit einer grösseren Anzahl von Startversuchen sinnvoll und die Erfahrungsbasis zur Einführung entsprechender Werte wird als zu gering bewertet.

auf den zweiten Mittelwert geschlossen werden, da es sich bei den aus der Prüfung auszuweisenden Schadstoffdaten um normierte Mittelwerte handelt.<sup>4</sup>

- Die drei Stufen sind so bewerten, dass die Anforderung der ersten Stufe von allen drei modernen Stückholzkesseln eingehalten und teilweise deutlich unterschritten werden, sofern keine schlechten Starts auftreten. Die Stufen 2 und 3 sind Vorschläge für mögliche Verschärfungen. Von den drei untersuchten Kessel würden zwei die Stufe 2 voraussichtlich erfüllen, während die Stufe 3 in den durchgeführten Messungen nur von einem der drei Kessel erreicht worden wäre.
- In allen Fällen bleibt die Problematik bestehen, dass im Falle von lediglich zwei Messungen oder gar nur einer Messung die Zufälligkeit von Fehlstarts nicht adäquat erfasst werden kann. Wenn eine Streichung oder ein Abbruch einer Messung ausgeschlossen wird, müsste eine grosse Zahl von Messungen verlangt werden. Zur Bewertung besteht die Möglichkeit, entweder den Mittelwert aus mehreren Startversuchen zu bilden und die Einhaltung des Mittelwerts zu verlangen, so dass etwa bei einem Fehlstart aus allen Versuchen der Grenzwert noch eingehalten werden könnte. Alternativ dazu könnte verlangt werden, dass die Grenzwerte je einzeln erfüllt werden müssten, aber unter den Versuchen maximal eine Messung den Grenzwert überschreiten dürfte. Bei dieser Variante bliebe die Höhe des Emissionsniveaus eines allfälligen Versuchs mit schlechtem Start unberücksichtigt. Dies wäre methodisch von Nachteil, aber in Bezug auf den Versuchsablauf von Vorteil, da der Versuch unter Umständen abgebrochen werden könnte. In beiden Fällen wäre allerdings eine grosse Zahl an Versuchen erforderlich.
- Sofern davon ausgegangen wird, dass die Startphase bei der nach EN 303-5 gegebenen Anzahl Messungen einbezogen werden soll, könnte die Messung jeweils während des zum Erreichen der Betriebstemperatur und der Grundglut erforderlichen Abbrands erfolgen. Zum einmaligen Messen der Startphase beim erstmaligen Erstellen der Grundglut würde der Aufwand zum Betrieb des Kessels im Prinzip nicht erhöht, sondern lediglich ein Zusatzaufwand für die Vorbereitung und Durchführung der Messung entstehen. Für eine zweite Startmessung müsste allerdings der Kessel zum Beispiel über Nacht aktiv ausgekühlt und am nächsten Morgen erneut aus dem kalten Zustand angefahren werden. Wenn während der Startphase lediglich CO und VOC gemessen werden, sollte mit Durchführung von zwei Messungen der Startphase die Abwicklung einer Typenprüfung in einer Arbeitswoche möglich sein. Für eine zuverlässige Beurteilung der Wahrscheinlichkeit eines Fehlstarts wäre dagegen eine Ausdehnung auf mehrere Zusatztage notwendig, zwischen denen der Kessel jeweils wieder auf Raumtemperatur abgekühlt würde.

---

<sup>4</sup> Da der Sauerstoffgehalt während des ersten Mittelwert-Intervalls in der Regel viel höher ist als während des zweiten, sind im zweiten Intervall auch Mittelwerte möglich, die weniger als die Hälfte des Mittelwerts des ersten Intervalls betragen. Dies erscheint unlogisch, ist aber eine Konsequenz des Einflusses durch die Normierung und kann auch so erklärt werden, dass der Holzumsatz während der ersten 30 Minuten geringer ist als der Holzumsatz während der zweiten 30 Minuten und dass die Schadstoffwerte durch die Mittelwertbildung mit anschliessender Normierung bei konstantem Abgasvolumenstrom entsprechend der pro Intervall umgesetzten Holzmenge gewichtet werden.

## 5.3 Entwicklungsbedarf

- Für künftige Entwicklungen wird als vordringliches Ziel betrachtet, das Anfahrverhalten konstruktiv und regeltechnisch sowie durch präzisere Anleitungen so zu verbessern, dass die Wahrscheinlichkeit von schlechten Anfahrphasen deutlich verringert wird. Eine Basis dazu kann die korrekte Anwendung des Anfeuermoduls und das korrekte Aufschichten von trockenen Holzscheiten durch den Betreiber bilden. Die Kesseltüre sollte jedoch nach dem Anzünden sofort geschlossen werden können oder geschlossen werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass dazu in der Regel ein Startprogramm notwendig ist, mit dem zum Beispiel der Abgasventilator zu Beginn mit reduzierter Leistung die Ausbreitung der Flammen über den ganzen Rostbereich ermöglicht.
- Zur Verbesserung des Startverhaltens ist auch der Einsatz elektrischer Hilfseinrichtungen bis hin zu einem automatischen Anzündvorgang denkbar.
- Bei einem Kessel konnte das Startverhalten ausserdem deutlich verbessert werden, indem die Zeitverzögerung zum Starten des Abgasventilators von 5 Minuten auf 10 Minuten verlängert wurde und damit ein grösseres Glutbett ausgebildet werden konnte.
- Die hohen CO-Emissionen in der Ausbrandphase könnten bei einigen Kesseln dadurch verringert werden, dass die Sekundärluftklappe nicht zu Beginn des Ausbrands, sondern erst nach dem Ausschalten des Abgasventilators vollständig geschlossen wird.



## 6 Anhang

### 6.1 Versuchsaufbau

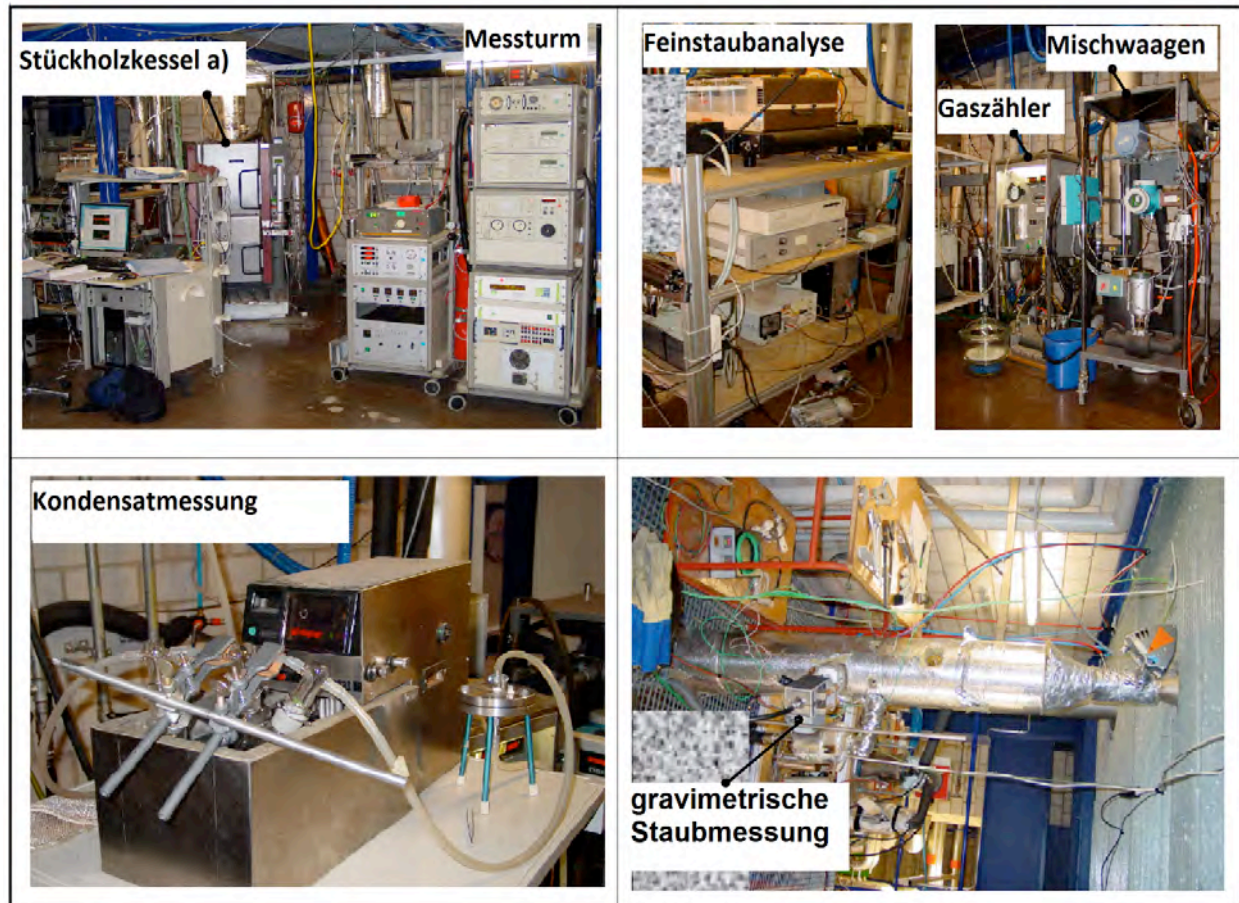


Bild 6.1 Versuchslabor der Fachgruppe Biomasse an der Hochschule Luzern, Technik & Architektur.



## 6.2 Messtechnik

### 6.2.1 Übersicht

#### Messtechnik:

- Abgaszusammensetzung und Hilfsgrößen, kontinuierlich
- O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> und Gesamt-Kohlenwasserstoffe (KW, CH<sub>4</sub>, NMKW)
- Abgastemperatur, Abgasgeschwindigkeit, Kaminzug, Abgasvolumenstrom
- Luftüberschuss, feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- Vor- und Rücklauftemperatur, Durchflussmengen, Feuerungswärmeleistung, Kesselleistung
- Gesamtstaub gravimetrisch, diskontinuierliche Probenahme auf Planfilter (Probenahmedauer i.d.R. 15 min oder 30 min)
- Korngrössenspektrum und Anzahlverteilung (SMPS, OPC), semi-kontinuierlich (Messintervall 2 bis 3 Minuten). Diese Daten werden zur Dokumentation auch auf Massenkonzentration umgerechnet, wobei mit einer Partikeldichte von 1,2 kg/dm<sup>3</sup> gerechnet wird.

#### Kaminanlage:

Die Kaminanlage steht senkrecht über dem Stückholzkessel. Die Messstellen sind an einer senkrechten Messstrecke in Anlehnung an EN 303-5 angeordnet. In der vertikalen Messstrecke mit einem Durchmesser von 150 mm sind Messebenen für gravimetrische Staubmessung, Abgaszusammensetzung, Abgastemperatur und Partikelanalyse angebracht. Nach einer Verengung des Abgaskanals zur Messung der Gasgeschwindigkeit sind eine Drosselklappe, eine Nebenluftöffnung und ein Seitenkanalverdichter zur Regelung des Kaminzugs eingebaut:

- Messebene 1.: Probenahme für gravimetrische Staubmessung und Kondensatmessung
- Messebene 2.: Abgastemperatur
- Messebene 3.: Kontinuierliche Gasanalyse; Druck
- Messebene 4.: Probenahme für Partikelanalyse (Feinstaubmesstechnik)
- Messebene 5.: frei
- Messebene 6.: Pitotrohr für Geschwindigkeitsmessung
- Messebene 7.: Abgastemperatur für Umrechnung des Abgasvolumenstroms auf Normbedingungen
- Messebene 8.: frei

Bild 6.2 zeigt die Emissionsmesstechnik im Versuchslabor mit deren Messebenen dargestellt.



## 6.2.2 Gasanalyse

**O<sub>2</sub>-Messung:** Paramagnetischer Analysator Hartmann&Braun, Typ Magnos 6G; Messbereich 0 – 25 Vol.-%, trockenes Messgas.

**CO-Messung:** Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) Braun, Typ Uras 10P; zwei separate Messkanäle; Messkanal tief 0 – 1'000 ppm, Messkanal hoch 0 – 10 Vol.-% (100'000 ppm), trockenes Messgas.

**CO<sub>2</sub>-Messung:** Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) LeyboldHeraeus, Typ Binos 100; Messbereich 0 – 20 Vol.-%, trockenes Messgas (wird nur zu Kontrollzwecken verwendet).

**CO-Messung:** Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) LeyboldHeraeus, Typ Binos 100; Messbereich 0 – 2 Vol.-%, trockenes Messgas (wird nur zu Kontrollzwecken verwendet).

**HC-Messung (Methan / Nichtmethan-HC):** Flammenionisationsdetektor (FID) JUM, Typ 109A; automatische Messbereichsumschaltung; Messbereiche 0 – 1 / – 10 / – 100 / – 1'000 / – 10'000 ppm für Methan (CH<sub>4</sub>) und Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe, beheizt auf 180 °C, feuchtes Messgas

**NO<sub>x</sub>-Messung (NO und NO<sub>2</sub>):** Chemilumineszenz-Analysator (CLD) ECO Physics, Typ CLD 700 EL ht; Messbereich 0 – 20 Vol.-%, trockenes Messgas (wird nur zu Kontrollzwecken verwendet).

**H<sub>2</sub>O-Gehalt:** Der Wasserdampfgehalt im Abgas wird aus dem Wassergehalt des Brennstoffs und der Abgaszusammensetzung berechnet.

**Messgasfluss:** Probenahme im Abgaskanal, beheiztes Filter (180°C), beheizte Messgasleitung (180°C), beheizte Messgasfördereinheit (180°C), beheizte Messgasleitungen zu FID-Gerät und CLD-Gerät, Messgaskühler, Messgasfördereinheit, O<sub>2</sub>-, CO-, CO<sub>2</sub>-Gerät.

## 6.2.3 Staubmessung

**Staubgehalt gravimetrisch:** Gravimetrische Gesamtstaub-Messeinrichtung Koneth, in Anlehnung an VDI 2066, isokinetische Probenahme bei 160°C (Durchmesser der Probenahmedüsen: 30 mm, Absaugvolumenstrom ca. 0.7 m<sup>3</sup>/h), beheizter Filterhalter (160°C) für Planfilter, Bestimmung des Teilstromvolumens mit Trockengaszähler mit vorgeschaltetem Gaskühler und Trockenturm (Silicagel). Gewichtsbestimmung nach Probenkonditionierung mit:

**Analysenwaage:** Mettler Toledo, Typ AB204, Messbereich 0 – 210 g, d = 0.1 mg

## 6.2.4 Kondensat (COC)

**Kondensatmessung:** gemäss EPA-Methode 5H

**Messgasfluss:** Isokinetische Probenahme bei 160°C, beheizter Filterhalter (160°C) für Planfilter oder Filterhülsen, Gas-Waschflaschen für Kondensatproben bei 0°C, Planfilter, Bestimmung des Teilstromvolumens mit Trockengaszähler mit vorgeschaltetem Gaskühler und Trockenturm (Silicagel)

## 6.2.5 Korngrössenanalyse und Partikelanzahl

**Korngrössenspektrum:** Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) bestehend aus Diffusion Mobility Sizer (DMA) TSI 3071 und Condensable Particle Counter (CPC) TSI 3022, Messbereich 10 – 500 nm

**Anzahlverteilung:** Optical Particle Sizer (OPC) / Streulicht-Analysator Palas PCS 2000, Messbereich 500 – 10'000 nm

**Messgasfluss:** Probenahme im Abgaskanal, beheizte Messgasleitung (180°C), beheizte Verdünnungseinheit (1:10), unbeheizte Verdünnungseinheit (1:10), unbeheizte Messgasleitungen zu SMPS und OPC,

**CO<sub>2</sub>-Messung:** Nicht-dispersiver Infrarot-Analysator (NDIR) LI-COR, Typ LI-820; Messbereich 0 – 2'000 ppm, trockenes Messgas (wird zur Berechnung des Verdünnungsfaktors verwendet), Verdünnungsfaktor berechnet aus CO<sub>2</sub>-Messung im Abgas und CO<sub>2</sub> -Messung im verdünnten Messgas.

## 6.2.6 Wärmeleistungsmessung

**Durchflussmessung Kesselkreis:** Magnetisch-induktive Durchflussmessung, Endress+Hauser, Typ Promag 50H 22, DN 25, Messbereich 0 – 300 l/min (0 – 1.8 m<sup>3</sup>/h)

**Durchflussmessung Kaltwasser:** Magnetisch-induktive Durchflussmessung, Endress+Hauser, Typ Promag 33A T08, DN 08, Messbereich 1 – 30 l/min (0 – 0.18 m<sup>3</sup>/h)

**Temperaturen:** Vorlauftemperatur direkt beim Kessel, Rücklauftemperatur direkt beim Kessel, Kaltwassertemperatur bei Mischwagen-Einheit; kalibrierte Thermistoren PT100 [24].

## 6.2.7 Weitere Messgrößen

**Abgasgeschwindigkeit:** Die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit erfolgt mittels Pitotrohr und Differenzdruckmessung. Das Pitotrohr ist beim engsten Kaminquerschnitt positioniert. Zur Umrechnung von Pa zu m/s wird die Abgasdichte verwendet, die aus der Abgaszusammensetzung berechnet wird. Zur Umrechnung von feuchtem auf trockenes Abgasvolumen muss der Wassergehalt des Brennstoffs bekannt sein.

**Differenzdruckmessumformer:** Schiltknecht, Typ FCO44.1u-105, Messbereich -2 – 2 mbar

**Kaminzug:** Der Kaminzug wird gemäss EN 304 erfasst.

**Differenzdruckmessumformer:** Schiltknecht, ManoAir 500, Messbereich -500 – 500 Pa

**Abgastemperaturen:** Position und Anordnung gemäss EN 304, Netzmessung mit 5 Thermoelementen Typ K

**Wassergehalt:** Bestimmung in Anlehnung an CEN/TS 14774, Trocknung im Ofen (Heraeus, Typ KPM /KPV) bei ca. 105 °C bis Gewichtskonstanz, Wägung auf Sartorius, Typ PT3100, Messbereich 0 – 3'100 g, d = 0.1 g

**Abbrandwaage:** Mettler Toledo, Typ KD600, Messbereich 0 – 600 kg, max. 1'000 kg, d = 20 g [24]:

## 6.3 Wärmeabnahme

Die Stückholzkessel wurden gemäss Bild 6.3 hydraulisch eingebunden. Durch dieses Konzept der Wärmeabnahme konnte die Rücklaufhochhaltung sicher gestellt werden. Der Durchfluss im Kaltwasserkreis wurde jeweils dem zu untersuchenden Betriebszustand angepasst.

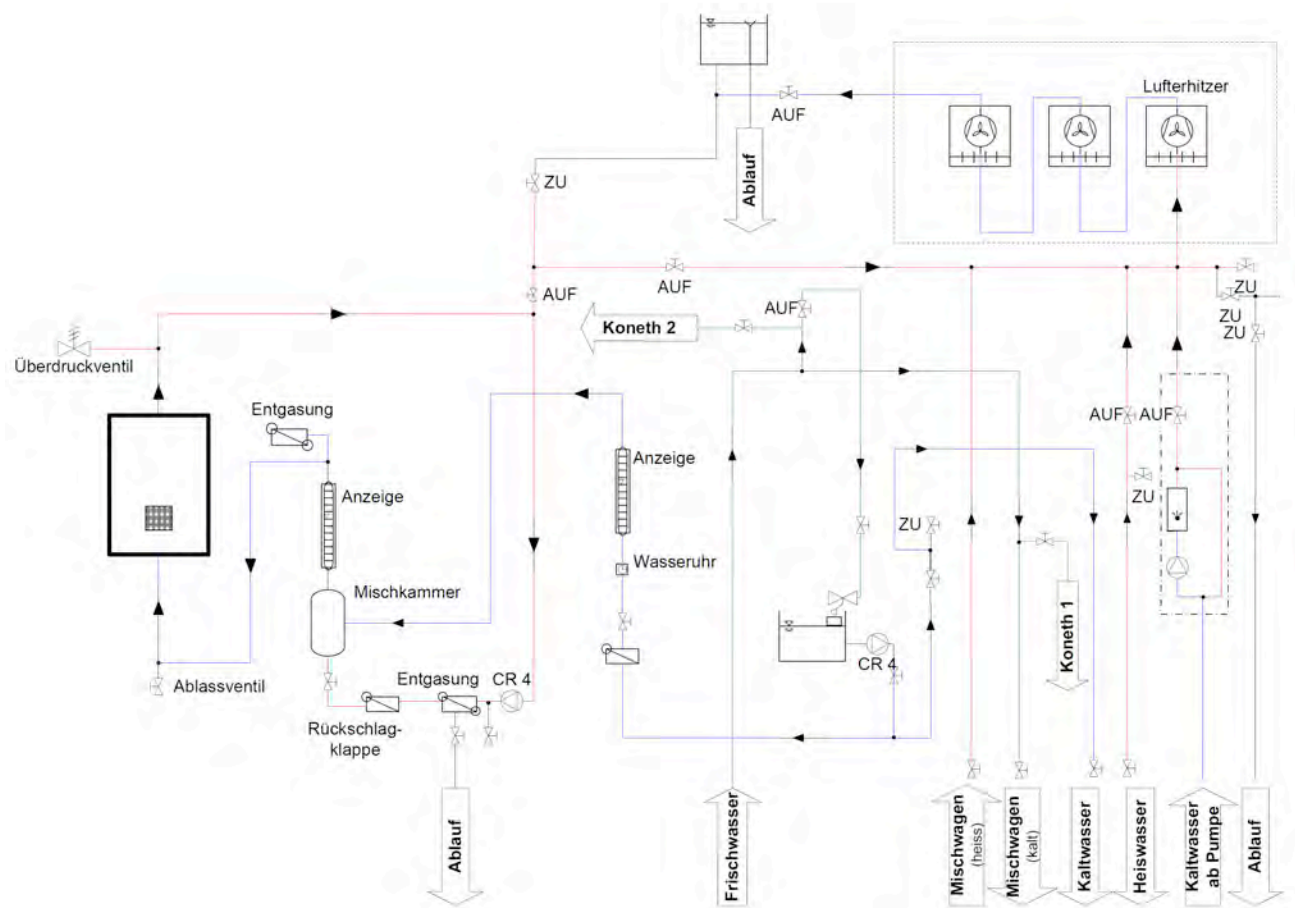


Bild 6.3 Fließbild der hydraulischen Einbindung der Stückholzkessel.



## 6.4 Auswertungsbeispiel

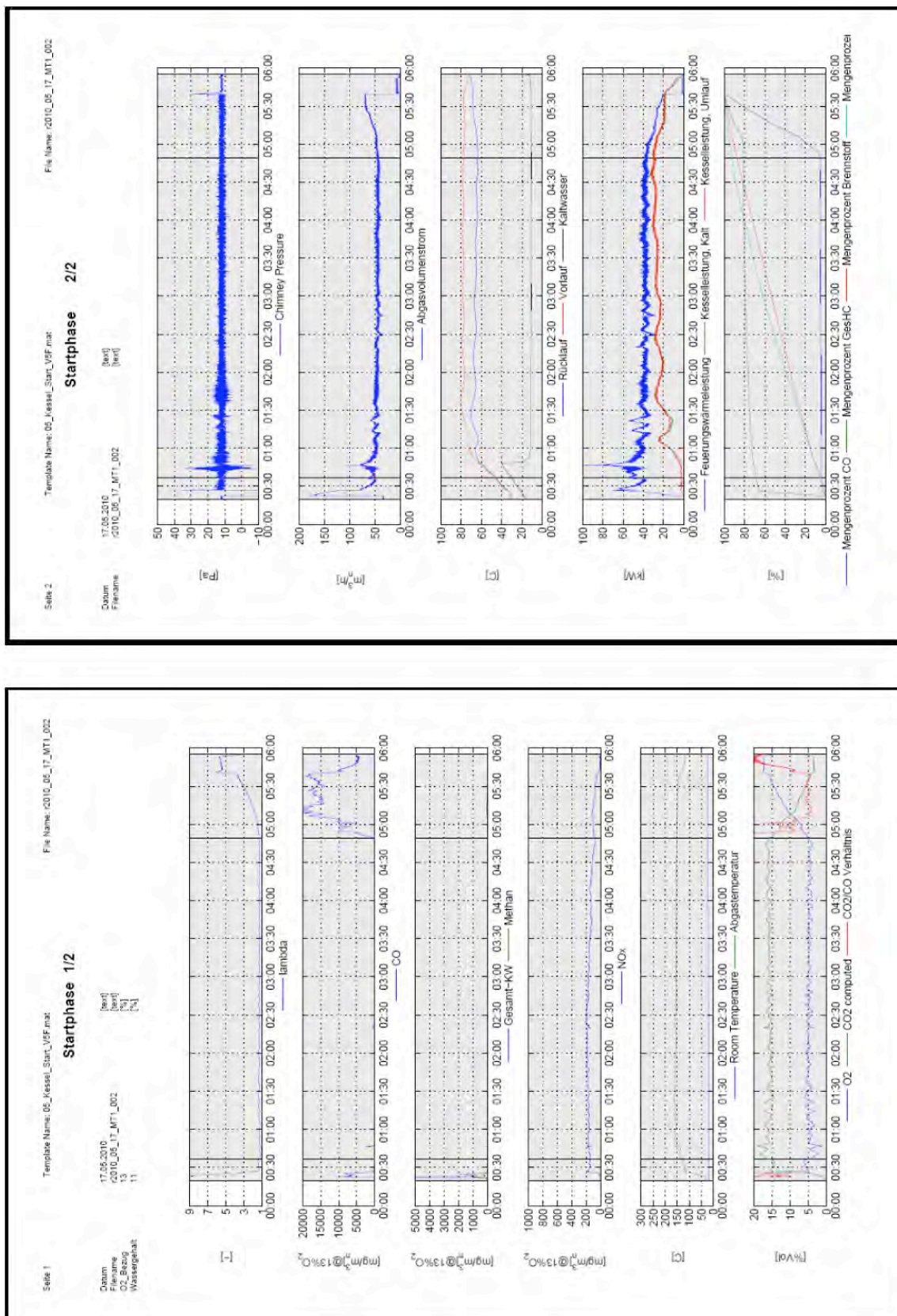


Bild 6.4 Abbrandverhalten von Kessel 1 bei gutem Start. Oben: Emissionen, unten: Betriebsdaten.

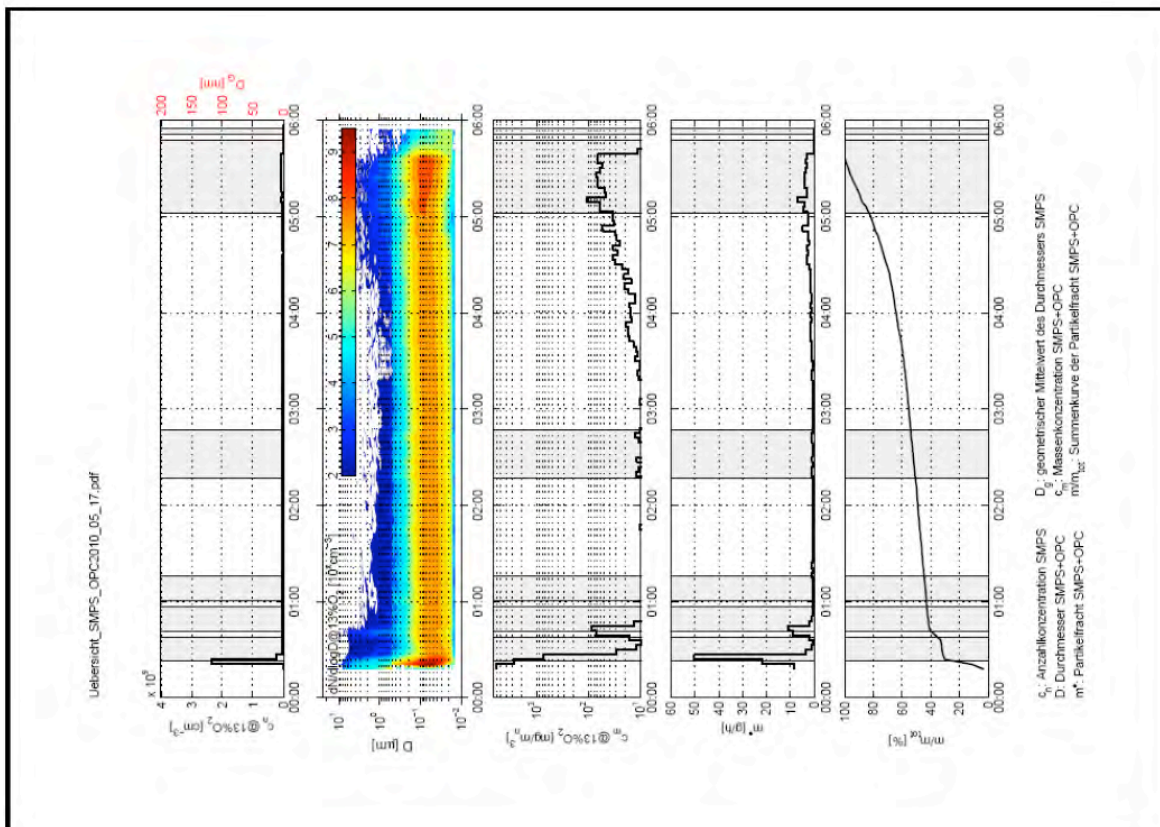
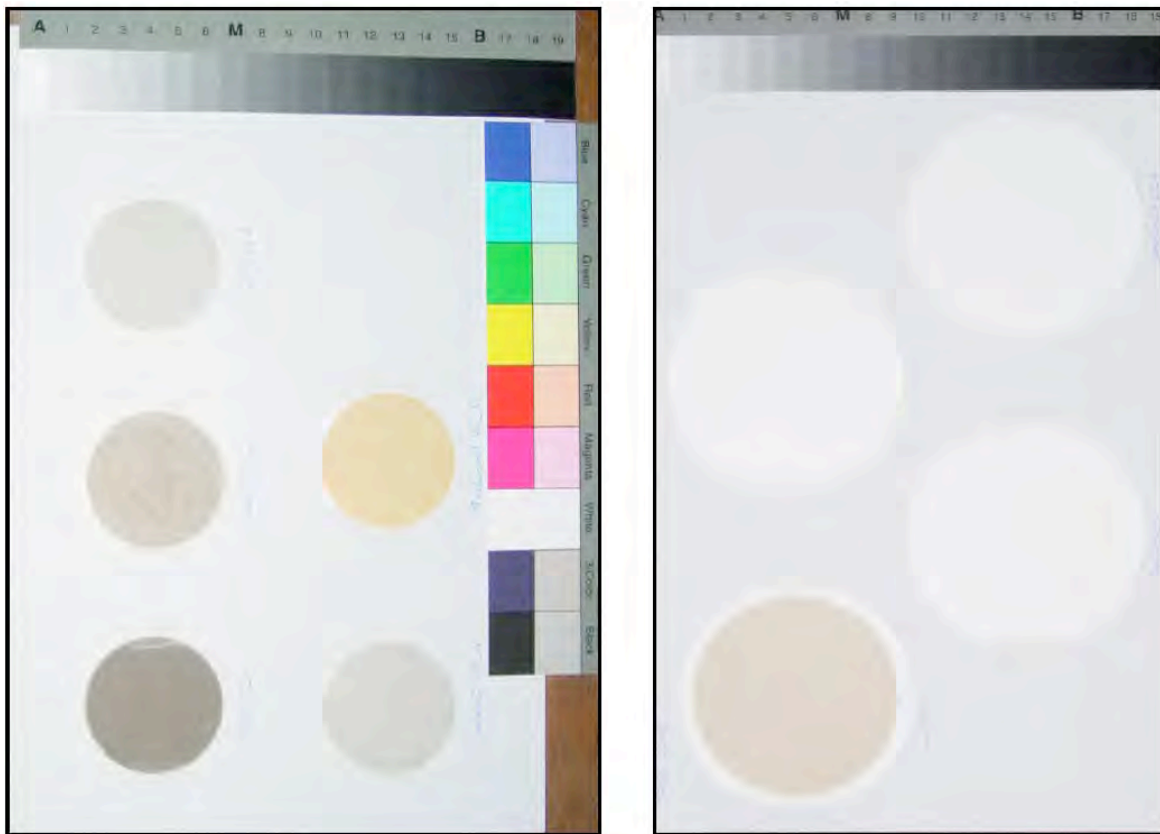


Bild 6.5 Abbrandverhalten von Kessel 1 bei gutem Start.  
Oben links: Filter von gravimetrischer Staubmessung, oben rechts: Backup-Filter nach Kondensatflaschen, unten: Daten der Korngrößen- und Partikelanzahlanalyse.

## 6.5 Beispiel zu gutem und schlechtem Start

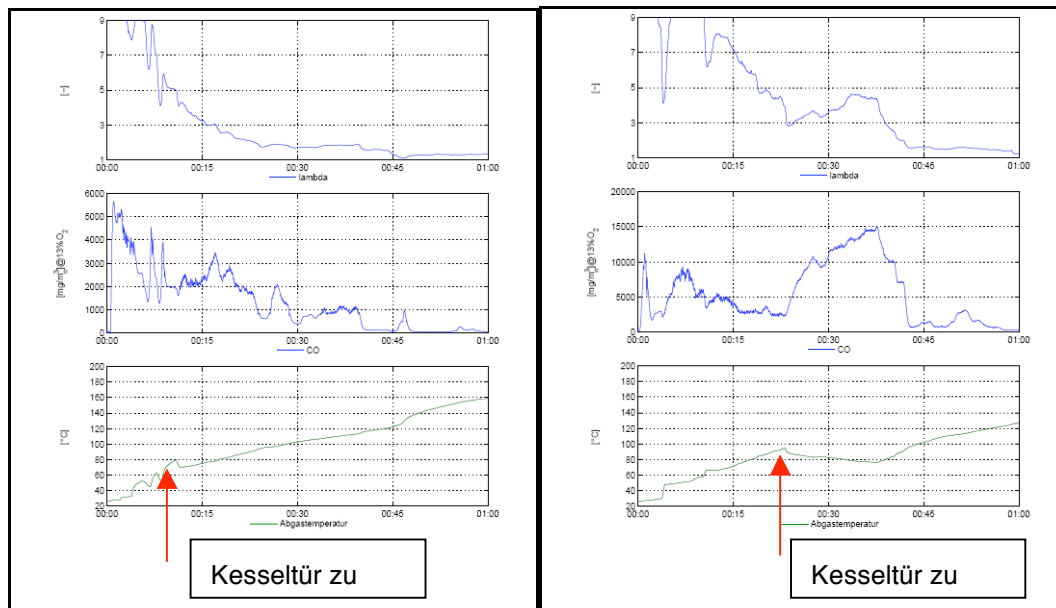


Bild 6.6 Einfluss beim Starten für Kessel 2. Links: guter Start, rechts: schlechter Start.

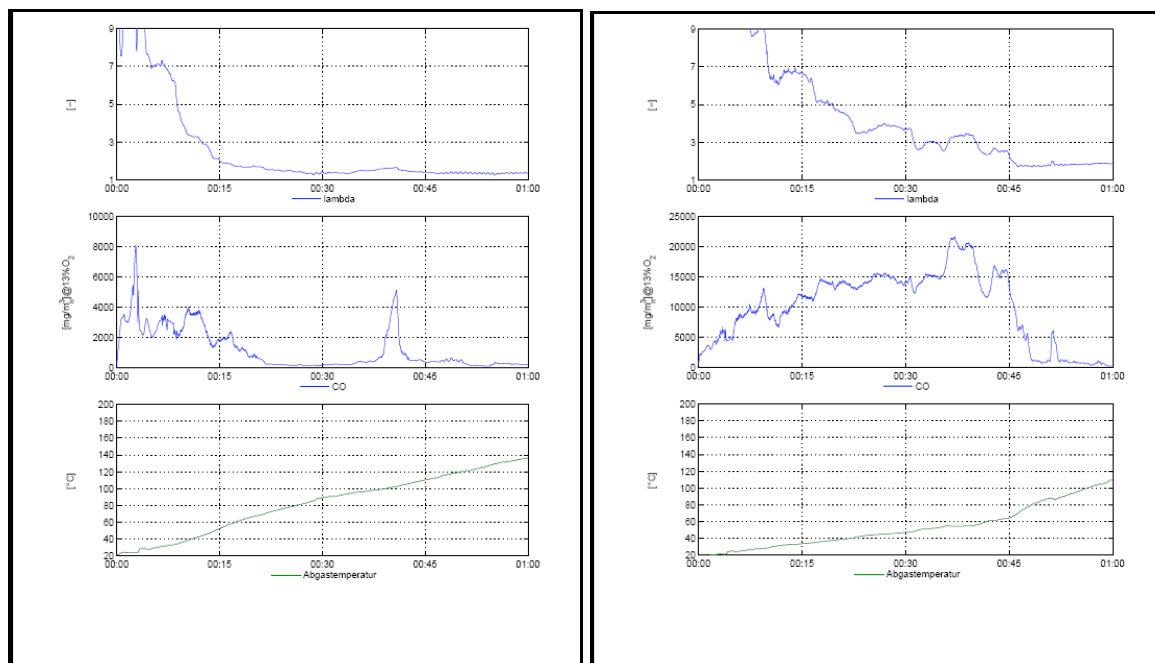


Bild 6.7 Einfluss des Anstiegs der Abgastemperatur. Links: guter Start, rechts: schlechter Start.



## 7 Literatur

- [1] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 15. Juli 2010), Artikel 814.318.142.1. Der Schweizerische Bundesrat, Bern 2010
- [2] EN 303-5: Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW, Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung, Deutsche Fassung EN 303-5 : 1999
- [3] prEN 303-5:2010 Zentral-Heizkessel - Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 500 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung, Entwurf August 2010
- [4] Nussbaumer, Th.; Doberer, A.; Klippel, N.; Bühler, R.; Vock, W.: Influence of Ignition and Operation Type on Particle Emissions from Residential Wood Combustion, 16<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, Valencia, 2–6 June 2008
- [5] Nussbaumer, Th.; Klippel, N.; Johansson, L.: Survey on Measurements and Emission Factors from Biomass Combustion in IEA Countries, 16<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, Valencia, 2–6 June 2008
- [6] Bollhalder, K.: Arbeitsgruppe Qualitätssiegel Holzenergie Schweiz: Protokoll Sitzung 8.3.2007 in Zürich
- [7] *Richtig Anfeuern Holzfeuerungen mit unterem Abbrand*. 2007, Holzenergie Schweiz: Zürich
- [8] Bollhalder, K.: Prüfverfahren neues Qualitätssiegel für Kessel, Protokoll zu der Sitzung vom 29. August 2006 in Bregenz
- [9] Bühler, R.: Prüfverfahren für die Startphase von Holzkesseln auf der Basis von EN 303-5, 4 Seiten, 7.3.2007
- [10] Nussbaumer, Th.: Feinstaub-Emissionsfaktoren von Holzheizungen, 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008, ETH Zürich, 2008, ISBN 3-908705-19-3, 129–156
- [11] Griffin, T.; Burtcher, H.: Evaluation von Messverfahren zur Messung der Wirksamkeit von Partikelabscheidern bei kleinen Holzfeuerungen. Schlussbericht im Auftrag von Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Energie, Fachhochschule Nordwestschweiz, 31. Januar 2008
- [12] Good, J.; Nussbaumer, Th.: Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW – Betriebseinfluss auf die Feinstaubemissionen von Holzfeuerungen, Schlussbericht Phase 2 – Holzkessel, Bundesamt für Energie, Bern, 2010
- [13] Nussbaumer, T.: Feuerungen: Aerosole, *Umwelt Perspektiven*, Nr. 6 2010, 28–31
- [14] Turpin, B., Lim, J., *Aerosol Science and Technology* 35, 2001, 602–610
- [15] Kerschbaumer, D.; Nussbaumer, Th.: Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten, *Ergänzungen, Heizung Klima* 11 1989, 107-109 und Nussbaumer, Th.; Kerschbaumer, D.: Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten, *Heizung Klima* 11 1987, 100-105
- [16] Wagner, D., T. Nussbaumer: Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen, Bundesamt für Energie, 1994 und Nussbaumer, Th.; Wagner, D.: Bestimmung gewichteter Schadstoffmengen mit kontinuierlicher Abgasvolumenstrommessung, *Heizung Klima* 4 1996, 157 – 161