



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

PARTIKELEMISSIONEN VON HOLZFEUERUNGEN BIS 70 KW:

**Betriebseinfluss auf die Feinstaubemissionen
von Holzfeuerungen**

Schlussbericht Phase 2 – Holzkessel

Ausgearbeitet durch

Jürgen Good
Thomas Nussbaumer

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw, www.hslu.ch

Dezember 2010

Auftraggeber

Bundesamt für Energie
Bundesamt für Umwelt

Autoren

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

Mitarbeit

Nina Boogen, Verenum, 8006 Zürich
Anna Doberer, ehemals Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Daniel Obermayr, Verenum, 8006 Zürich

Begleitgruppe

Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie, 3003 Bern
Dr. Sandra Hermle, Bundesamt für Energie, 3003 Bern

Dr. Beat Müller, Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern
Sabine Schenker, Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern
Dr. Peter Strähl, Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern

Christoph Aeschbacher, Holzenergie Schweiz, 8005 Zürich
Stefan Bisang, Sigmatic AG, 6210 Sursee
Peter Brogli, Tonwerk Lausen AG, 4415 Lausen/BL
Peter Hasler, Tiba AG, 4416 Bubendorf
Franco Isler, Holzenergie Schweiz, 8005 Zürich
Peter Liebi, Liebi LNC AG, 3753 Oey-Diemtigen
Roland Schmid, Schmid AG Holzfeuerungen, 8360 Eschlikon
Guido Sieger, Sigmatic AG, 6210 Sursee

Impressum

Jürgen Good, Thomas Nussbaumer:
Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW – Betriebseinfluss auf die Feinstaubemissionen von
Holzfeuerungen, Schlussbericht Phase 2 – Holzkessel, Bundesamt für Energie, Bern, 2010

Datum: 25. 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

BFE-Projektleiterin: Dr. Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101905
Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
2	Ausgangslage	6
3	Zielsetzung.....	7
4	Methodik.....	8
4.1	Untersuchte Holzfeuerungen	8
4.2	Versuchsprogramm.....	9
4.3	Emissionsmessungen	11
4.4	Wärmeleistungsmessung.....	11
4.5	Definition von Emissionsfaktoren.....	12
5	Ergebnisse und Diskussion	13
5.1	Übersicht der Emissionen von Stückholz- und Pelletkesseln	13
5.2	Emissionen von Stückholzkesseln.....	16
5.2.1	Emissionen während verschiedener Betriebsphasen	16
5.2.2	Emissionen mit einmaligem Nachlegen	17
5.2.3	Emissionen von Stückholzkesseln bei Fehlbetrieb	22
5.3	Emissionen von Pelletkesseln	25
5.3.1	Stationärer Betrieb bei Nennleistung und Teillast	25
5.3.2	Taktender Betrieb.....	25
5.4	Korrelationen zwischen Schadstoffen.....	29
5.4.1	Staub und CO.....	29
5.4.2	Kohlenwasserstoffe und CO.....	32
5.4.3	Kondensierbare organische Verbindungen (COC) und CO	32
5.4.4	Feststoffe und Kohlenwasserstoffe	33
5.4.5	Anteil Methan und NMKW an Kohlenwasserstoffen.....	33
5.5	Emissionsfaktoren.....	35
5.6	Kohlenstoffanteil im Feststoff.....	38
6	Schlussfolgerungen.....	43
6.1	Stückholzkessel	43
6.2	Pelletkessel.....	45
7	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	46
8	Anhang: Emissionsgrenzwerte	47
9	Literatur	49

1 Zusammenfassung

Da Holzfeuerungen zum Feinstaub (PM_{10}) in der Umgebungsluft beitragen und die Schadstoffemissionen stark von der Betriebsweise abhängen, wird in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Betriebsweise auf die Emissionen von Holzfeuerungen untersucht. In einem ersten Teil wurden handbeschickte Holzöfen untersucht und die Resultate in einem Schlussbericht von [Doberer et al. 2009] dokumentiert. Im vorliegenden zweiten Teil wurden vier handbeschickte Stückholzkessel und zwei Pelletkessel untersucht. Ein alter Stückholzkessel diente dazu, anhand eines Beispiels den Unterschied des Abbrandverhaltens zwischen neuen Kesseln und einem nicht mehr dem Stand der Technik entsprechenden Kessel zu zeigen. Alle anderen Kessel verfügen über das Qualitätssiegel von Holzenergie Schweiz und entsprechen dem Stand der Technik.

Die Resultate zeigen, dass die Startphase wie bei Holzöfen auch für Stückholz- und Pelletkessel zu erhöhten Emissionen führen und erheblich zur Gesamtfracht an den gesundheitsrelevanten organischen Verbindungen beiträgt. Der Staubgehalt ist dabei zwar auch erhöht, die Gesamtfracht an Staub wird aber durch die Startphase weit weniger stark beeinflusst. Im weiteren wird gezeigt, dass ungeeignetes Holz mit erhöhtem Wassergehalt oder Rundholz mit anhaftender Rinde bei modernen Stückholzkesseln zu einer Verlängerung der Startphase und zu höheren Emissionen führt. Da jedoch nach der Startphase ein Glutbett ausgebildet werden konnte, wirkten sich die Brennstoffeigenschaften nur noch untergeordnet auf die stationäre Phase aus. Daneben zeigte sich allerdings, dass bei jeweils identischem und korrektem Anfeuern gemäss Bedienungsanleitung und den Merkblättern „Richtig anfeuern“ von Holzenergie Schweiz aus kaltem Zustand unerwartet oft – nämlich in mehr als einem Drittel der Fälle – ein schlechter Start mit lange anhaltenden, hohen Emissionen Kohlenmonoxid (CO) und insbesondere auch an organischen Verbindungen (flüchtige organische Verbindung (VOC) inklusive bei Umgebungstemperatur kondensierbare organische Verbindungen (COC)) auftraten. Die Berücksichtigung solcher schlechter Starts führt zu deutlich höheren Emissionsfaktoren an CO und VOC und zu geringfügig höheren Staubwerten. Die Emissionsfaktoren für CO und VOC hängen deshalb in erheblichem Mass vom Anteil an schlechten Starts ab. Im Vergleich zu den modernen Kesseln zeigte sich beim alten Stückholzkessel, dass die Emissionen nach der Startphase nicht absanken, sondern im Gegenteil anstiegen. Der alte Stückholzkessel weist damit insgesamt deutlich höhere und weit über den Grenzwerten liegende Emissionen auf als die modernen Kessel, welche die heutigen Grenzwerte nicht nur während des stationären Betriebs, sondern grossteils auch bei Berücksichtigung eines ganzen Abbrands inklusive Startphase einhalten. Während bei den modernen Stückholzkesseln eine Berücksichtigung der Startphase für die Gesamtemissionen notwendig ist, entfällt diese Forderung beim alten Kessel, da die Emissionen permanent hoch sind.

Da auch bei den Pelletkesseln die Startphase deutlich erhöhte Emissionen an CO und VOC verursacht, sind die Emissionsfaktoren im Heizbetrieb vor allem von der Länge der Taktzyklen abhängig. Kurze Taktzyklen mit lediglich 15 Minuten stationärem Betrieb nach dem Start, wobei im Gegensatz zu den Stückholzkesseln nicht von einem Kaltstart, sondern von einem Start des betriebswarmen Kessels ausgegangen wird, führen zu knapp viermal höheren Emissionsfaktoren an CO und VOC als lange Taktzyklen von 120 Minuten Dauer.

Die über den ganzen Abbrandzyklus erfassten Emissionsfaktoren bestätigen die Größenordnung der vom BAFU im Jahr 2005 verwendeten Werte für CO und VOC, während für die Stickoxidemissionen um rund einen Faktor 2 tiefer Emissionsfaktoren gefunden wurden. Insbesondere im Fall der Holzpellets ist allerdings zu beachten, dass die tiefen Stickoxidemissionen nur für Holzpellets mit geringem

Stickstoffgehalt gelten. Bei den Staubemissionen wurden in der vorliegenden Untersuchung Werte ermittelt, die zwischen den Emissionsfaktoren des BAFU von 2001 und den vom BAFU per 2005 reduzierten Werten liegen. Gegenüber den in [Nussbaumer 2010] für das BAFU kürzlich aktualisierten Vorschlägen wurden bei den vorliegenden Messungen tendenziell höhere Werte für NO_x, CO und VOC bei gleichzeitig tieferen Werten für Staub gefunden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in der vorliegenden Untersuchung zeigte, dass bei Stückholzkesseln die schlechten Starts und bei Pelletkesseln die kurzen Taktintervalle zu einer deutlichen Erhöhung an VOC und weniger ausgeprägt an CO führen, jedoch nur geringfügig höhere Staubemissionen in Form von direkt im Abgas vorhandenen Feststoffen verursachen. Bei der Bewertung der vorliegend ermittelten Emissionsfaktoren ist allerdings zu beachten, dass sie sich auf moderne und mit dem Qualitätssiegel ausgestattete Kessel beziehen und keinen Fehlbetrieb berücksichtigen und dass auch die Staubfaktoren nur für Holzbrennstoffe mit geringem Aschegehalt gelten.

Die Auswertung der Schadstoffkomponenten zeigt, dass während der Startphase eine hohe Korrelation zwischen VOC und CO besteht und CO somit während der Startphase als Indikator für VOC dienen kann. Da während der Startphase nur ein moderater Anstieg der Staubemissionen beobachtet wird, kann zwar auch zwischen CO und Staub ein Zusammenhang gefunden werden. Dieser ist jedoch weniger ausgeprägt. Außerdem zeigt die deutliche Erhöhung der organischen Emissionen während des Starts, dass die organischen Verbindungen für die Startphase besonders relevant sind und durch Bildung von primären organischen Aerosolen via Kondensation und von sekundären organischen Aerosolen via fotochemischen Reaktionen einen mengenmäßig und von der Wirkung her bedeutenderen Beitrag zum Feinstaub verursachen als der im heißen Abgas ermittelte Feststoff.

Neben den nach heutiger Norm erfassten Schadstoffkomponenten sind im Bericht Messungen von Partikelanzahl und -grösse beschrieben, die zusätzliche Informationen liefern, ohne die bisherigen Messungen direkt zu ersetzen.

Zudem wird die optische Erscheinung der Partikel bei verschiedenen Betriebszuständen aufgezeigt und in Zusammenhang mit der Identifikation an organischen Schadstoffen in flüchtiger und kondensierter Form diskutiert. Dazu werden die Planfilter der gravimetrischen Feststoffmessung und die nach der Kondensatstufe nachgeschalteten Backup-Filter beschrieben. So weist bei allen Feuerungen eine starke Schwärzung der gravimetrischen Filter während des Starts auf eine relevante Russbildung hin, die jedoch bei den guten Feuerungen während des stationären Betriebs zu einem erheblichen Teil durch weisse, auf Salze hinweisende Partikel ersetzt wird. Während des Starts weist eine bräunliche Färbung der Backup-Filter auf organische Kondensate hin, die im Ausbrand auch auf den gravimetrischen Filtern erkennbar werden, wo sie während der Startphase vermutlich durch Russ überdeckt werden.

Im weiteren wird die Partitionierung der Kohlenwasserstoffe in Methan und NMKW beschrieben und aufgezeigt, dass sowohl für Stückholz- als auch für Pelletkessel im Mittel ein Drittel der Kohlenwasserstoffe als Methan und zwei Drittel als NMKW vorliegen. Von den NMKW wiederum liegen rund die Hälfte als kondensierbare Verbindungen vor.

Die vorliegenden Untersuchungen ergänzen Resultate, die in anderen Arbeiten erhoben oder zum Teil als Einzelwerte vor dem Vorliegen der Gesamtauswertung bereits verwendet wurden. Dies betrifft insbesondere die Arbeiten [Doberer et al. 2009, Nussbaumer 2010 und Good & Nussbaumer 2010]. Obwohl zwischen den verschiedenen Arbeiten keine grundlegenden Widersprüche bestehen, weichen die vorliegend dokumentierten Zahlenwerte in einigen Fällen aufgrund der bei experimentellen Erhebungen üblichen Bandbreite der Resultate von den bereits publizierten Resultaten ab.

2 Ausgangslage

Holzfeuerungen tragen massgeblich zum Feinstaub in der Umgebungsluft und dabei insbesondere zum gesundheitlich besonders relevanten Anteil an Russ und organischen Verbindungen bei. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass die Art und Höhe der Schadstoffemissionen durch die Betriebsweise der Feuerungen massgeblich beeinflusst wird. Aus diesem Grund wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie und des Bundesamts für Umwelt eine Untersuchung durchgeführt in der der Einfluss der Betriebsweise auf Holzfeuerungen bis 70 kW erfasst wird.

In einem ersten Teil der Arbeit wurden Holzöfen für Stückholz und Holzpellets untersucht und die Resultate in einem separaten Schlussbericht dokumentiert [Doberer et al. 2009]. Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse der Untersuchungen an Kesseln für Stückholz und Holzpellets. Für die Ausgangslage zur Arbeit und die ausführliche Literatur wird auf den Schlussbericht zum ersten Teil der Arbeit [Doberer et al. 2009] verwiesen und auf eine Wiederholung an dieser Stelle verzichtet.

3 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll zur Beantwortung folgender Fragen beitragen:

- Was ist der Einfluss der wichtigsten Betriebsparameter wie Holzqualität und Holzfeuchtigkeit auf die Schadstoffemissionen von Holzkesseln bis 70 kW.
- Wie grosse sind die Anteil an Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMKW) an den Gesamtkohlenwasserstoffen (KW). Dies ist entscheidend, da Methan ein starkes Treibhausgas ist, während NMKW potenziell gesundheitsschädlich sind.
- Welche Emissionsfaktoren beziehungsweise spezifischen Emissionsfrachten über einen ganzen Betriebszyklus sind unter praxisnahen Betriebsbedingungen zu erwarten.
- Wird das Emissionsverhalten von Holzkesseln durch die heutige Typenprüfung repräsentativ charakterisiert und stellt die Typenprüfung sicher, dass Holzfeuerungen auf den Markt kommen, die unter Praxisbedingungen geringe Schadstoffemissionen erzielen.
- Welche Zusammenhänge können zwischen Kohlenmonoxid und Feststoffen erwartet werden. Kann Kohlenmonoxid als aussagekräftiger Indikator für die Umweltrelevanz der Gesamtemissionen verwendet werden. Welche Abhängigkeiten treten zwischen CO und Kohlenwasserstoffen auf und wie weit kann CO als Indikator für KW dienen.

4 Methodik

4.1 Untersuchte Holzfeuerungen

Die Emissionsmessungen der vorliegenden Untersuchung wurden an drei modernen Stückholzkesseln, an einem alten Stückholzkessel (Baujahr 1983) sowie an drei modernen Pelletkesseln durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Kenngrößen der Feuerungen.

Tabelle 1 Kenngrößen der untersuchten Stückholzkessel und der Pelletkessel nach Herstellerangaben.
SL: Sekundärluft; PL: Primärluft; GL: Gesamtluft.

Kessel	Stückholz				Pellet		
	A	B	C	D	E	F	G
Nennwärmleistung	40 kW	30 kW	35 kW	45 kW	20 kW	10 kW	11 kW
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	93%	91%	93%	k.A.	91%	91%	93%
Gewicht	800 kg	700 kg	450 kg	k.A.	300 kg	400 kg	250 kg
Wasserinhalt	220 L	170 L	120 L	k.A.	75 L	65 L	30 L
Abgasmassenstrom	20 g/s	21 g/s	22 g/s	k.A.	10 g/s	6 g/s	6 g/s
Lambdasonde	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Leistungsregelung	60-100%	60-100%	50-100%	Ein/Aus	30-100%	30-100%	30-100%
Ventilator	Abgas	Abgas	Zuluft/Abgas	nein	Abgas	Abgas	Abgas
Luftklappe	SL/PL	SL/PL	SL/PL	GL	SL/PL	SL/PL	SL/PL

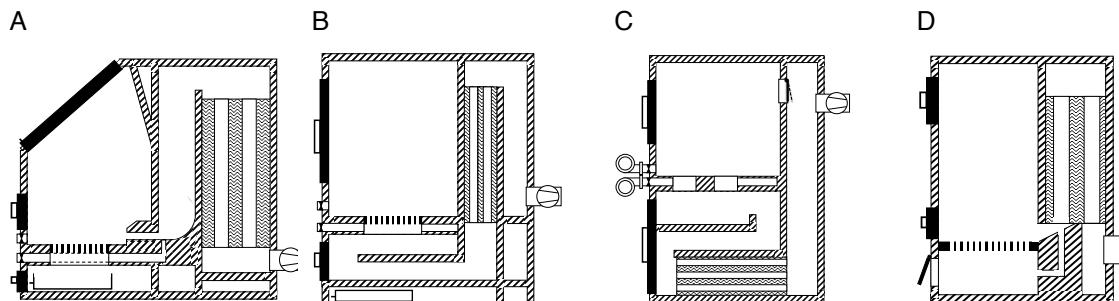


Bild 1 Aufbau der Stückholzkessel A bis D.

4.2 Versuchsprogramm

Die Emissionen der Stückholzkessel wurden vorab bei 'Betrieb gemäss Bedienungsanleitung' erhoben, was in Folge als Referenzbetrieb bezeichnet wird. Dabei wurde der kalte Kessel mit gereinigtem Rost gemäss Bedienungsanleitung angefeuert und eine Brennstoffcharge verfeuert. Um praxisnahe Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Kessel dabei mit Rücklaufhochhaltung betrieben. Dies entspricht dem realen Betrieb in der Praxis, der im Laborversuch nachgebildet wurde.

Zusätzlich wurden die Stückholzkessel bei 'Betrieb gemäss Typenprüfung' betrieben. Dabei wurde der kalte Kessel mit gereinigtem Rost mit einer Brennstoffcharge angefeuert, um eine Grundglut zu erreichen. Auf die Grundglut wurden nach dem Vorgehen gemäss Typenprüfung zwei weitere Brennstoffchargen nachgelegt. Der Vergleich der beiden Betriebsweisen erlaubt Aussagen dazu, wie weit die in der Typenprüfung erhobenen Emissionen vom realen Betrieb in der Praxis abweichen.

Daneben wurden Varianten von typischem 'Fehlbetrieb' untersucht.

Nachfolgend werden die drei Betriebsweisen beschrieben. Wenn nichts anderes vermerkt ist, wurde als Brennstoff zwei Jahre gelagertes, trockenes Buchenholz mit einem Wassergehalt w von weniger als 20% und einer Scheitgrösse von rund 50 cm auf 12 cm verwendet. Lediglich bei Fehlbetrieb wurde davon abweichendes Holz verwendet und entsprechend dokumentiert.

Betrieb gemäss Bedienungsanleitung (umfasst den Abbrand einer Brennstoffcharge):

Der **Kaltstart** bzw. das Anfeuern des kalten Kessels wird wie in Bild 2 beschrieben ausgeführt. Das Anfeuern wird jeweils gemäss Bedienungsanleitung durchgeführt. Die empfohlenen Methoden sind ähnlich und basieren auf einer unteren Schicht aus feinem und leichtentzündlichem (Nadel-)Holz, auf das die Anzündhilfe und das eigentliche Brennholz gelegt werden. Als Anzündhilfe wird zur Einheitlichkeit und besseren Reproduzierbarkeit immer wachsgetunkte Holzwolle verwendet, auch wenn in der Praxis zum Beispiel auch zerknülltes Zeitungspapier verwendet wird.

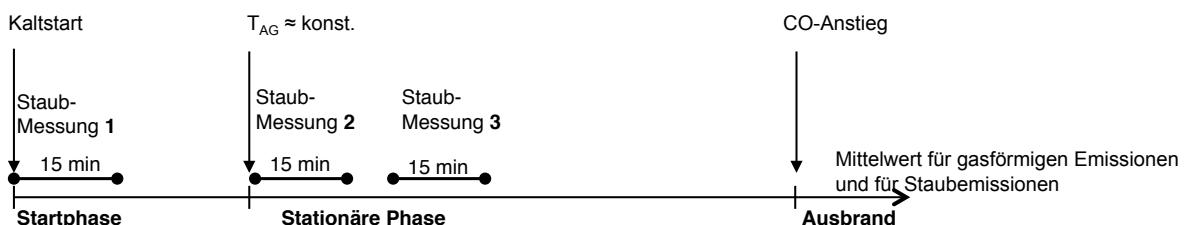


Bild 2 Zeitlicher Verlauf der Messintervalle während des Betriebs gemäss Bedienungsanleitung. Während der Startphase wird eine Messung durchgeführt, in der stationären Phase jeweils zwei, aus denen ein Mittelwert berechnet wird. Die Messdauer beträgt jeweils 15 Minuten.

Die Messung während der **Startphase** beginnt direkt anschliessend an das Anzünden und beinhaltet das Schliessen der Brennkammertür. Die Messung der Startphase umfasst 15 Minuten und beinhaltet eine gravimetrische Staubmessung sowie die Messung der Abgaszusammensetzung. Die teils optische Aufforderung zum Schliessen der Brennkammertüre durch die Kesselregelung erschien meist innerhalb der ersten fünf Minuten nach dem Anzünden.

Rund eine Stunde später, wenn sich die Abgastemperatur stabilisiert hat, folgen ein bis zwei weitere Staubmessungen während der **stationären Phase**. Zum Teil wird auch eine Staubmessung während der **Ausbrandphase** durchgeführt. Für die kontinuierlich bestimmten gasförmigen Emissionen werden die Mittelwerte während dieser Perioden der Staubmessungen berechnet. Die Abgasmessungen die-

nen zur Normierung auf den Bezugs-Sauerstoffgehalt (O_2) sowie zur Beurteilung der Korrelationen zwischen gasförmigen Schadstoffen und den Staubemissionen. Der Kaminzug wird gemäss Typenprüfung während des gesamten Versuchs auf konstant 12 Pascal eingestellt bzw. geregelt.

Betrieb gemäss Typenprüfung (umfasst insgesamt den Abbrand von drei Brennstoffchargen):

Die Messung gemäss Typenprüfung umfasst zwei aufeinanderfolgende stationäre Abbrandphasen mit Nachlegen auf Grundglut. Der kalte Kessel mit gereinigtem Rost muss dazu vorgängig mit einer ersten Brennstoffcharge angefeuert werden, um eine Grundglut aufzubauen. Danach wird eine erste volle Brennstoffcharge auf die Grundglut nachgelegt und verfeuert. Sobald wiederum eine vergleichbare Grundglut erreicht ist, wird anschliessend eine zweite volle Brennstoffcharge nachgelegt.

Die Mittelung der gasförmigen Emissionen umfasst die Periode vom ersten Nachlegen bis zum zweiten Erreichen der Grundglut. Die Staubmessung wird in der Regel innerhalb von fünf Minuten nach dem Nachlegen gestartet. Während der beiden Abbrandphasen werden je zwei Staubmessungen durchgeführt und gemittelt.

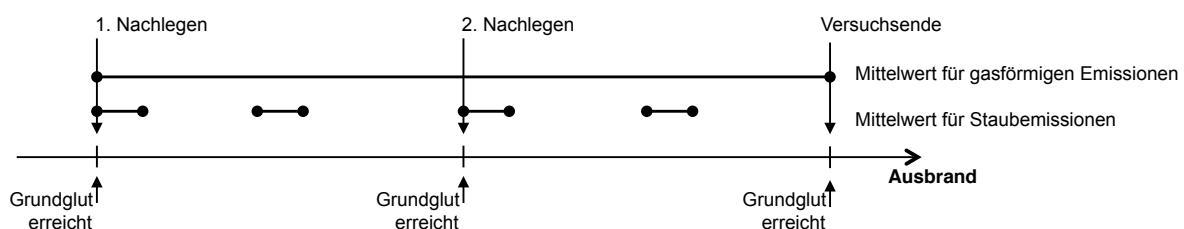


Bild 3 Zeitlicher Verlauf der Messintervalle während des Betriebs gemäss Typenprüfung.

Fehlbetrieb:

Zusätzlich werden zu Vergleichszwecken folgende in der Praxis häufige Betriebsarten untersucht, die im Bericht als 'Fehlbetrieb' bezeichnet werden:

- Rundholz mit anhaftender Rinde
- Verstocktes Holz
- Waldfrisches Holz
- Füllraum nur zur Hälfte gefüllt.

4.3 Emissionsmessungen

Die Emissionsmessungen umfassen den gravimetrischen Gesamtstaub (diskontinuierlich), sowie die kontinuierliche Bestimmung der CO-, KW-, NMKW und NO_x-Emissionen. Alle Emissionen werden gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) in mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ angegeben und mit folgenden Verfahren bestimmt:

- Gravimetrische Feststoffmessung: gemäss VDI 2066, isokinetische Probenahme bei 160°C
- CO-Messung: NDIR
- Kohlenwasserstoff-Messung (KW): Flammenionstationsdetektor (FID).
Unterscheidung von Methan (CH₄) und NMKW:
Messkanal 1 misst KW als unveränderte Gesamtkohlenwasserstoffe im Abgas.
Messkanal 2 misst Methan, indem alle Kohlenwasserstoffe ausser Methan vor der Analyse mittels Konverter zu CO₂ oxidiert werden.
NMKW werden als Differenz (KW minus Methan) bestimmt
- NO- und NO₂-Messung: Chemilumineszenz-Detektor (CLD).
NO_x wird bestimmt als (NO plus NO₂) und angegeben als NO₂.
- O₂-Messung: Paramagnetische Detektion
- CO₂-Messung (als Kontrollgrösse): NDIR
- Gastemperaturen: Netzmessung mit 5 Thermoelementen Typ K
- Wassertemperaturen: Thermistoren PT100.

4.4 Wärmeleistungsmessung

Die Bestimmung der zugeführten Feuerungswärmeleistung basiert auf einer Geschwindigkeitsmessung im Abgaskanal zur Ermittlung des Abgasvolumenstroms sowie einer Bilanzierung des Kohlenstoffs im Abgas. Die Bestimmung der Wärmeleistung des Kessels basiert auf einer Durchflussmessung im Kesselkreis und der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur. Für diese Messungen kommen folgende Messprinzipien zum Einsatz:

- Abgasgeschwindigkeit: Differenzdruck am Pitotrohr
- Durchflussmessung: Magnetisch-induktiv
- Wassertemperaturen: Thermistoren PT100.

4.5 Definition von Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren geben die Emissionen *pro Energieeinheit* an und werden im vorliegenden Bericht als gewichteter Mittelwert *über einen gesamten Betriebszyklus* ausgewiesen. Die Emissionen werden dazu je Abbrandphase mit dem Abgasvolumenstrom gewichtet. Da die Emissionen im Ausbrand ausser für Kohlenmonoxid mengenmässig kaum ins Gewicht fallen, wurden die Emissionsfaktoren für Stückholzkessel unter Berücksichtigung der Startphase und der stationären Phase berechnet. Für CO resultieren bei Einbezug des Ausbrands somit höhere Emissionsfaktoren als im vorliegenden Bericht ausgewiesen.

Die Emissionsfaktoren werden in Übereinstimmung mit dem Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen [BAFU, 2005] in mg/MJ angegeben, wobei sich die Angaben in MJ auf die als Heizwert zugeführte Energie beziehen.

Zur Umrechnung auf mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ sind die Zahlen in mg/MJ für einen Heizwert von 18.3 MJ/kg und eine Holzfeuchtigkeit von u = 20% mit einem Faktor 1.5 zu multiplizieren [Wagner und Nussbaumer, 1994].

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Übersicht der Emissionen von Stückholz- und Pelletkesseln

Tabelle 2 zeigt die Emissionen der modernen Stückholzkessel (A, B, C), des alten Stückholzkessels D (Baujahr 1983) und der modernen Pelletkessel (E, F, G) während verschiedener Betriebsphasen.

Bei den Stückholzkesseln sind dies die Betriebsphasen:

- Start (Anfeuern des kalten Kessel gemäss Bedienungsanleitung)
- Stationäre Phase bei Nennleistung
- Ausbrand
- Nachlegen auf die Grundglut (nur Phase nach Nachlegen)
- Typenprüfung (ganzer Zyklus mit zweimal Nachlegen auf Grundglut wie vorne beschrieben).

Bei den Pelletkesseln sind dies die Betriebsphasen:

- Start (Starten des kalten Pelletkessels)
- Stationäre Phase bei Nennleistung
- Ausbrand
- Warmstart (Starten des betriebswarmen Pelletkessels)
- Takten (Zyklus mit Starten, stationärem Betrieb und Ausschalten bei einer Leistungsabnahme von 30% der Nennleistung. Zyklusdauer zwischen 40 und 80 Minuten). Daten zum Takten sind im separaten Kapitel ausgeführt (Kapitel 5.3.2).

Ab 1. Januar 2011 gelten für Neuanlagen folgende verschärften Anforderungen für die Konformitätserklärung nach LRV Anhang 5 Ziffer 212:

Für Stückholzkessel: Für CO 800 mg/m_n³ und für Staub 50 mg/m_n³ bei 13% Vol.-O₂

Für Pelletkessel: Für CO 300 mg/m_n³ und für Staub 40 mg/m_n³ bei 13% Vol.-O₂

Zusätzlich gelten die Grenzwerte nach EN 303-5, sofern diese strenger als die in der LRV aufgeführten sind. Zur Zeit betrifft dies den zusätzlichen Grenzwert für Kohlenwasserstoffe. Gemäss der geplanten Verschärfung der EN werden voraussichtlich auch die Werte für CO und Staub nach EN gemäss Tabelle 2 einzuhalten sein.

Die modernen Stückholz- und Pelletkessel erfüllen während des Prüfzyklus nach Typenprüfung alle gültigen und auch die strengerer, nach EN vorgesehenen Grenzwerte. Die Werte der Stückholzkessel betragen grossteils weniger als 50% der Grenzwerte, während die Pelletkessel die verschärften Grenzwerte grossteils zu über 50% auschöpfen.

Bei den Stückholzkesseln zeigt ein Vergleich zwischen den Bestwerten während der stationären Phase und den Typenprüfungswerten, dass die Erfassung eines längeren Zeitraums bei der Typenprüfung sicherstellt, dass Werte ausgewiesen werden, die deutlich über den kurzfristig erzielbaren Bestwerten liegen. Da die Emissionen der Stückholzkessel während des Abbrands eine erhebliche Bandbreite aufweisen, ist eine ausreichend lange Betrachtungsdauer somit notwendig.

Beim Kaltstart der Stückholzkessel liegen die Staubwerte unter guten Startbedingungen in der Grössenordnung der Grenzwerte oder knapp darüber. Demgegenüber sind die CO-Emissionen deutlich über den für die Typenprüfung verlangten Grenzwerten. Sofern somit eine Prüfung während des Kaltstarts verlangt werden soll, bietet sich eine Begrenzung der CO-Emissionen an, wie in [Good & Nussbaumer 2010] ausgeführt. Während des Kaltstarts sind ausserdem vor allem die Kohlenwasserstoff-Emissionen lufthygienisch kritisch und übersteigen die während des Typenprüfungs-Zyklus verlangten Werte teilweise um ein Vielfaches. Zu beachten ist ausserdem, dass bei den Stückholzkesseln ein relevanter Anteil an schlechten Starts auftraten, die meist über doppelt so hohe Schadstoffwerte während bis zu mehr als einer Stunde verursachten und deren Auftreten nicht sicher nachvollziehbar war. Für die modernen Stückholzkessel wird deshalb als prioritär beurteilt, dass ein schlechtes Starten sicher verhindert wird. Dies wird durch die heutige Typenprüfung nicht erfasst. Auch das Nachlegen auf die Grundglut des betriebswarmen Kessels verursacht einen Anstieg der Emissionen vor allem an CO und KW. Dieser ist jedoch deutlich geringer als beim Kaltstart und wird ausserdem im Zyklus der Typenprüfung erfasst.

Der Ausbrand ist bei allen untersuchten Stückholzkesseln mit einer länger andauernden Phase (teilweise bis zu mehr als einer Stunde) von hohen CO-Emissionen. Diese Phase ist jedoch in der Regel mit moderaten Emissionen an Staub und Kohlenwasserstoffen verbunden.

Während des stationären Betriebs und unter Typenprüfungs-Bedingungen weisen die modernen Stückholzkessel deutlich tiefere Emissionen an Staub, CO und Kohlenwasserstoffen auf als der alte Kessel. Die CO-Emissionen des alten Stückholzkessels sind mit bis zu 16'000 mg/m_n³ weit über diesen Anforderungen und sie überschreiten auch den Grenzwert von 4'000 mg/m_n³ bei 13% Vol.-O₂ für Holzfeuerungen bis 70 kW nach LRV Anhang 3 Ziffer 522.

Auch bei den Pelletkesseln führt die Startphase grossteils zu deutlich höheren Emissionen an Staub, CO und Kohlenwasserstoffen. Dies gilt sowohl für den Kaltstart als auch für den Warmstart beim Takteten der betriebswarmen Kessel, wobei in einem Fall der Warmstart sogar grössere Emissionen als der Kaltstart verursachte. Der Einfluss des Taktens der Pelletkessel ist weiter in Kapitel 5.3.2 ausgeführt.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Schadstoffemissionen der untersuchten Stückholz- und Pelletkessel in verschiedenen Betriebsphasen im Vergleich zu den Grenzwerten für Anlagen bis 70 kW (LRV-Angaben vom Stand 15. Juli 2010; EN303-5 (2010) und prEN303-5).
Nachlegen/Warmstart: Nachlegen gilt für Stückholzkessel, Warmstart für Pelletkessel.

Kessel	Stückholzkessel bis 70 kW										Pelletkessel bis 70 kW			LRV					
	A			B			C			D	Anhang 3 Ziff 522 ²⁾	Anhang 4 Ziff 212 ³⁾	EN 303-5 4) (beste Klasse) 2010/2011	E	F	G	Anhang 3 Ziff 522 ²⁾	Anhang 4 Ziff 212 ³⁾	EN 303-5 4) (beste Klasse) 2010/2011
	Werte in mg/mn3 bei 13 Vol.-% O ₂	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	alt	2010/2011	2010/2011	2010/2011	2010/2011	2010/2011	2010/2011	2010/2011		
Feststoffe	Start (0-30MIN)	63	92	44	111	55	210	144						60	42	22			
	Stationäre Phase (best 15)	10		17		12		171											
	Ausbrand	53		80		41		169							35	—			
	(Staub)	25		35		20		n.b.							41	—			
	Nachlegen / Warmstart													65					
	Typenprüfung	17	±4	32	±7	17	±4	n.b.		60 / 50	109 / 44			24	28	19			
	Takten (40...80 Min Zyklus)													—	50..80	18			
CO	Start (0-30MIN)	911	3'352	2'699	5'426	3'285	9'517	5'219						748	930	1254			
	Stationäre Phase (best 15)	30		30		40		> 10'000		4'000							4'000		
	Ausbrand	> 10'000		> 10'000		> 15'000		> 20'000							3500	6300			
	Nachlegen / Warmstart	350		1'770		170		> 15'000						225	1000	2650			
	Typenprüfung	211		224		131		n.b.		800	3'635 / 509			49	195	12			300
	Takten (40...80 Min Zyklus)													—	800...1000	1600			2'181 / 364
KW (OGC)	Start (0-30MIN)	129	568	279	908	390	2'284	866						83	101	76			
	Stationäre Phase (best 15)	2		9		5		1'800											
	Ausbrand	22		21		38		1'270							103	113			
	Nachlegen / Warmstart	5		35		12		n.b.						39	19	130			
	Typenprüfung	3		20		9		n.b.		—	109 / 22			2	5	0.3			—
	Takten (40...80 Min Zyklus)													—	25	25			73 / 15
CH4	Start (0-30MIN)	28	161	71	241	92	592	232						—	28	20			
	Stationäre Phase (best 15)	1		2		2		850											
	Ausbrand	16		12		31		700						—	48	22			
	Nachlegen / Warmstart	2		22		4		n.b.						—	7	32			
	Typenprüfung	1		8		3		n.b.						—	2	0.1			
	Takten (40...80 Min Zyklus)													—	9	6			
NMKW	Start (0-30MIN)	101	407	208	667	298	1'692	634						—	73	56			
	Stationäre Phase (best 15)	2		3		7		950											
	Ausbrand	6		9		7		570						—	55	91			
	Nachlegen / Warmstart	3		13		8		n.b.						—	11.3	99			
	Typenprüfung	2		11		7		n.b.						—	3.3	0.2			
	Takten (40...80 Min Zyklus)													—	16	19			
NOx	Start (0-30MIN)	148	135	95	13	120	65	n.b.						—	64	114			
	Stationäre Phase (best 15)	142		156		164		n.b.											
	Ausbrand	72		101		96		n.b.						—	60	80			
	Nachlegen / Warmstart	155		132		180		n.b.						—	107	119			
	Typenprüfung	142		156		166		n.b.						—	100	106			
	Takten (40...80 Min Zyklus)													—	20...100	111			

¹⁾ Startphase "schlecht"

²⁾ In Betrieb stehende Holzfeuerungen

³⁾ Neuzulassung, Typenprüfung

⁴⁾ Werte umgerechnet von 10 auf 13 Vol.-% O₂

5.2 Emissionen von Stückholzkesseln

5.2.1 Emissionen während verschiedener Betriebsphasen

Staubemissionen

Die durch gravimetrische Feststoffmessung ermittelten Staubgehalte der drei modernen Stückholzkessel weisen in der stationären Betriebsphase Mittelwerte zwischen 17 mg/m_n^3 bis 32 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 auf.

In der Startphase weisen die Staubemissionen bei guten Starts Mittelwerte zwischen 44 und 63 mg/m_n^3 auf, bei schlechten Starts zwischen 92 bis 210 mg/m_n^3 . Die Startphase wird in einer separaten Untersuchung behandelt, die in [Good et al. 2010] zusammengefasst und im Schlussbericht [Good & Nussbaumer 2010] ausführlich behandelt wird.

In der Ausbrandphase erreichen die Staubgehalte Werte zwischen 41 bis 80 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 . Beim Nachlegen auf Grundglut, wie dies in der Typenprüfung zweimal erfolgt, betragen die Staubemissionen zwischen 20 und 35 mg/m_n^3 .

Der alte Stückholzkessel weist in allen Betriebsphasen Staubemissionen von 140 bis 170 mg/m_n^3 und damit bei stationärem Betrieb 5- bis 10-mal höhere Werte als moderne Stückholzkessel auf.

CO-Emissionen

Die CO-Emissionen können in der Startphase im Bereich von 900 bis $3'300 \text{ mg/m}_n^3$ bei 13 Vol.-% O_2 liegen, bei schlechten Starts können bis zu rund dreimal höhere Werte erreicht werden.

In der stationären Phase gemäss Typenprüfung betragen die CO-Emissionen 130 bis 220 mg/m_n^3 , bei optimalen Verbrennungsbedingungen sind CO-Werte unter 50 mg/m_n^3 möglich.

Beim alten Stückholzkessels steigen die CO-Werte nach der Startphase dagegen an und bleiben in der 'stationären' Phase auf einem sehr hohen Niveau von über $15'000 \text{ mg/m}_n^3$. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die durch die Kesseltemperatur gesteuerte Zuluftklappe während des gesamten Abbrands periodisch öffnet und schliesst.

In der Ausbrandphase steigen die CO-Emissionen der modernen Kessel markant an und erreichen Werte von über $10'000 \text{ mg/m}_n^3$. Da dies auf die Vergasung und unvollständige Verbrennung der Holzkohle zurückzuführen ist, bleiben die flüchtigen Kohlenwasserstoffe jedoch auf tiefem Niveau, weshalb die Ausbrandphase der modernen Stückholzkessel lufthygienisch trotz hoher CO-Werte nicht mit dem Zustand des alten Stückholzkessels im stationären Betrieb zu vergleichen ist.

Kohlenwasserstoffe

Während der Startphase und der stationären Betriebsphase verhalten sich die Kohlenwasserstoffe ähnlich wie die CO-Emissionen. Die Ausbrandphase und auch das Nachlegen sind dagegen in Bezug auf KW weniger kritisch als für CO.

Während der stationären Betriebsphase betragen die Kohlenwasserstoffe weniger als 10 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 , während des Ausbrands steigen sie zwar an, jedoch lediglich auf Werte von rund 20 bis 40 mg/m_n^3 . Im Vergleich zum alten Stückholzkessel sind die Fortschritte deutlich erkennbar, sind doch die KW-Emissionen der modernen Stückholzkessel in der stationären Phase rund 200-mal niedriger.

In der Startphase erreichen die Gesamtkohlenwasserstoffe rund 100 bis 400 mg/m_n^3 , bei schlechten Starts können sie allerdings bis ca. 600 bis $2'200 \text{ mg/m}_n^3$ erreichen. In der Startphase bestehen die Gesamtkohlenwasserstoffe im Mittel zu rund 40% aus kondensierbaren und somit besonders gesundheitsrelevanten Kohlenwasserstoffen.

Wie bereits die Untersuchung der Holzöfen gezeigt hat [Doberer et al. 2009], sind die Methanemissionen (CH_4) in der Startphase und in der stationären Phase deutlich niedriger als die NMKW und machen rund 20% bis 30% der Gesamtkohlenwasserstoffe aus. Nur in der Ausbrandphase, wenn fast ausschliesslich Holzkohle verbrennt, sind die Methanwerte höher und machen bis zu 60% der Gesamtkohlenwasserstoffe aus.

Stickoxide

Die Stickoxidwerte liegen in allen Betriebsphasen im Bereich von 100 bis 200 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 mit 150 mg/m_n^3 als typischem Mittelwert und sinken nur im Ausbrand bis auf rund die Hälfte des während des stationären Betriebs erreichten Wertes ab.

5.2.2 Emissionen mit einmaligem Nachlegen

Die Emissionen im Verlauf eines Abbrandes zeigen bei einem Stückholzkessel typische Muster, auch wenn jeder Abbrand unterschiedlich ist. Wie Bild 4 anhand eines Beispiels zeigt, dauert es eine gewisse Zeit, bis der Kessel beim Anfeuern aus kaltem Zustand die optimale Betriebstemperatur in der Brennkammer erreicht und die Emissionen auf ein tiefes Niveau sinken. Je nach Brennstoffqualität (Wassergehalt, anhaftende Rinde) und Anfeuermethode kann dies rund 15 bis 60 Minuten dauern. In jedem Fall werden kurzfristig CO-Peaks $> 10'000 \text{ mg}/\text{m}_n^3$ und KW-Peaks $> 100 \text{ mg}/\text{m}_n^3$ bei 13 Vol.-% O_2 beobachtet. Anschliessend stabilisiert sich der Verbrennungsvorgang bezüglich CO, KW und Feststoffen auf einem tiefen Emissionsniveau, bis sich der Beginn des Ausbrands durch Ansteigen der Luftüberschusszahl und der CO-Emissionen sowie weniger ausgeprägt auch der KW-Emissionen bemerkbar macht. Nach dem Nachlegen einer zweiten Brennstoffcharge auf das Glutbett tritt eine kurze Phase mit Luftmangel auf, die Emissionen erreichen aber rasch wieder das tiefe Emissionsniveau. Wieder macht sich der Ausbrand durch Ansteigen der Luftüberschusszahl und der CO- und KW-Emissionen bemerkbar. Die CO-Emissionen steigen nun markant, die KW-Emissionen moderat. Ursache ist die Verbrennungsregelung, die den ansteigenden Luftüberschuss durch Schliessen der Sekundärluftklappe und Öffnen der Primärluftklappe zu kompensieren versucht. Durch das Schliessen der Sekundärluft wird zwar ein vorzeitiges Auskühlen der Brennkammer verhindert, aber vermutlich werden dadurch auch CO-Strähnen in der Brennkammer ermöglicht. Ein Versuch mit einer im Ausbrand leicht geöffneten Sekundärluftklappe konnte den Anstieg der CO-Emissionen verzögern. In der Ausbrandphase steigen die Methan-Emissionen an, während die Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe kaum ansteigen. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass durch Vergasung von Kohle in der Ausbrandphase nebst CO in geringem Mass auch Methan gebildet werden kann, während aus der Holzkohle kaum noch flüchtige Kohlenwasserstoffe freigesetzt werden.

Die Feststoffemissionen, die jeweils als gravimetrisches Mittel über eine Probenahmedauer von 15 Minuten bestimmt werden, liegen im vorliegenden Beispiel in der Startphase auf einem Niveau von knapp 50 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 und sinken anschliessend auf ein tiefes Niveau von rund 5 mg/m_n^3 ab. Beim Nachlegen steigen sie auf ein Niveau von rund 25 mg/m_n^3 und sinken anschliessend wieder auf das tiefe Niveau von rund 5 mg/m_n^3 ab. Es ist bekannt, dass auch die Feststoffe beim Starten und Nachlegen einen kurzen, hohen Peak aufweisen, der jedoch bei der Summierung des Staubs über 15 Minuten nicht oder nur untergordnet in Erscheinung tritt. Quasi-kontinuierliche Messungen von Korngrössenspektrum und Anzahlverteilung (Particle number, PN) mittels Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) und Optical Particle Counter (OPC) zeigen erhöhte Emissionen an Aerosolen während der Startphase und beim Nachlegen [Klipfel & Nussbaumer 2006, Good & Nussbaumer 2010]. Während CO- und KW-Emissionen beim Starten rund einen Faktor 100 über den tiefen Emissionen der sta-

tionären Phase liegen, sind die Feststoffe beim Starten allerdings lediglich rund einen Faktor 5 bis 10 höher.

Nach einem Start aus kaltem Zustand dauert es in der Regel rund 60 bis 90 Minuten, bis sich die Kesselvorlauftemperatur auf dem erforderlichen Niveau stabilisiert hat und der Kessel seine Nennwärmeleistung abgibt.

Bild 4 zeigt den Sauerstoffgehalt, die Luftüberschusszahl, die CO-Emissionen, den Abgasvolumenstrom und die Abgastemperatur eines Stückholzkessels in der Ausbrandphase. Der Ausbrand kündigt sich durch den Anstieg der CO-Emissionen (im Beispiel kurz vor 20:30 Uhr) an. Dies lässt sich in diesem Fall weder am Sauerstoffgehalt noch an der Abgastemperatur sofort erkennen. Die Kesselsteuerung kann allerdings feststellen, ob zum Einhalten des O₂-Sollwerts die Sekundärluftklappe immer weiter geschlossen werden muss, während die Primärluftklappe geöffnet bleibt oder zunehmend öffnet. Ab ca. 20:50 h steigen die CO-Emissionen markant an während gleichzeitig nun auch der Sauerstoffgehalt bzw. der Luftüberschuss erkennbar ansteigen. Während den folgenden rund 60 Minuten bleiben die CO-Emissionen bei hohem Abgasvolumenstrom und damit auch die CO-Fracht äußerst hoch, bis das Abgasgebläse um ca. 21:45 h ausschaltet und auch die Primärluftklappe schliessen.

Bild 5 zeigt den Abgasvolumenstrom und die daraus berechneten CO- und KW-Frachten sowie den prozentualen Anteil der insgesamt emittierten CO- und KW-Menge im Verlauf des Abbrands. Bei den CO-Werten zeigt sich, dass rund 80% der über den gesamten Abbrand emittierten CO-Menge in der Ausbrandphase freigesetzt werden. Deutlich unterschiedlich verhalten sich die KW-Werte, rund 60% werden beim Starten, weitere 20% beim Nachlegen und nur 20% im Ausbrand freigesetzt.

Die hohen CO-Frachten während der Ausbrandphase sind bedingt durch die hohe CO-Konzentration bei grossem Abgasvolumenstrom. Obwohl CO kein vordringliches Problem für die Luftreinhaltung darstellt, können folgende Massnahmen zur Reduktion der CO-Emissionen im Ausbrand geprüft werden:

- Nachlauf des Abgasgebläses in der Ausbrandphase verkürzen
- Sekundärluftklappe während der Ausbrandphase leicht geöffnet lassen und erst nach dem Ausschalten des Abgasgebläses ganz schliessen.

Feststoffe: 46 <10 <10 26 <10 <10 mg/m_n^3 @13 Vol.-%

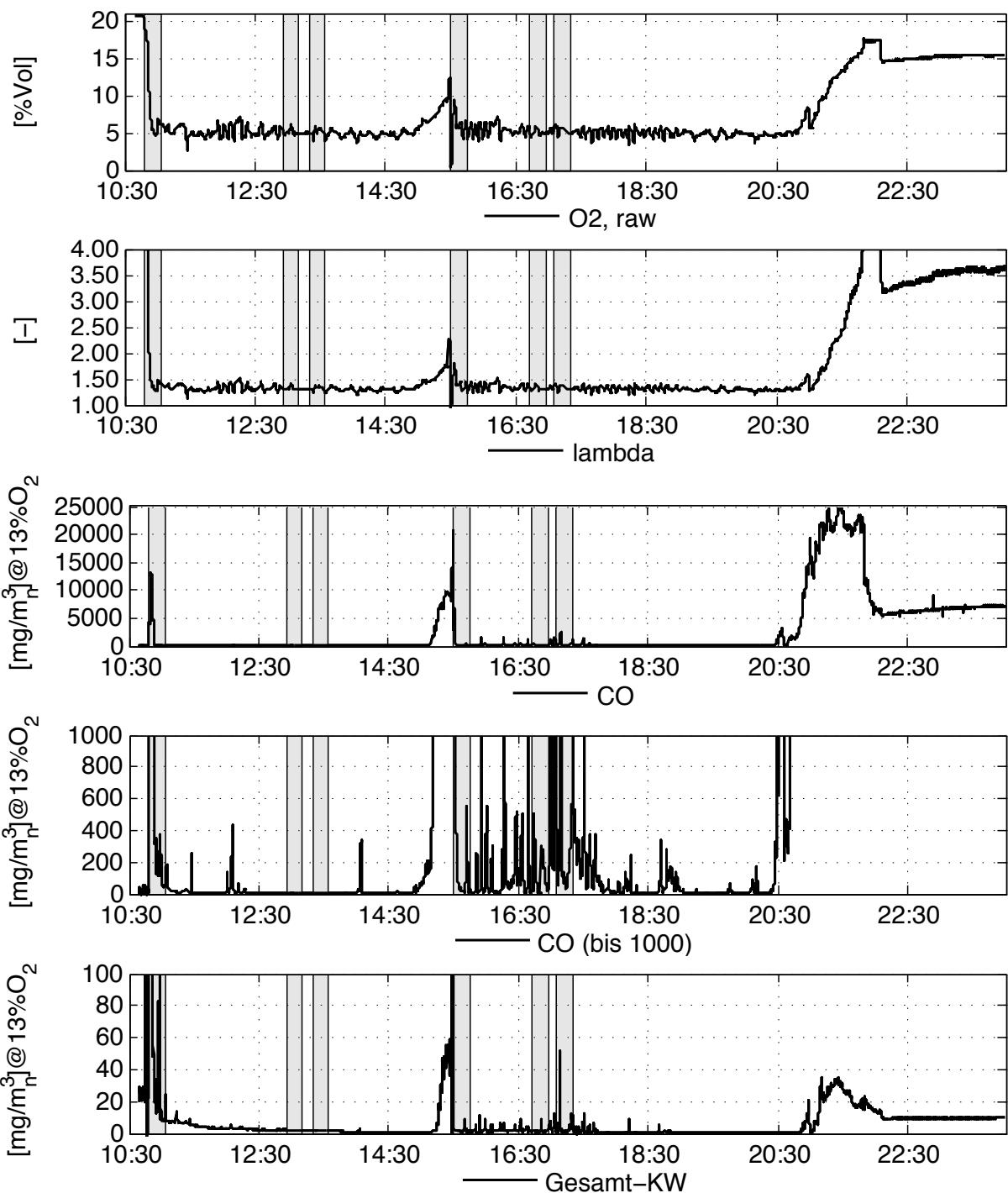


Bild 4 Typischer Verlauf der wichtigsten Kenngrößen und Emissionen eines modernen Stückholzkessels (A): Kaltstart (10:45), stationäre Phase, Nachlegen (15:30), stationäre Phase, Ausbrandbeginn (ca. 21:00), Ausschalten des Abgasgebläses (21:45). Grau: gravimetrische Staubmessungen.
Von oben nach unten: O₂-Gehalt, Luftüberschusszahl Lambda, CO-Gehalt mit Skala bis 25'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂, CO-Gehalt mit Skala bis 1'000 mg/m_n³, Gesamtkohlenwasserstoffe.

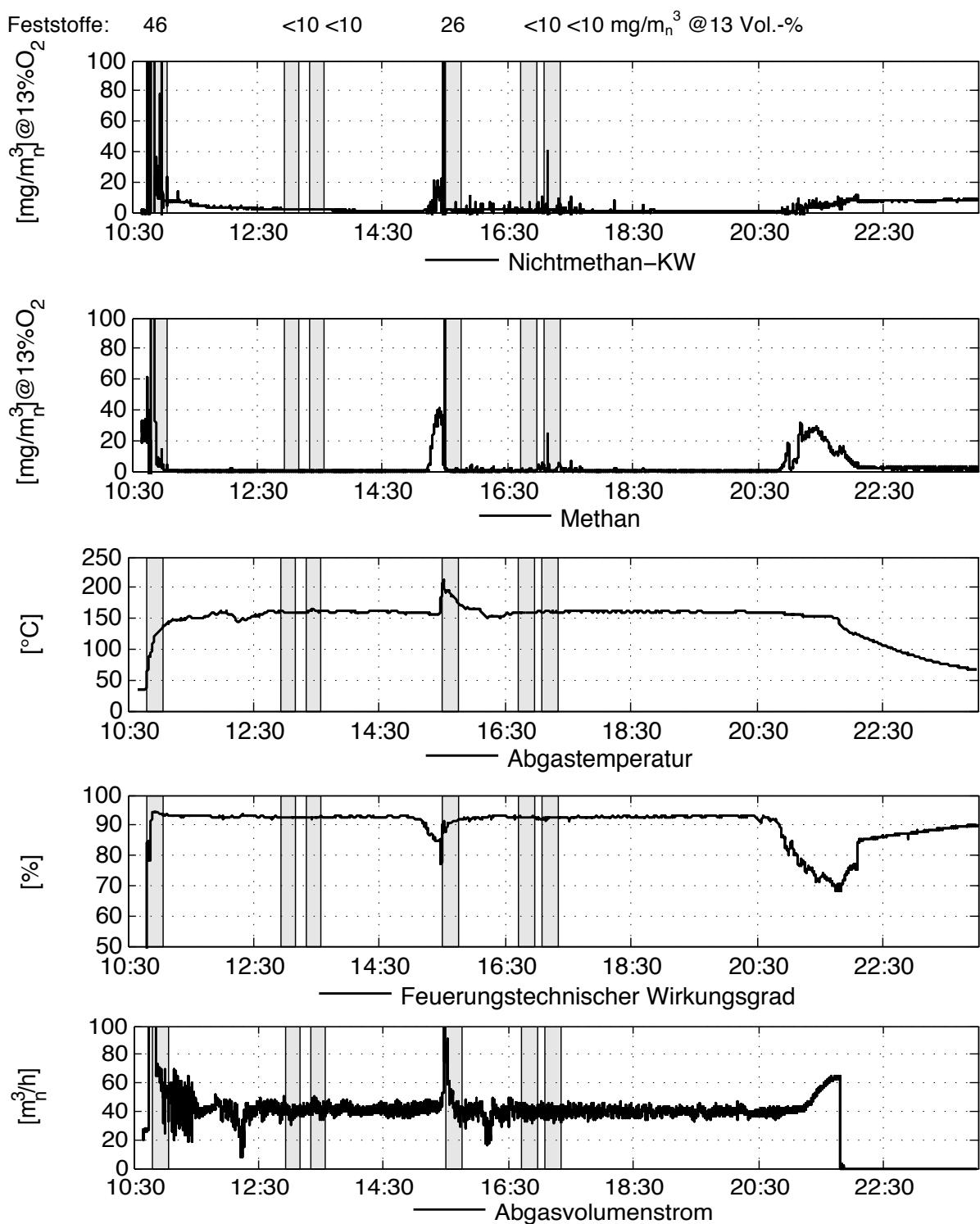


Bild 4

(Fortsetzung): Typischer Verlauf der wichtigsten Größen und Emissionen eines modernen Stückholzkessels (A): Kaltstart (10:45), stationäre Phase, Nachlegen (15:30), stationäre Phase, Ausbrandbeginn (ca. 21:00), Ausschalten des Abgasgebläses (21:45). Grau: gravimetrische Staubmessungen.
Von oben nach unten: Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe, Methan, Abgastemperatur, feuerungstechnischer Wirkungsgrad, Abgasvolumenstrom.

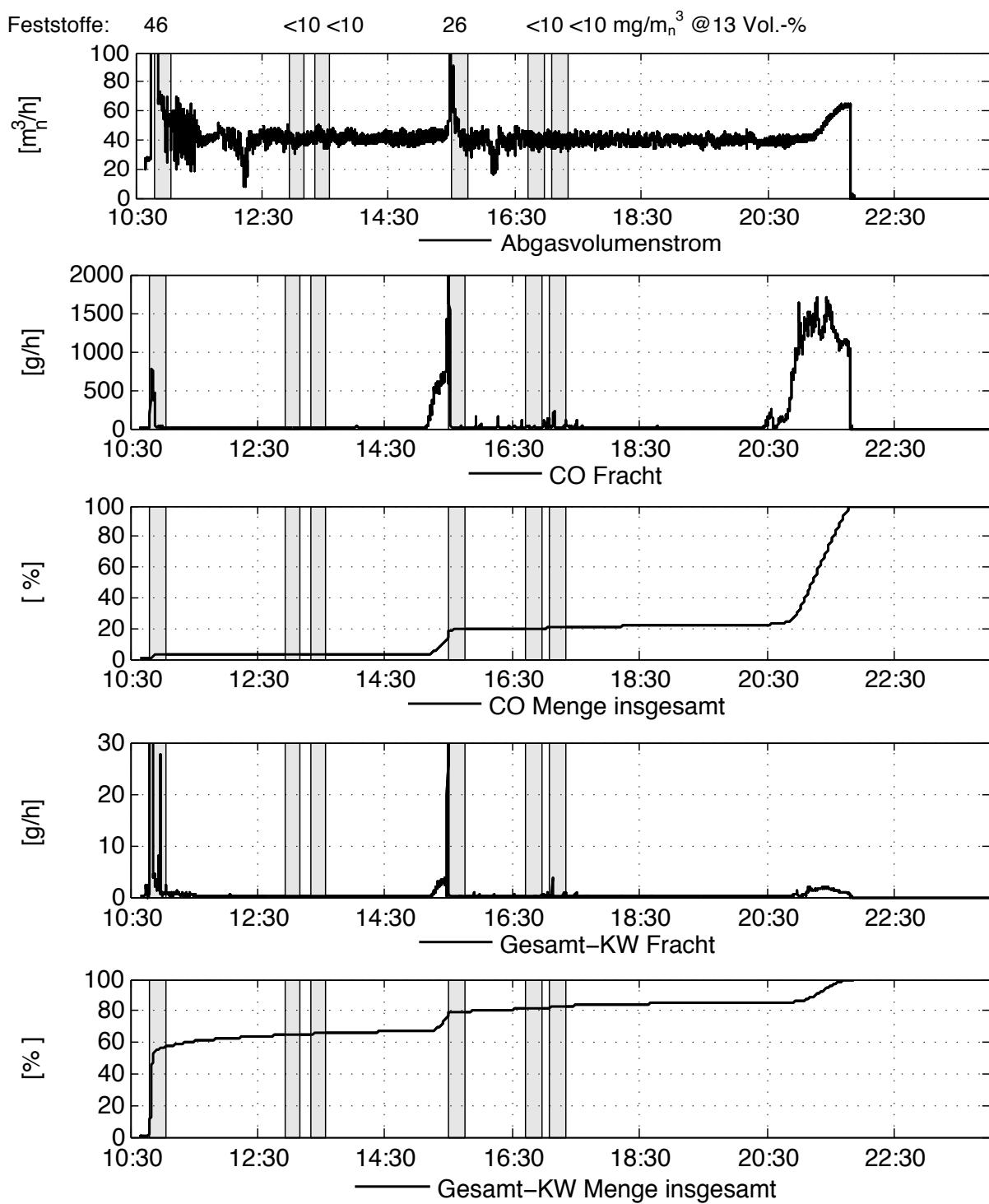


Bild 5 (Fortsetzung): Typischer Verlauf von Abgasvolumenstrom und Emissionsfrachten eines modernen Stückholzkessels. Grau: gravimetrische Staubmessungen.
Von oben nach unten: Abgasvolumenstrom in m³/h, CO-Fracht in g/h, prozentualer Anteil der integrierten CO-Menge im Vergleich zur über den gesamten Abbrand emittierten CO-Menge, KW-Fracht in g/h, prozentualer Anteil der integrierten KW-Menge im Vergleich zur über den gesamten Abbrand emittierten KW-Menge.

5.2.3 Emissionen von Stückholzkesseln bei Fehlbetrieb

Abbrandversuche mit waldfrischem Stückholz sowie mit Rundholz mit anhaftender Rinde führen in der Startphase zu deutlich höheren Feststoffwerten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es bei diesen Brennstoffen wesentlich länger dauert, bis die Verbrennungstemperatur in der Brennkammer genügend hoch wird, um einen vollständigen Ausbrand zu ermöglichen. Im ersten Fall, weil zusätzliches Wasser verdampft werden muss, im zweiten Fall, weil die Rinde das Aufheizen und Anbrennen der Holzsubstanz behindert. Die Feststoffwerte in der Startphase liegen bei diesen kritischen Brennstoffen im Bereich von ca. 150 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 im Vergleich zu $20 \text{ bis } 50 \text{ mg/m}_n^3$ bei trockenem Stückholz. Während der stationären Phase betragen die Feststoffwerte bei waldfrischem Holz und bei Rundholz rund $10 \text{ bis } 30 \text{ mg/m}_n^3$. Dies gilt auch für verstocktes Holz sowie wenn die Brennkammer beim Anfeuern nur zur Hälfte gefüllt wird. In der stationären Phase unterscheiden sich die untersuchten Brennstoffe im Gegensatz zur Startphase somit nur noch geringfügig.

Ein Vergleich der Ergebnisse an Holzöfen [Doberer et al. 2009] zeigt, dass der Betreibereinfluss bei Holzkesseln weniger ausgeprägt ist als bei Holzöfen. Dennoch kann abgeleitet werden, dass nur trockenes, zwei Jahre gelagertes Holz verwendet werden soll, was die Brennstoffanforderungen der LRV bestätigt. Beim Einschichten der Holzscheiter ist außerdem darauf zu achten, dass möglichst die rindenfreien Seiten der Holzscheiter beim Anzünden dem Feuer exponiert sind. Auch soll die Brennkammer wenn möglich vollständig gefüllt werden, damit die stationäre, emissionsarme Phase lang ist im Vergleich zur Startphase. Dies setzt in der Regel einen Wärmespeicher voraus und es verlangt ein geeignetes Management des Wärmespeichers, das durch den Betreiber erfolgt und durch die Steuerung des Kessels mit Informationen zum Ladezustand oder der Dauer, bis der Kessel wieder angefeuert werden soll, unterstützt werden kann.

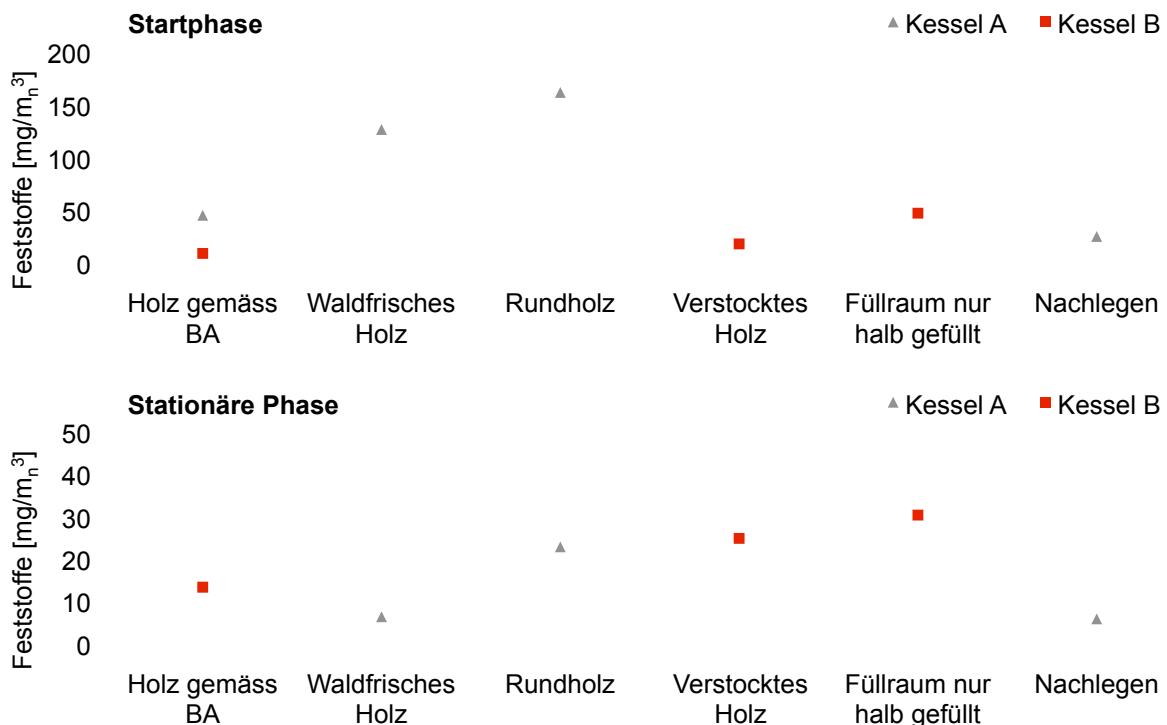


Bild 6 Feststoff-Emissionen bei verschiedenen Brennstoffen und Betriebsweisen während der Startphase (oben) und der stationären Phase (unten).

Die CO-Emissionen sind in der Startphase deutlich höher als in der stationären Phase (unterschiedliche Skalen in Bild 7) und betragen bei Fehlbetrieb (Rundholz) bis zu $7'000 \text{ mg/m}_n^3$ bei 13% Vol.-% O_2 . Auffallend sind auch die grossen Unterschiede in der Startphase bei Betrieb gemäss Bedienungsanleitung zwischen Kessel A mit rund $1'000 \text{ mg/m}_n^3$ und Kessel B mit nur 150 mg/m_n^3 , was allerdings statistisch nicht gesichert ist, da bei beiden Kesseln auch schlechte Starts auftraten. Wie schon bei den Feststoffen, führt auch bei CO besonders die Verwendung von Rundholz zu hohen Emissionen. In der stationären Phase ist dies der einzige Fehlbetrieb, der mit $6'900 \text{ mg/m}_n^3$ zu erhöhten CO-Emissionen führt, während die anderen Betriebsarten mit Werten zwischen 75 und 200 mg/m_n^3 unkritisch in Bezug auf CO sind.

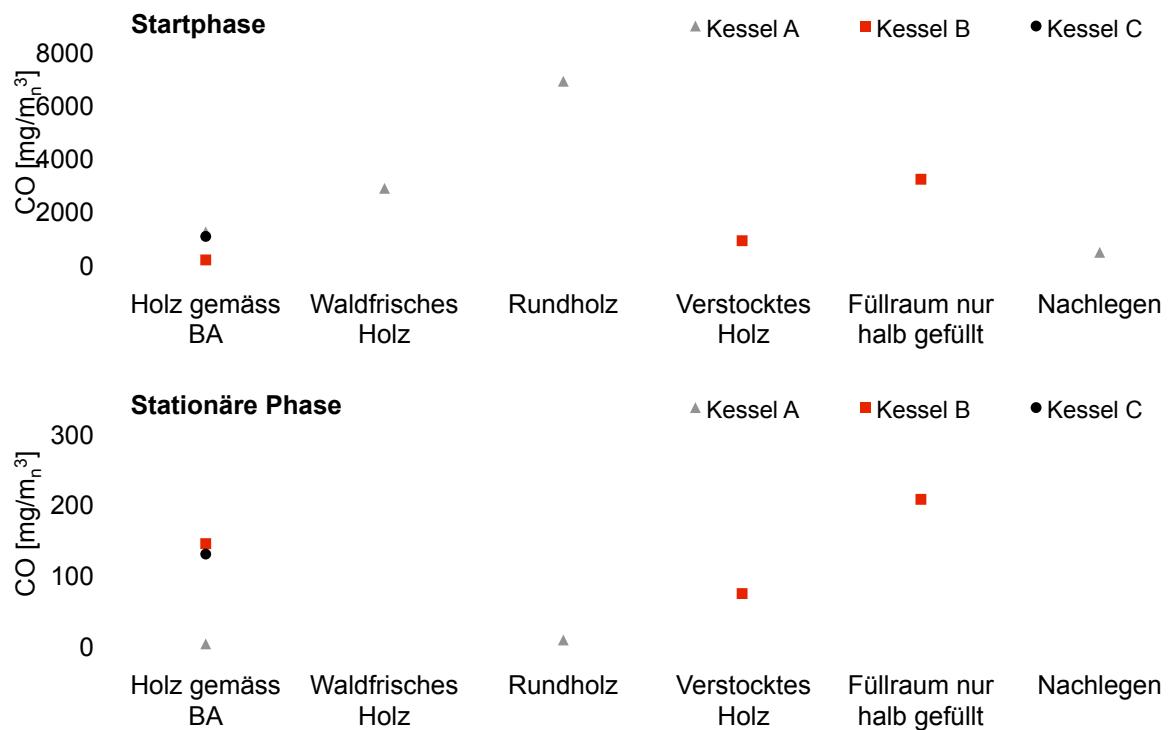


Bild 7 CO-Emissionen bei verschiedenen Brennstoffen und Betriebsweisen während der Startphase (oben) und der stationären Phase (unten).

Relevante NMKW-Emissionen sind auch bei Berücksichtigung von Fehlbetrieben nur in der Startphase gemessen worden, insbesondere auch bei Rundholz mit anhaftender Rinde.

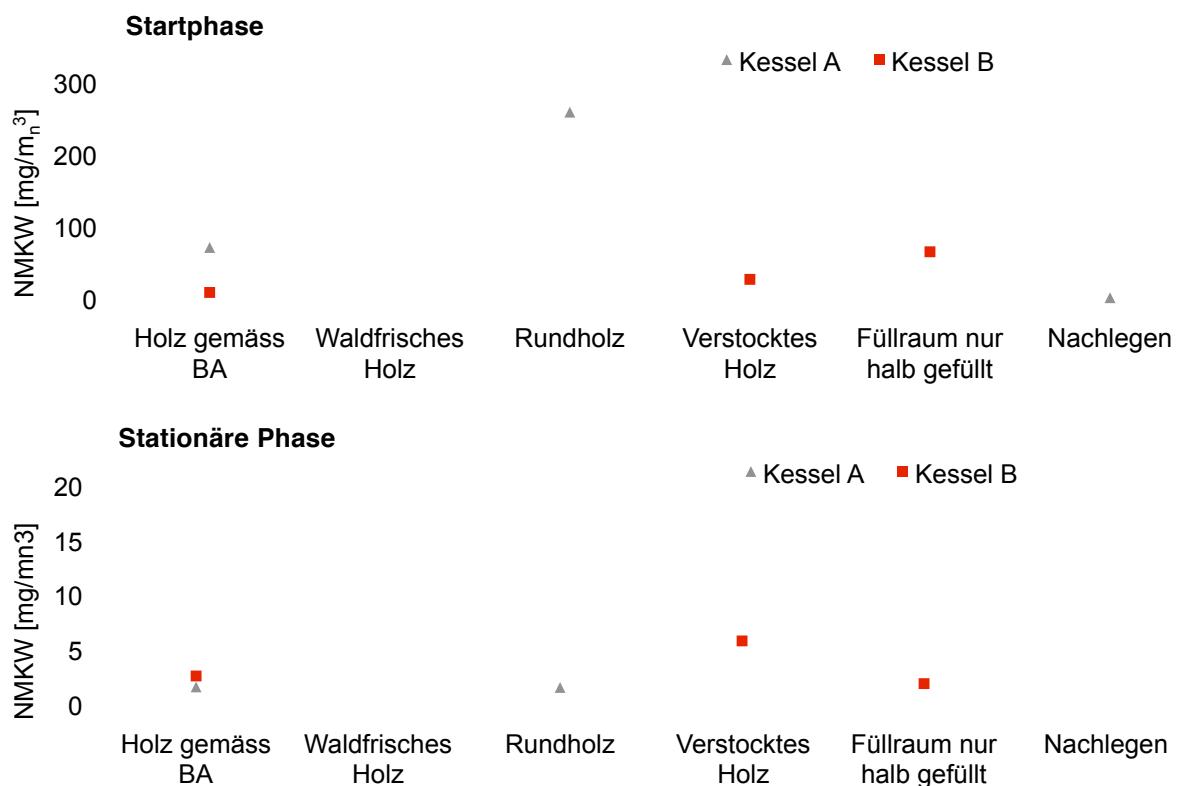


Bild 8 NMKW-Emissionen bei verschiedenen Betriebsbedingungen in der Startphase (oben) und in der stationären Phase (unten). Grau sind die Werte für Kessel A, rot für Kessel B eingezeichnet.

5.3 Emissionen von Pelletkesseln

5.3.1 Stationärer Betrieb bei Nennleistung und Teillast

Bild 9 zeigt die Emissionen eines modernen Pelletkessels beim Kaltstart, bei anschliessendem Betrieb bei Nennleistung und beim Ausschalten. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Resultate für stationären Betrieb bei verschiedenen Laststufen für Pelletkessel 1 (F) und 2 (G). Die bei stationärem Betrieb ermittelten Emissionswerte entsprechen annähernd den aus der Typenprüfung ausgewiesenen Daten.

Kessel 1 weist in der Grundeinstellung einen Luftüberschuss von über 2,5 und auch deutlich höhere Emissionen an CO, KW und Staub auf als Kessel 2. Während Kessel 2 die Grenzwerte für Feststoff und CO weit unterschreitet, steigen bei Kessel 1 die CO-Emissionen bei Teillast deutlich über den Wert von 300 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 an, wobei jedoch die Staubemissionen mit bis zu 32 mg/m_n^3 auf einem tiefen Niveau bleiben.

Die Korngrößenanalyse zeigt bei beiden Kesseln auf, dass bei Teillast eine Agglomeration zu grösseren Partikeln bei entsprechend reduzierter Anzahlkonzentration eintritt.

5.3.2 Taktender Betrieb

Taktender Betrieb kommt bei Pelletkesseln vergleichsweise häufig vor. Beim Takten wird der betriebswarme Kessel gestartet bzw. gezündet, bleibt einige Zeit in Betrieb und schaltet wieder aus. Bei den beiden untersuchten Kesseln 1 (F) und 2 (G) dauert das Starten rund 10 bis 15 Minuten. Das Ausschalten dauert vom Ausbrennen der Pellets bis zum Ausschalten des Gebläses rund 15 Minuten. Bild 10 zeigt die Emissionen eines Pelletkessels bei nicht-modulierendem Takten und einem Leistungsbedarf von 30% der Nennleistung, d.h. der Kessel regelt nach dem Starten auf Nennleistung und schaltet aus, sobald die Kesselausschalttemperatur überschritten wird. Nach dem Ausbrennen der restlichen Pellets werden das Gebläse ausgeschaltet und die Luftklappen geschlossen. Durch die Gewichtung der Emissionen mit dem Abgasvolumenstrom werden hohe Konzentrationen beim ausgeschalteten Zustand nicht mitberücksichtigt, da der Volumenstrom im Fall der annähernd dichten Klappen im geschlossenen Zustand als Null angenommen wird. Bei jedem Starten und jedem Ausschalten ist ein Emissionspeak zu erkennen. Beim Ausschalten werden diese Peaks nur solange berücksichtigt, bis die Luftklappen geschlossen sind.

Tabelle 4 zeigt die mit dem Abgasvolumenstrom gewichteten Emissionen beim Takten im Vergleich zum stationären Betrieb. Während die CO- und VOC-Emissionen beim Takten deutlich erhöht sind, sind die Feststoffemissionen nicht erhöht.

Tabelle 3 Emissionen der Pelletkessel bei stationärem Betrieb in verschiedenen Leistungsstufen.
(Pelletkessel 1 = F, Pelletkessel 2 = G).

Gewichtete Konzentrationen			Pelletkessel 1				Pelletkessel 2		
			Stationärer Betrieb bei				Stationärer Betrieb bei		
			100%	70%	50%	30%	100%	70%	30%
Lambda		[–]	2.3	2.6	2.9	3.1	1.7	1.8	2.2
CO	CO	[mg/m _n ³] @13%O ₂	193.7	307.3	570.7	1214.6	11.9	2.4	44.2
Gesamt-KW	VOC	[mg/m _n ³] @13%O ₂	3.5	2.3	17.3	8.2	0.3	0.3	0.7
Methan	CH ₄	[mg/m _n ³] @13%O ₂	2.1	1.9	16.6	3.9	0.1	0.1	0.3
Nichtmethan	NMVOC	[mg/m _n ³] @13%O ₂	3.3	2.2	16.7	4.4	0.2	0.2	0.4
NO _x	NO _x	[mg/m _n ³] @13%O ₂	99	101	97	93	106	106	103
Feststoff grav.		[mg/m _n ³] @13%O ₂	28	25	27	32	19	16	9
Partikel	Massenkonz.	[mg/m _n ³] @13%O ₂	31	28	47	54	24	16	21
Partikel	Anzahlkonz.	[1/cm _n ³] @13%O ₂	3.0E+07	2.1E+07	1.2E+07	9.3E+06	4.2E+07	2.4E+07	8.2E+06
Partikel	Grösse	[nm]	72.7	76.5	83.9	94.5	72.7	74.7	82.4

Tabelle 4 Emissionen der Pelletkessel bei instationärem Betrieb im Vergleich zu stationären Betrieb.

Gewichtete Konzentrationen			Starten	Stop	100% Taktten	mod. Taktten	100% Taktten	Stationär
			Kaltstart	Warmstart	bei 50% Last	bei 30% Last	bei 30% Last	
			Ganzer Zyklus					
Pelletkessel 1								
Lambda		[–]	9.7	3.2	9.8	4.0	4.3	3.4
CO	CO	[mg/m _n ³] @13%O ₂	928	1007	3729	809	920	830
Gesamt-KW	VOC	[mg/m _n ³] @13%O ₂	96	17	104	20	16	22
Methan	CH ₄	[mg/m _n ³] @13%O ₂	28	7	48	7	8	8
Nichtmethan	NMVOC	[mg/m _n ³] @13%O ₂	73	11	55	13	10	16
NO _x	NO _x	[mg/m _n ³] @13%O ₂	64	107	58	94	102	22
Feststoff grav.		[mg/m _n ³] @13%O ₂	42	41		32	34	39
Partikel	Massenkonz.	[mg/m _n ³] @13%O ₂	59	25		48	56	79
Partikel	Anzahlkonz.	[1/cm _n ³] @13%O ₂	3.7E+07	2.9E+07		2.7E+07	2.2E+07	2.3E+07
Partikel	Grösse	[nm]	79	71		76	80	102
Pelletkessel 2								
Lambda		[–]	8.1	4.6	7.4			3.1
CO	CO	[mg/m _n ³] @13%O ₂	1254	2644	6277			1614
Gesamt-KW	VOC	[mg/m _n ³] @13%O ₂	76	131	113			26
Methan	CH ₄	[mg/m _n ³] @13%O ₂	20	32	22			6
Nichtmethan	NMVOC	[mg/m _n ³] @13%O ₂	56	99	91			19
NO _x	NO _x	[mg/m _n ³] @13%O ₂	114	119	78			111
Feststoff grav.		[mg/m _n ³] @13%O ₂	22					18
Partikel	Massenkonz.	[mg/m _n ³] @13%O ₂	63					21
Partikel	Anzahlkonz.	[1/cm _n ³] @13%O ₂	8.5E+07					3.6E+07
Partikel	Grösse	[nm]	66					59

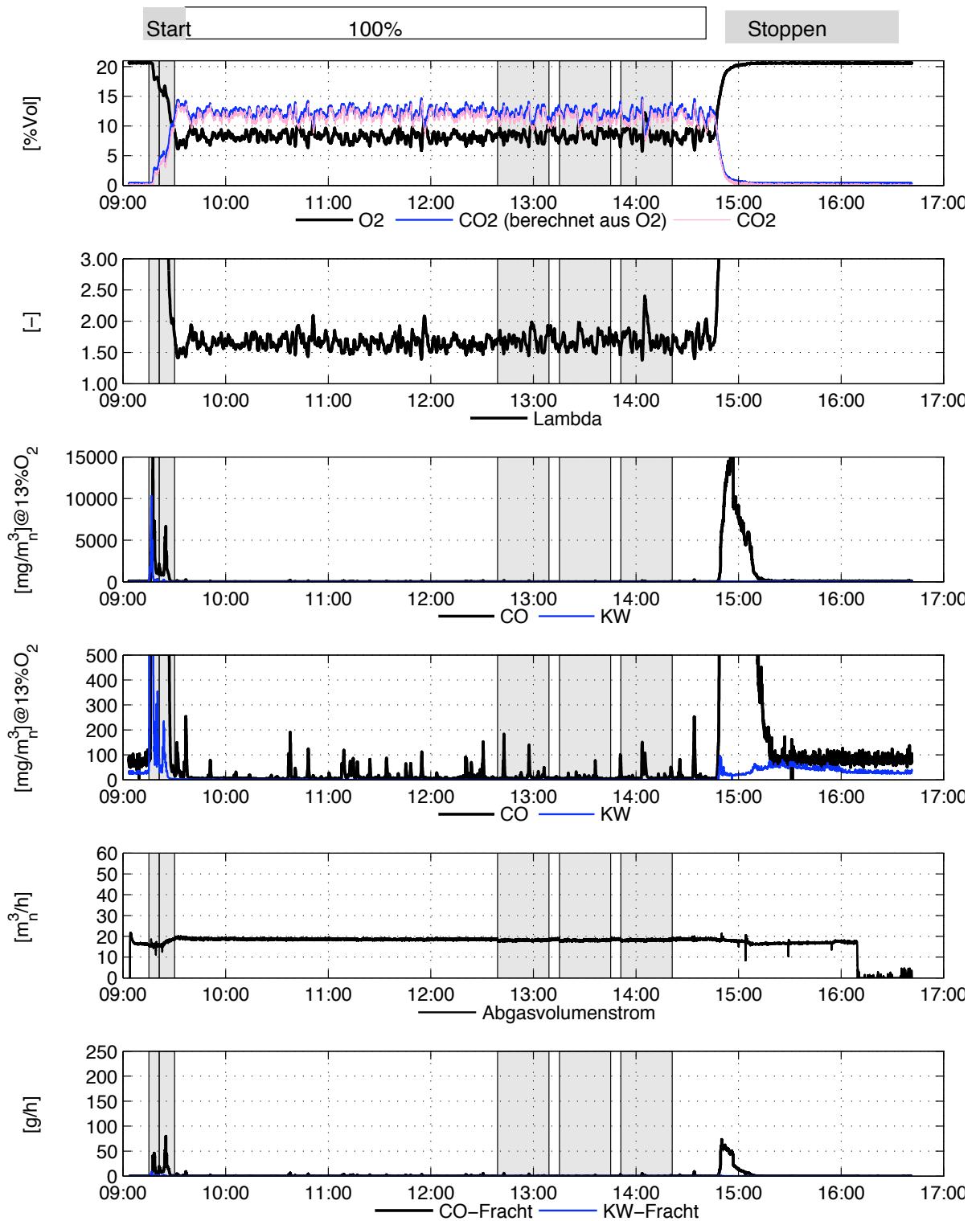


Bild 9

Emissionsverhalten von Pelletkessel 2 bei stationärem Betrieb bei Nennlast (100%).

1: O₂- und CO₂-Gehalt, 2: Luftüberschusszahl Lambda, 3: CO- und Kohlenwasserstoff (KW)-Gehalt bis 15'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂, 4: CO- und Kohlenwasserstoff (KW)-Gehalt bis 1'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂, 5: Abgasvolumenstrom, 6: CO- und KW-Fracht. 3 und 4 zeigen die gleichen Größen in unterschiedlichen Skalierungen.

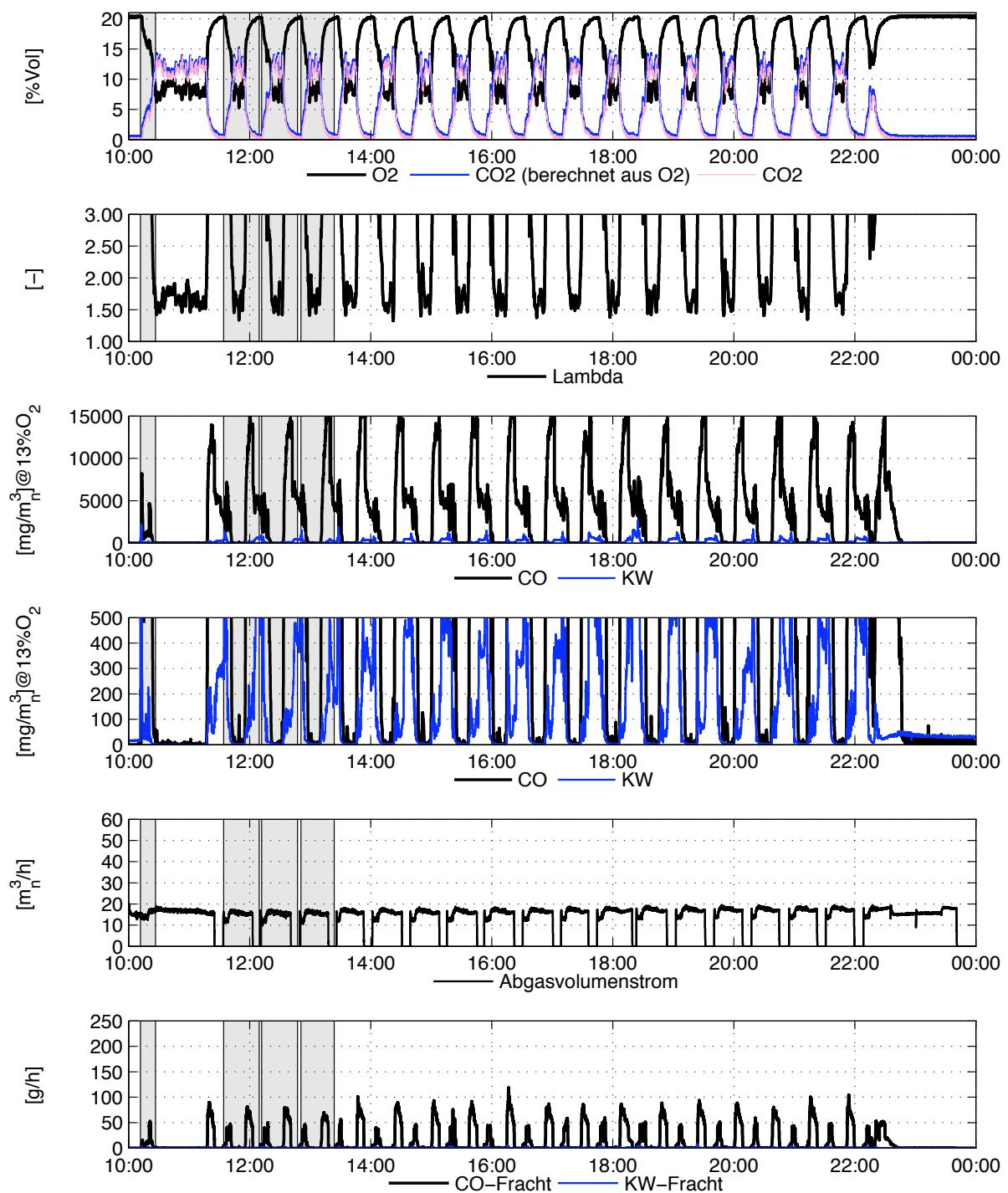


Bild 10 Emissionsverhalten von Pelletkessel 2 bei nicht-modulierendem Taktbetrieb (100%-Takten bei 30% Last).

1: O₂- und CO₂-Gehalt, 2: Luftüberschusszahl Lambda, 3: CO- und Kohlenwasserstoff (KW)-Gehalt bis 15'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ 4: CO- und Kohlenwasserstoff(KW)-Gehalt bis 1'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂, 5: Abgasvolumenstrom, 6: CO- und KW-Fracht. 3 und 4 zeigen die gleichen Größen in unterschiedlichen Skalierungen.

5.4 Korrelationen zwischen Schadstoffen

5.4.1 Staub und CO

Für die Inverkehrsbringung von Holzfeuerungen in der Schweiz müssen die Anforderungen der Typenprüfung nach EN 303-5 (CO, KW und Feststoffe) sowie die Anforderungen der LRV Anhang 5 Ziffer 212 (CO und Feststoffe) erfüllt werden. Im Betrieb wird für Holzfeuerungen bis 70 kW einzig ein CO-Grenzwert von 4'000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ vorgeschrieben [LRV Anhang 3 Ziffer 522]. Es ist deshalb von Interesse, ob ein Zusammenhang zwischen CO und Feststoffemissionen besteht und CO als Indikator für erhöhte Feststoffemissionen herangezogen werden kann.

Stückholzkessel

Bild 12 zeigen die Feststoffemissionen in Abhängigkeit der CO-Emissionen von modernen Stückholzkesseln für korrekten Betrieb mit trockenem Holz während der drei Betriebsphasen Start, stationär und Ausbrand. Außerdem sind die Feststoff- und CO-Werte der Startphase bei Anfeuern mit Rundholz, waldfrischem Holz, verstocktem Holz und mit nur halb gefülltem Füllraum dargestellt. Bild 11 zeigt die Feststoffemissionen in Abhängigkeit der CO-Emissionen von modernen Stückholzkesseln aus Untersuchungen zur Startphase von Stückholzkesseln [Good & Nussbaumer 2010].

Korrekt Betrieb:

Während der Startphase wird keine vollständige Verbrennung erzielt, so dass unvollständig verbrannte Kohlenstoff-Verbindungen sowohl zu gasförmigen Emissionen als auch zum Staub beitragen. Bei korrektem Betrieb von modernen Stückholzkesseln mit trockenem Holz lässt sich denn auch eine lineare Korrelation zwischen Feststoff- und CO-Emissionen (Bild 11, R²=0.89) erkennen, nach der die Feststoffemissionen nebst einem CO-unabhängigen Grundwert von rund 17 mg/mn3 bei 13 Vol.-% O₂ um rund einen Faktor 50 niedriger als die CO-Emissionen sind. Der Zusammenhang ist nicht allgemeingültig und es kann wegen weiterer Einflussfaktoren nicht sicher von CO auf die Feststoffemissionen geschlossen werden. Für die untersuchten und mit naturbelassenem Stückholz betriebenen Stückholzkessel kann dennoch davon ausgegangen werden, dass die Feststoffe bei CO-Werten unter 4000 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂ in der Regel weniger als 100 mg/m_n³ betragen und bei CO-Werten unter 1000 mg/mn3 meist bei unter 50 mg/m_n³ liegen.

In der stationären Phase lässt sich keine klare Korrelation zwischen Feststoff- und CO-Emissionen erkennen. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Staubemissionen bei guter Ausbrandqualität zu einem erheblichen Teil aus Salzen bestehen, deren Emission mit zunehmender Temperatur und Ausbrandqualität tendenziell steigt, während die mit den VOC korrelierenden Kohlenstoffanteile im Staub bei guter Verbrennung nur noch von untergeordneter Bedeutung sind.

Bild 11 zeigt die Korrelation zwischen Feststoffemissionen und CO-Emissionen von modernen Stückholzkesseln, wobei Daten während der Startphase und der stationären Phase ausgewertet sind. In diesen Phasen konnte für die untersuchten Kessel eine lineare Korrelation mit $R^2=0,89$ gefunden werden.

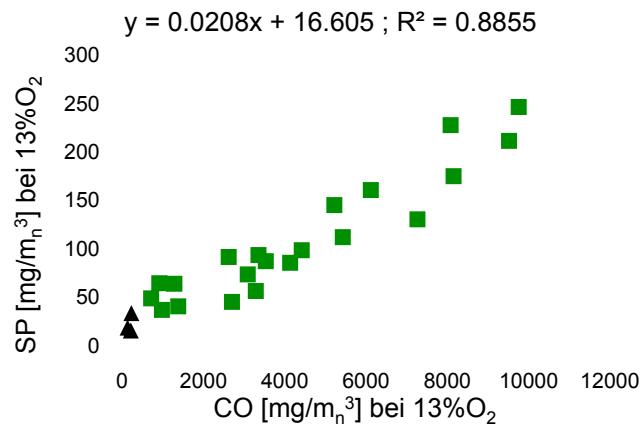


Bild 11 Korrelation zwischen Feststoffemissionen (SP solid particles) und CO-Emissionen von modernen Stückholzkesseln während der Startphase (Quadrate) und der stationären Phase (Dreiecke) [Good & Nussbaumer 2010].

Fehlbetrieb:

Die Startphase bei Fehlbetrieb mit ungeeignetem Brennstoff oder mit nur halb gefülltem Füllraum verursacht deutlich erhöhte Emissionen. Die stationäre Phase und der Ausbrand hingegen unterscheiden sich kaum vom Normalbetrieb, sofern ein gut ausgebildetes Glutbett erzielt wird und somit die Emissionen der nachfolgenden Betriebsphasen nur noch geringfügig durch das Starten beeinflusst werden.

Beim Anfeuern mit ungeeignetem Brennstoff oder mit nur halb gefülltem Füllraum treten folgende Abweichungen auf (Bild 12):

- Das Anfeuern mit Rundholz mit rundum anhaftender Rinde führt zu deutlich erhöhten Feststoff- und CO-Emissionen (rund 160 mg/mn³ bzw. 6'900 mg/mn³ bei 13 Vol.-% O₂) gegenüber dem Anfeuern mit gespaltenem Scheitholz. Die Feststoffemissionen liegen im Bereich des von der Korrelationsgeraden erwarteten Wertes.
- Das Anfeuern mit waldfrischem Holz führt zu deutlich erhöhten Feststoff- und CO-Emissionen (rund 130 mg/mn³ bzw. 2'900 mg/mn³ bei 13 Vol.-% O₂). Die Feststoffemissionen liegen dabei über der Korrelationsgeraden.
- Das Anfeuern mit verstocktem Holz führt bezüglich Feststoff- und CO-Emissionen nicht zu einer Abweichung im Vergleich zu normalem, trockenen Holz. Die NOX-Emissionen betragen mit verstocktem Holz rund 230 mg/mn³ bei 13 Vol.-% O₂ und liegen damit deutlich höher als bei normalem Holz (rund 140 mg/mn³).
- Das Anfeuern mit nur halb gefülltem Füllraum führt zu erhöhten CO-Emissionen (rund 3'200 mg/mn³ bei 13 Vol.-% O₂). Die Feststoffemissionen liegen mit rund 50 mg/m³ unterhalb der Korrelationsgeraden. Dies bestätigt, dass die Korrelation zwischen Staub und CO auch während der Startphase nicht allgemeingültig ist.

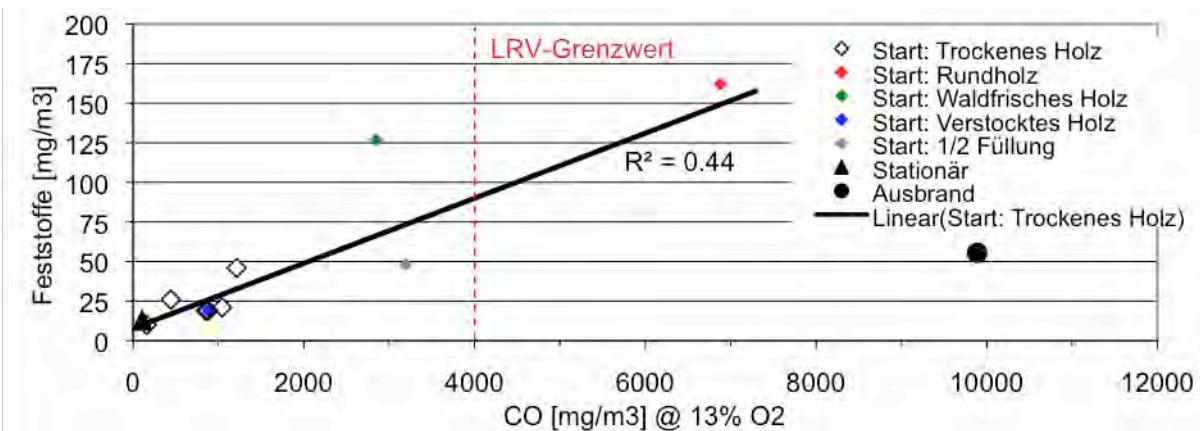


Bild 12 Korrelation zwischen Feststoff- und CO-Emissionen von modernen Stückholzkesseln bei Betrieb gemäss Bedienungsanleitung während der drei Betriebsphasen Start, stationär und Ausbrand sowie während der Startphase bei ungeeigneten Brennstoffen und bei Anfeuern mit nur halb gefülltem Füllraum.

Bild 13 zeigt die Feststoffemissionen in Abhängigkeit der CO-Emissionen von modernen Stückholzkesseln im Vergleich mit einem alten Stückholzkessel. In den untersuchten Betriebszuständen Start und stationärer Betrieb sind die Feststoffemissionen um den Faktor 10 höher und die CO-Emissionen um den Faktor 100 höher als bei den modernen Stückholzkesseln.

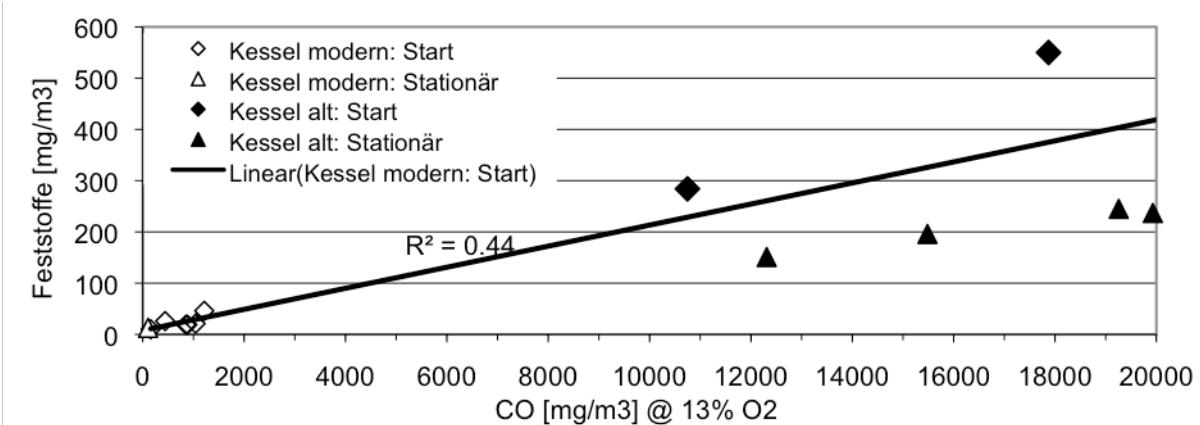


Bild 13 Korrelation zwischen Feststoff- und CO-Emissionen: Vergleich von Startphase und stationärem Betrieb von modernen Stückholzkesseln mit einem alten Stückholzkessel.

5.4.2 Kohlenwasserstoffe und CO

Bild 14 zeigt für die Startphase und den stationären Betrieb eine ausgeprägte Korrelation zwischen Kohlenwasserstoffen und CO. Die beste Korrelation mit $R^2=0.94$ wird für eine nicht lineare Funktion gefunden. In einem üblichen Bereich der VOC-Werte kann aber vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die Kohlenwasserstoffe meist knapp 15% der CO-Emissionen betragen oder knapp eine Größenordnung niedriger sind als diese. Im Ausbrand verhalten sich die Kohlenwasserstoffe anders als die CO-Emissionen. Während CO im Ausbrand markant ansteigt, bleiben die Kohlenwasserstoffe vergleichsweise niedrig. Dies wird damit erklärt, dass im Ausbrand vorwiegend Holzkohle zurückbleibt, die kaum mehr organische Materie enthält, sondern vorwiegend aus Kohlenstoff besteht, bei deren Umwandlung in erster Linie CO gebildet wird, jedoch kaum organische Verbindungen entstehen.

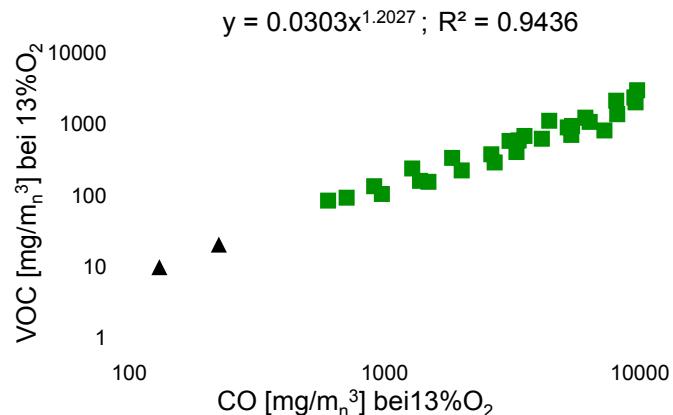


Bild 14 Korrelation zwischen VOC und CO von modernen Stückholzkesseln während der Startphase (Quadrat) sowie Werte während der stationären Phase (Dreiecke) [Good & Nussbaumer 2010].

5.4.3 Kondensierbare organische Verbindungen (COC) und CO

Kondensatmessungen zeigen, dass ein grosser Anteil der während der Startphase emittierten VOC bei Abkühlung auf rund 5°C als flüssiges Kondensat anfällt [Good & Nussbaumer 2010]. Wie Bild 15 zeigt, kann denn auch für die Startphase eine annähernd lineare Korrelation ($R^2=0.81$) zwischen COC und CO gefunden werden.

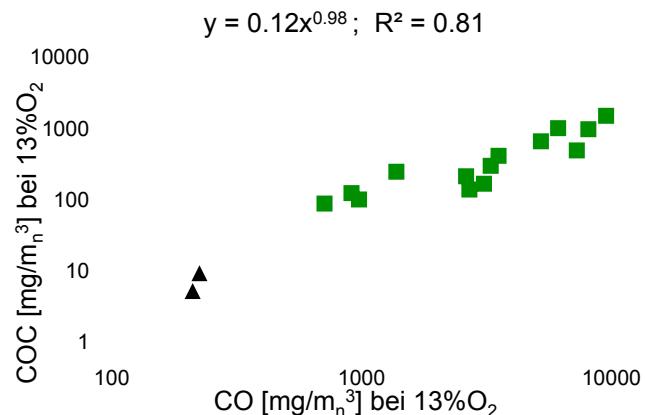


Bild 15 Korrelation zwischen COC und CO von modernen Stückholzkesseln während der Startphase (Quadrat) sowie Werte während der stationären Phase (Dreiecke) [Good & Nussbaumer 2010].

5.4.4 Feststoffe und Kohlenwasserstoffe

Aufgrund der Korrelation ($R^2=0.89$) zwischen Staub und CO während der Startphase besteht während der Startphase auch eine hohe Korrelation ($R^2=0.91$) zwischen Staub und Kohlenwasserstoffen (Bild 16). Vor allem in der Startphase erhöhen die nach dem Kaminaustritt kondensierbaren Kohlenwasserstoffe die PM-Konzentration in der Umgebung markant.

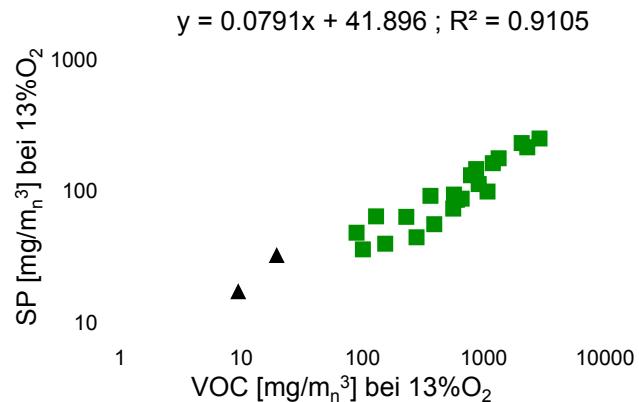


Bild 16 Korrelation zwischen Staub und VOC von modernen Stückholzkesseln während der Startphase (Quadrat) sowie Werte während der stationären Phase (Dreiecke) [Good & Nussbaumer 2010].

5.4.5 Anteil Methan und NMKW an Kohlenwasserstoffen

Die gravimetrische Staubmessung, die heute bei der Typenprüfung zum Einsatz kommt, erfasst nur die bei 160°C als Feststoffe im Abgas vorhandenen Partikel. Anteile der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMKW) können bei Abkühlung auf Umgebungstemperatur kondensieren und damit als primäre organische Aerosole die Feinstaubemissionen markant erhöhen. Zudem weisen höherwertige NMKW ein kanzerogenes Potenzial auf und sind deshalb gesundheitlich besonders relevant. [Hedberg et al. 2002] wiesen in Holzrauch grösere Mengen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) nach, unter anderem Phenantren (99 mg/kg Holz) und Fluoranthen (29.4 mg/kg Holz). Das grösste kanzerogene Potenzial der gefundenen PAK haben – obwohl mengenmässig weniger relevant – Benzo(a)pyren sowie Fluoranthen. Dagegen ist Methan kaum gesundheitsschädigend, wirkt jedoch in der Atmosphäre als starkes Treibhausgas. Anders als Viehhaltung und Reisanbau zählt die Biomasseverbrennung nicht zu den Hauptquellen der anthropogenen Methanemissionen, trägt aber nach [Stern und Kaufmann 1996] dennoch mit 8.3% zu den globalen Methanemissionen bei.

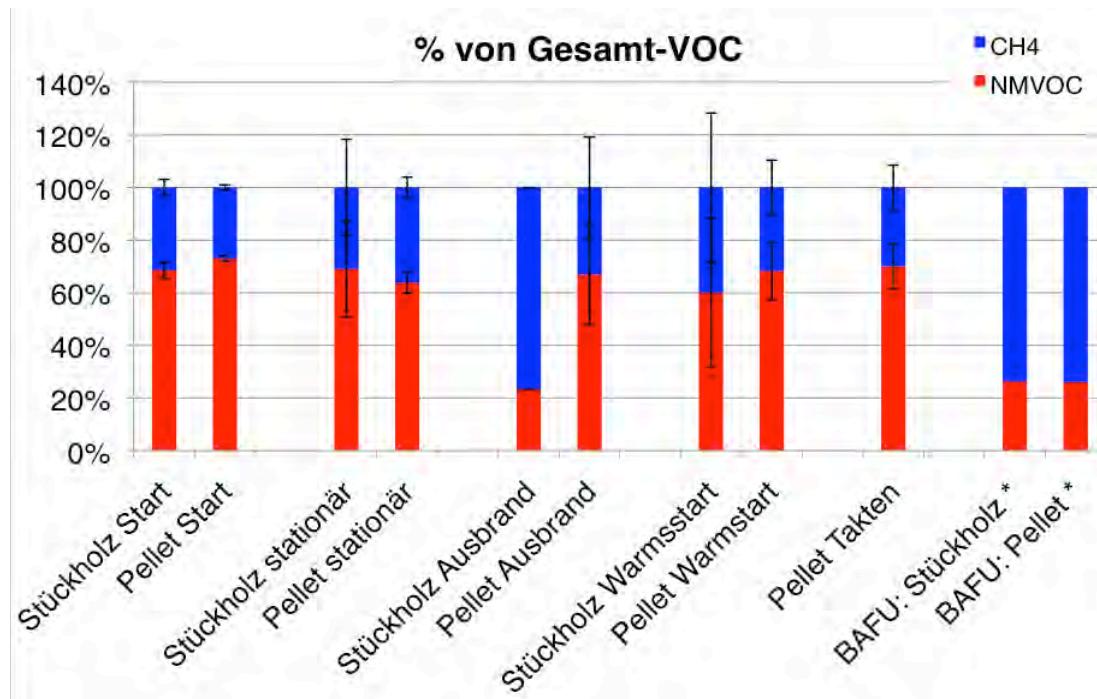


Bild 17 Anteil der NMKW- und der CH₄-Emissionen an den Gesamt-KW-Emissionen von Stückholz- und Pelletkesseln in verschiedenen Betriebsphasen im Vergleich zu der bisherigen Annahme nach [BAFU 2005]. *Stückholz bzw. Pellet mit Ventilator

Im Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen ging das BAFU früher für Stückholzkessel mit Ventilator von rund 74% Methananteil und lediglich 26% NMKW aus. In dieser Untersuchung wurden deutlich höhere Anteile von NMKW gefunden (Bild 17). In mengenmässig relevanten Abbrandphasen (Startphase) liegen diese meist bei 60% bis 70%, im Mittel betragen sie rund 67% oder zwei Drittel, während Methan lediglich 33% oder ein Drittel ausmacht. Lediglich bei einer Messung der Ausbrandphase eines Stückholzkessels konnte einmal ein Methananteil von über 50% beobachtet werden. Allerdings war diese Messung mit hohen CO bei verhältnismässig tiefen KW-Werten verbunden, weshalb möglicherweise die Aufteilung von Methan und NMKW bei diesen Betriebszuständen mit einer grösseren Unsicherheit verbunden ist. Im Weiteren wurden im stationären Betrieb kurzfristig auch NMVOC-Anteile von bis zu über 90% beobachtet. In der stationären Phase treten allerdings generell nur sehr geringe Absolutwerte an KW auf, so dass deren Aufteilung nur bedingt relevant ist und ausserdem der Fehler des aus zwei Messungen bestimmten Anteils gross wird. Aus diesem Grund wird für die künftige Abschätzung von Emissionsfrachten aus Holzfeuerungen ein Anteil NMKW von zwei Dritteln oder von zwischen 60% und 70% vorgeschlagen.

5.5 Emissionsfaktoren

Tabelle 5 zeigt die Emissionsfaktoren der drei modernen Stückholzkessel bei Berücksichtigung der Emissionen über eine gesamte Brennstoffcharge inklusive Start- und Ausbrandphase, wobei jeweils ein Kaltstart angenommen wird. Zusätzlich ist unterschieden zwischen Emissionsfaktoren von Chargen mit guten und mit schlechten Starts. Im weiteren sind die Mittelwerte für alle Stückholzkessel sowie das Mittel aus Chargen mit guten und schlechten Starts ausgewiesen. Die so resultierenden mittleren Emissionsfaktoren berücksichtigen eine Betriebsweise mit 50% guten und 50% schlechten Starts.

Tabelle 6 zeigt eine analoge Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren für die Pelletkessel, wobei die Startemissionen ebenfalls enthalten sind, im Gegensatz zu den Stückholzkesseln jedoch Starts aus betriebswarmem Zustand berücksichtigt sind. Außerdem entfällt der Unterschied zwischen guten und schlechten Starts, entsprechend schlechte Starts nicht auftreten. Anschliessend an den Warmstart wird eine stationäre Betriebsphase angenommen. Da diese je nach Wärmebedarf und hydraulischer Einbindung von unterschiedlicher Dauer sein kann, wird eine Unterscheidung zwischen langen und kurzen Taktintervallen vorgenommen und dazu eine Dauer von 120 Minuten bzw. von 15 Minuten stationärem Betrieb im Anschluss an die Startphase je Intervall berücksichtigt. Im weiteren sind die Mittelwerte für beide Pelletkessel sowie das Mittel der Emissionswerte mit langen und kurzen Taktintervallen ausgewiesen. Die so resultierenden mittleren Emissionsfaktoren berücksichtigen eine Betriebsweise mit 50% langen und 50% kurzen Taktintervallen.

Tabelle 7 zeigt einen Vergleich der Emissionsfaktoren nach [BAFU 2005] mit den für das BAFU in [Nussbaumer 2010] aktualisierten und den in dieser Untersuchung als Mittelwerte gefundenen Emissionsfaktoren. Beim Vergleich ist zu beachten, dass die Werte dieser Untersuchung einen für die Praxis als typisch angenommenen Betrieb berücksichtigen, dass sie sich jedoch auf moderne, mit dem Qualitätssiegel ausgestattete Feuerungen beziehen und ausserdem keinen eigentlichen Fehlbetrieb berücksichtigen. Mit dieser Randbedingung zeigt der Vergleich folgende Tendenzen:

Die Emissionsfaktoren für NO_x, CO, VOC, CH₄ und NMVOC der vorliegenden Untersuchung sind etwas höher als für das BAFU von [Nussbaumer 2010] vorgeschlagen. Für Stickoxide beträgt die Differenz rund 10%, was innerhalb der allein durch den Brennstoff verursachten Bandbreite und der Messungenauigkeiten liegt. Für CO und VOC sind die Unterschiede etwas grösser und vor allem darauf zurückzuführen, dass in der vorliegenden Untersuchung bei den Stückholzkesseln ein unerwartet hoher Anteil schlechter Starts aufgetreten ist, während bei den Pelletkesseln das Takten in kurzen Zeitintervallen zu einem relevanten Anstieg der unverbrannten gasförmigen Schadstoffe führt. Demgegenüber zeigt sich, dass die schlechten Starts bzw. die kurzen Taktintervalle nur zu einem geringen Anstieg der Staubemissionen führen, weshalb die hier gefundenen Staubemissionen tiefer sind als in [Nussbaumer 2010] vorgeschlagen. Für Stückholzkessel sind die Staubwerte zwischen dem vom BAFU im Jahr 2001 angenommenen Emissionsfaktor von 50 mg/MJ und dem im Jahr 2005 aufgrund des Fortschritts angenommenen 10 mg/MJ. So weisen die drei modernen Stückholzkessel einen mittleren Emissionsfaktor von 25,5 mg/MJ auf, die Pelletkessel von 17,9 mg/MJ. Da die hier ermittelten Werte die Startphase (Stückholzkessel) bzw. das Takten (Pelletkessel) berücksichtigen, beinhalten sie wichtige Faktoren, die in der Praxis für höhere Emissionen als im Idealbetrieb verantwortlich sind. Da aber weder Fehlbetrieb noch ältere Feuerungen berücksichtigt sind, wird davon ausgegangen, dass die in [Nussbaumer 2010] vorgeschlagenen Emissionsfaktoren für Staub für Stückholzkessel realistisch sind, während im Quervergleich für Pelletkessel allenfalls eine Korrektur von 50 mg/MJ auf 30 mg/MJ entsprechend der früheren Beurteilung in Frage kommt. Im Gegenzug müssten dann allerdings die Emissionsfaktoren für VOC und CO nach oben angepasst werden.

In der vorliegenden Untersuchung wurden mittlere Anteile der NMKW an den Gesamtkohlenwasserstoffen von rund 60% bis 80% gefunden. Im Mittel beträgt der Anteil NMKW 67% oder zwei Drittel, während Methan mit 33% rund einen Drittelpart der KW ausmacht. Die bisherigen Emissionsfaktoren des BAFU gingen von 74% Methan und 26% NMKW aus. Während die Höhe der Emissionsfaktoren in einer grossen Bandbreite schwankt, variiert das Verhältnis zwischen NMKW und Methan in engeren Bereichen und kann für künftige Emissionsfaktoren entsprechend angepasst werden. Die 2010 vorgeschlagene Anpassung des Methananteils von 74% auf 40% kann in der vorliegenden Untersuchung bestätigt und gegebenenfalls weiter auf 33% gesenkt werden.

Tabelle 5 Emissionsfaktoren der untersuchten Stückholzkessel mit Qualitätssiegel. Werte der Kessel A, B und C und Mittel aller drei Kessel bei gutem und bei schlechtem Start. Zusätzlich ist der Mittelwert von guten und schlechten Starts ausgewiesen. NMVOC und α sind berechnet aus VOC und CH_4 .

	Typ	NO ₂	CO	VOC	CH ₄	NMVOC	Staub	α
Betriebsart		[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	CH ₄ /VOC
Guter Start	A	85	1570	11	4	7	19	0.38
	B	93	1660	26	9	16	29	0.35
	C	98	2360	28	10	19	17	0.36
	Mittel	92	1866	21.6	7.7	13.9	21.3	0.36
Schlechter Start	A	85	1730	55	17	38	23	0.31
	B	84	1920	92	27	65	35	0.29
	C	92	2900	212	58	154	32	0.27
	Mittel	87	2181	119.7	33.9	85.9	29.7	0.29
Mittel	Mittel	90	2024	70.7	20.8	49.9	25.5	0.33

Tabelle 6 Emissionsfaktoren der untersuchten Pelletkessel mit Qualitätssiegel. Werte der Kessel F und G und Mittel beider Kessel bei Betrieb mit langen Taktintervallen (1 Warmstart plus 120 Minuten stationärer Betrieb) und mit kurzen Taktintervallen (1 Warmstart plus 15 Minuten stationärer Betrieb). Zusätzlich ist der Mittelwert beider Betriebsarten ausgewiesen. NMVOC und α sind berechnet aus VOC und CH₄.

	Typ	NO ₂	CO	VOC	CH ₄	NMVOC	Staub	α
Betriebsart		[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	CH ₄ /VOC
Lange Taktphase	F	64	365	10.2	4.5	5.7	19.5	0.44
	G	69	492	11.7	2.5	9.2	13.6	0.22
	Mittel	67	428	10.9	3.5	7.4	16.6	0.33
Kurze Taktphase	F	58	1'061	29.7	13.5	16.1	22.2	0.46
	G	66	1'929	45.8	9.8	36.0	16.2	0.21
	Mittel	62	1'495	37.7	11.7	26.1	19.2	0.34
Mittel	Mittel	64	962	24.3	7.6	16.8	17.9	0.33

Tabelle 7 Vergleich der Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen nach Arbeitsblatt [BAFU 2005] (BAFU), nach [Nussbaumer 2010] (TN10) und nach dieser Untersuchung für moderne Kessel mit Qualitätssiegel (QS). NMVOC und α sind berechnet aus VOC und CH₄.

Quelle	Feuerung	NO ₂	CO	VOC	CH ₄	NMVOC	Staub	α
		[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	CH ₄ /VOC
BAFU	Stückholz mit Ventilator	150	1700	95	70	25	10	0.74
TN10	Stückholzkessel	80	1500	50	20	30	50	0.40
Diese	Stückholzkessel mit QS	90	2024	70.7	20.8	49.9	25.5	0.33
BAFU	Pellet mit Ventilator	170	250	27	20	7	30	0.74
TN10	Pelletkessel < 50 kW	60	200	15	6	9	50	0.40
Diese	Pelletkessel mit QS	64	962	24.3	7.6	16.8	17.9	0.33

5.6 Kohlenstoffanteil im Feststoff

Aerosole im Abgas einer Holzfeuerung umfassen verschiedene Verbindungen die vereinfachend in Salze, Russ und Teere unterteilt werden können. Da Russ und Teer stärker gesundheitsschädlich sind als Salz, sind der Anteil und die Zusammensetzung der Aerosole im Abgas von Interesse. In der vorliegenden Untersuchung wurden gravimetrische Feststoffmessungen mit Planfiltern im heissen Abgas durchgeführt und zudem das Abgas nach dem heissen Filter durch Waschflaschen und anschliessend durch ein als Backup-Filter bezeichnetes Planfilter geleitet. Nebst der gravimetrischen Bestimmung der drei Partikelfraktionen erlaubt diese Probenahme auch eine optische Beurteilung der Feststoffproben auf den zwei Planfiltern sowie der Lösung in den Waschflaschen. Nachfolgend sind die Planfilter der Rohgasmessung und die Planfilter nach den Waschflaschen vergleichend dargestellt.

Für die Beurteilung wird angenommen, dass die einzelnen Verbindungen in der Regel mit folgenden Farben assoziiert werden können:

Russ: Schwarz (Black Carbon, BC)

Organische Verbindungen: Braun (brown Carbon, C_{brown}), gelblich, farblos

Salze: Farblos (weiss).

Organische Verbindungen umfassen die in flüssiger Phase vorliegenden kondensierbaren organischen Verbindungen (COC oder Teer in Form von Tröpfchen) sowie potenziell auch als Feststoff vorliegende organische Verbindungen, die direkt durch Resublimation aus der Gasphase oder durch Erstarren aus der Flüssigphase gebildet werden können. Organische Verbindungen sind oftmals braun, können aber auch gelblich oder farblos sein.

Salze wie Kaliumchlorid, Kaliumsulfat und Calciumcarbonat sind meist farblose oder weisse Kristalle, einzelne Salze können aber zum Beispiel auch grünlich, blau oder rötlich erscheinen.

Für die Interpretation der Planfilter ist zu beachten, dass die Farben von Partikelgemischen durch Coating oder Abdeckung beeinflusst sein können. So können weisse Salze mit einem geringen Anteil Russ in grauer Farbe erscheinen.

Tabelle 8 zeigt die auf den Planfiltern der gravimetrischen Staubmessung abgeschiedenen Feststoffe und die Verfärbung der nach Kondensatmessung angeordneten Planfilter im Zusammenhang mit der jeweiligen Betriebsphase und den zugeordneten Betriebsdaten der vier Stückholzkessel. Bei den drei modernen Stückholzkesseln A, B und C zeigen die gravimetrischen Planfilter der drei aufeinanderfolgenden Messungen während der Startphase eine durch Russ verursachte abnehmende Schwärzung bei gleichzeitig abnehmendem Feststoffgehalt. Gleichzeitig sind die nach der Kondensatmessung angeordneten Planfilter gelblich-bräunlich verfärbt, was durch die hohen Gehalte an organischen Verbindungen verursacht wird. Im stationären Betrieb sind die gravimetrischen Planfilter bei geringem Feststoffgehalt nahezu weiss, im Ausbrand sind sie bei erhöhtem Feststoffgehalt gelblich verfärbt, was wiederum auf organische Verbindungen schliessen lässt, die nun – im Gegensatz zur Startphase – nicht durch Russ überdeckt sind. Beim Nachlegen einer Brennstoffcharge sind die gravimetrischen Planfilter je nach Stückholzkessel wieder mehr oder weniger stark schwarz verfärbt, was auf erneute Russbildung hinweist. Die Planfilter des alten Stückholzkessels sind während des gesamten Abbrands schwarz, was aufzeigt, dass über die gesamte Betriebszeit nie ein russarmer Betrieb erzielt wird.

Tabelle 9 zeigt die Planfilter der zwei modernen Pelletkesseln. Die ersten Planfilter der Startphase sind bei den Pelletkesseln deutlich weniger geschwärzt als bei den Stückholzkesseln und dies bei gleichzeitig moderatem Feststoffgehalt. Im stationären Betrieb weist Pelletkessel A bei Nennleistung ebenfalls eine geringe Schwärzung bei gleichzeitig tiefem Feststoffgehalt auf. Mit abnehmender Leistung bei 70% und 50% der Nennleistung nimmt die Schwärzung deutlich zu, obwohl der Feststoffgehalt annähernd gleich bleibt. Die zunehmende Russbildung wird demnach durch die gravimetrische Feststoffmessung nicht erfasst. Beim Takten ist das Planfilter ebenfalls schwarz bei gleichzeitig tiefem Feststoffgehalt. Pelletkessel B weist in der Startphase eine geringe Schwärzung bei tiefem Feststoffgehalt auf. Bei stationärem Betrieb bei 100% und 70% der Nennleistung sind die Planfilter nahezu weiß bei gleichzeitig tiefem Feststoffgehalt. Bei stationärem Betrieb bei 30% der Nennleistung sind die Planfilter geschwärzt bei gleichzeitig tiefem Feststoffgehalt. Beim Takten ist das Planfilter grau bei tiefem Feststoffgehalt.

Die schwarze Verfärbung ist jeweils ein klarer Hinweis auf Russ (schwarzen Kohlenstoff). Allerdings kann bereits ein gewisser Anteil an Russ andere Partikel überdecken und somit zu einer deutlichen Schwärzung führen. Im Falle von schwarzen Filtern ist somit auch eine gleichzeitige Emission von braunen organischen Verbindungen sowie von farblosen organischen Verbindungen und von weißen Salzen möglich, die optisch nicht erkennbar sind. Während die braune Farbe in der Regel den organischen Verbindungen zugeordnet wird (brown carbon), ist nicht sicher auszuschliessen, dass in Phasen mit gelblichen und bräunlichen Partikeln auch weiße oder allenfalls farbige Salze emittiert werden. Für eine sichere Zuordnung der einzelnen Partikelarten sind deshalb weitergehende Analysen erforderlich.

Tabelle 8 Planfilter aus gravimetrischer Feststoffmessung und nach Kondensatmessung bei verschiedenen Betriebszuständen (Start, Stationär, Nachlegen, Ausbrand) bei modernen Stückholzkesseln (A, B, C) und einem alten Stückkessel (D) mit zugeordneten Messdaten.

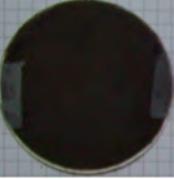
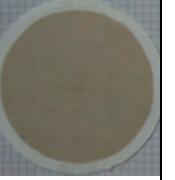
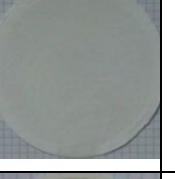
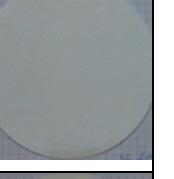
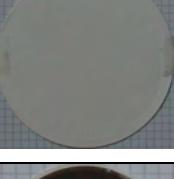
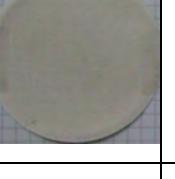
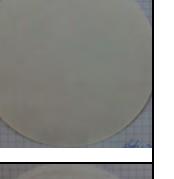
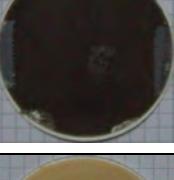
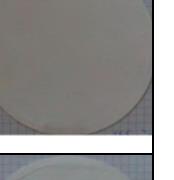
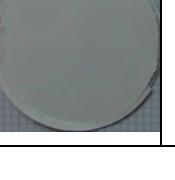
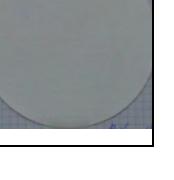
Betriebs- phase	Stückholzkessel A			Stückholzkessel B		
	Messdaten: Lambda T_AG CO KW/NMKW COC/SP PN	Planfilter für gravime- trische Feststoffe	Planfilter nach Kondensat	Messdaten: Lambda T_AG CO KW/NMKW COC/SP PN	Planfilter für gravime- trische Feststoffe	Planfilter nach Kondensat
Start 1 0-15 Min/ 15 Min	2.2 95 3'062 250/174 114/121 46			4.5 66 4'837 721/512 229/62 155		
Start 2 15-30 Min/ 15 Min	1.2 138 116 6/5 29/88 9			1.6 95 768 23/17 54/11 5		
Start 3 30-45 Min/ 15 Min	1.3 169 74 5/5 12/14 6			1.3 131 52 10/8 19/18 10		
Stationär 30 Min	1.3 188 26 2/2 n.b./ 17 18			1.4 124 16 2/1 4/36 20		
Nach- legen 30 Min	1.3 209 713 8/3 n.b./ 22 23			1.5 124 570 6/2 n.b./ 23 15		
Ausbrand 30 Min	2.5 145 15'223 26/4 n.b./ 36 60			1.6 114 13'670 8/4 6/114 101		

Tabelle 8 (Fortsetzung) Planfilter aus gravimetrischer Feststoffmessung und Planfilter nach Kondensatmessung in verschiedenen Betriebszuständen (Start, Stationär, Nachlegen, Ausbrand) bei modernen Stückholzkesseln (A, B, C) und einem alten Stückkessel (D) mit zugeordneten Messdaten.

Betriebs- phase	Stückholzkessel C			Stückholzkessel D		
	Messdaten: Lambda T_AG CO KW/NMKW COC/SP PN	Planfilter für gravime- trische Feststoffe	Planfilter nach Kondensat	Messdaten: Lambda T_AG CO KW/NMKW COC/SP PN	Planfilter für gravime- trische Feststoffe	Planfilter nach Kondensat
Zeitpunkt / Probe- nahme- dauer						
Start 1 0-15 Min/ 15 Min	6.8 34 3'573 604/494 369/96 200			3.1 142 6'359 1'503/1'119 692/162 372		
Start 2 15-30 Min/ 15 Min	2.4 63 4'421 452/325 177/44 50			1.7 300 3'280 249/156 152/43 100		
Start 3 30-45 Min/ 15 Min	1.4 102 193 36/33 137/4 7			1.2 378 10'086 1'059/533 150/93 165		
Stationär 30 Min	1.4 162 54 8/6 n.b./12 20			1.9 307 14'950 2'038/1'091 416/204 263		
Nach- legen 30 Min	1.4 162 90 8/5 n.b./20 36					
Ausbrand 30 Min	2.5 130 15'734 57/13 n.b./43 36			2.5 242 18195 1292/586 154/185 n.b.		

Tabelle 9 Planfilter aus gravimetrischer Feststoffmessung in verschiedenen Betriebszuständen (Start, Stationär 100%/70%/50%/30%, Takten) bei modernen Pelletkesseln (F, G) mit Messdaten.

Betriebsphase	Pelletkessel F (1)		Pelletkessel G (2)	
	Messdaten: Lambda T_AG CO KW/NMKW COC/ SP PN	Planfilter für gravime- trische Feststoffe	Messdaten: Lambda T_AG CO KW/NMKW COC/ SP PN	Planfilter für gravime- trische Feststoffe
Probenahme- dauer				
Startphase (Kalt)	9.7 65 928 96/73 n.b./ 42 59		8.1 45 1'254 76/56 n.b./ 22 63	
15 Min				
Stationär 100%	2.3 125 194 4/3 n.b./ 28 31		1.7 91 12 <1/<1 n.b / 19 24	
30 Min				
Stationär 70%	2.6 112 307 2/2 n.b./ 25 28		1.8 69 2 <1/<1 n.b / 16 16	
30 Min				
Stationär 50%	2.9 100 571 17/16 n.b./ 27 47			–
30 Min				
Stationär 30%	3.1 78 1'215 8/4 n.b./ 32 54	–	2.2 43 44 <1/<1 n.b / 9 21	
30 Min				
Takten	4.3 73 920 16/10 n.b./ 34 56		3.1 70 1'614 26/19 n.b / 18 21	
30 Min				

6 Schlussfolgerungen

6.1 Stückholzkessel

Betriebsparameter

- Ungeeignete Holzqualität (zu hoher Wassergehalt, verstocktes Holz, Rundholz mit anhaftender Rinde) sowie Fehlbetrieb (halb gefüllter Füllraum) führen in der Startphase zu deutlich erhöhten Emissionen an CO und Kohlenwasserstoffen. Die Staubemissionen werden dadurch zwar auch erhöht, der Einfluss auf die Feststoffe ist aber geringer als auf die Kohlenwasserstoffe, die zu mit der Staubmessung nicht erfassten primären und sekundären Aerosolen beitragen. Sobald die stationäre Betriebsphase erreicht ist, treten mit den untersuchten Brennstoffen und Betriebsarten keine erhöhten Emissionen im Vergleich zu geeignetem Brennstoff mehr auf.
- Aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Startphase durch feuchtes Holz und durch Rundholz mit anhaftender Rinde wird empfohlen, grundsätzlich trockenes Holz zu verwenden, Anfeuerholz mit wenig Rinde zu nutzen und die Holzscheite mit der rindenfreien Seite zum Anzündbereich auszurichten.

Betriebsphasen

- Bei den untersuchten, modernen Stückholzkesseln führt die Startphase zu deutlich erhöhten Schadstoffemissionen an flüchtigen und kondensierbaren organischen Verbindungen (VOC und COC).
- Die Qualität der Startphase wird durch die Messung des stationären und betriebswarmen Zustands der Kessel nach heutiger Typenprüfung nicht erfasst, weshalb ein Einbezug der Startphase für künftige Typenprüfungen in Betracht zu ziehen ist.
- Während der Startphase treten auch erhöhte Emissionen an Kohlenmonoxid auf. Diese sind in Bezug auf die Lufthygiene von untergeordneter Bedeutung, ausserdem wird die Gesamtfracht an CO im Gegensatz zur organischen Fracht durch den Ausbrand dominiert.
- Obwohl während der Startphase auch kurzfristig erhöhte Partikelemissionen auftreten, ist die Startphase für die Gesamtfracht an gravimetrisch bestimmtem Staub nicht dominierend. Für die Bewertung der Startphase wird deshalb die Erfassung von organischen Verbindungen als priorität beurteilt. Da während der Startphase meist eine deutliche Korrelation zwischen CO und Kohlenwasserstoffen auftritt, kommt für eine Beurteilung der Startphase auch CO als Indikator für organische Verbindungen in Frage.

Anteil Methan und NMKW an den Gesamtkohlenwasserstoffen

- Während der mengenmässig relevanten Startphase liegt der Anteil der NMKW-Emissionen an den Gesamtkohlenwasserstoffen bei 50% bis 70%. Im Mittel beträgt der Anteil an NMKW sowohl für Stückholz- als auch für Pelletkessel rund 67%, während Methan rund einen Dritt der KW ausmacht.
- Der Anteil der kondensierbaren Kohlenwasserstoffe, die bei Eintritt in die Atmosphäre grossteils als primäre Aerosole in Erscheinung treten, an den Gesamtkohlenwasserstoffen liegt in der Startphase bei rund 30%. Die NMKW teilen sich somit rund zur Hälfte in kondensierbare und nicht-kondensierbare Verbindungen auf.

Kohlenmonoxid als Indikator für die Umweltrelevanz der Gesamtemissionen

- Während der Startphase besteht ein gleichläufiger Trend zwischen CO und organischen Verbindungen, weshalb CO während der Startphase als Indikator für die organischen Verbindungen dienen kann.
- Da während der Startphase auch ein gleichläufiger Trend zwischen CO und Feststoffen besteht, kann CO während der Startphase auch als Indikator für Feststoffe dienen. Diese Zuordnung ist allerdings unsicherer als der Zusammenhang zwischen CO und organischen Verbindungen und er ist nicht allgemeingültig.
- In der Ausbrandphase kann CO nicht als Indikator für andere Emissionen dienen, da durch die Vergasung von Holzkohle im Ausbrand sehr hohe CO-Konzentrationen im Abgas bei nur geringfügig erhöhten Gehalten an Staub und organischen Verbindungen auftreten können.

Emissionsverhalten in der Praxis im Vergleich zur Typenprüfung

- Da die heutige Typenprüfung nur die stationäre Betriebsphase im warmen Zustand erfasst, kann daraus kein Rückschluss auf die Qualität der Feuerung in Bezug auf die Startphase und die während des Starts emittierten und gesundheitlich besonders relevanten kondensierbaren Kohlenwasserstoffe gezogen werden.
- Da bei guten Feuerungen die Startphase für einen Grossteil der Gesamtemissionen an organischen Verbindungen verantwortlich ist, sollte das Ziel künftiger Entwicklungen von Stückholzkesseln sein, das Anfahrverhalten konstruktiv und regeltechnisch weiter zu verbessern.

6.2 Pelletkessel

- An den untersuchten Pelletkesseln tragen sowohl die Start- als auch die Stopp-Phase entscheidend zur Gesamtfracht an organischen Verbindungen bei¹. In einem Fall verursacht das Starten aus warmem Zustand jedoch deutlich geringere Emissionen als aus kaltem Zustand.
- Auch die Staubemissionen weisen sowohl während der Start- als auch während der Stopp-Phase erhöhte Werte auf. Im Gegensatz zu den organischen Verbindungen ist der Beitrag der Start- und Stopp-Phase zur Gesamtfracht an Staub jedoch nur von untergeordneter Bedeutung².
- Bei stationärem Betrieb sind die Emissionen gering und liegen bei einem Pelletkessel sogar unter den bei der Typenprüfung ausgewiesenen Werten.
- Je nach Regelungskonzept und hydraulischer Einbindung mit oder ohne Wärmespeicher treten auch Taktzyklen auf, bei denen nach dem Starten nur eine kurze Phase mit stationärem Betrieb und anschliessend wieder das Ausschalten und eine mehr oder weniger lange Stillstandsphase folgen. Da die Emissionen bei jedem Start- und Stoppvorgang einige Minuten lang deutlich höher sind als bei stationärem Betrieb, ist dieser taktende Betrieb grundsätzlich unerwünscht. Um die Emissionsgrenzwerte auch bei Einbezug von Start und Stopp im Mittel einzuhalten, sind für die untersuchten Kessel Laufzeiten von mindestens 80 bis 90 Minuten erforderlich³. Aus der Praxis ist aber bekannt, dass die Laufzeiten pro Start teilweise nur 15 Minuten betragen können, sofern die Kessel ohne Wärmespeicher betrieben werden oder die hydraulische Einbindung so ausgeführt ist, dass der Kessel trotz Wärmespeicher mit kurzen Taktzyklen betrieben wird.

¹ Im Fall der Pelletheizungen erfolgte die Bestimmung der organischen Verbindungen nur mit Messung von VOC und NMVOC, da die COC-Frachten aufgrund der vergleichsweise kurzen Phasen mit im Vergleich zu Stückholzfeuerungen moderaten VOC-Konzentrationen keine ausreichende Genauigkeit für eine COC-Analyse ermöglichen.

² In der vorliegenden Untersuchung wird dies durch Messung von Partikelanzahl- und Korngrössenverteilung mittels SMPS und OPC gezeigt, wobei kurzfristige Peaks im Sekundenbereich nicht erfasst werden, diese jedoch gemäss einer punktuell durchgeföhrten Betrachtung von Sekundenwerten mittels ELPI für die Gesamtfracht auch nicht von Bedeutung sind.

³ Die erhöhten Emissionen durch Start und Stopp werden dabei durch eine Unterschreitung der Grenzwerte während des stationären Betriebs kompensiert.

7 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

FID	Flammen-Ionisations-Detektor (hier zur Messung von KW)
NDIR	Nicht-dispersive Infrarot-Spektroskopie (hier zur Messung von CO und CO ₂)
CLD	Chemilumineszenz-Detektor (hier zur Messung von NO und NO ₂)
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
FMPS	Fast Mobility Particle Sizer
OPC	Optical Particle Counter
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
EN 303-5	Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung
KW	Kohlenwasserstoffe (Gesamtkohlenwasserstoffe)
CH ₄	Methan
NMKW	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
TOC	Total Organic Compounds
COC	Condensable Organic Compounds (kondensierbare organische Verbindungen)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
H ₂	Wasserstoff
NO _x	Stickoxide (NO und NO ₂)
OM	Organic Matter
POM	Particulate Organic Matter
λ	Luftüberschusszahl (Lambda)

8 Anhang: Emissionsgrenzwerte

Tabelle 10: Emissionsgrenzwerte für in Betrieb stehende Holzfeuerungen gemäss Luftreinhalte-Verordnung LRV Anhang 3 Ziffer 522, Stand am 1. Januar 2009.

522 Emissionsgrenzwerte

¹ Die Emissionen von Feuerungen, die mit Holzbrennstoffen nach Anhang 5 Ziffer 3 Absatz 1 betrieben werden, dürfen folgende Werte nicht überschreiten:

	Feuerungswärmeleistung				
	bis 70 kW	über 70 kW bis 500 kW	über 500 kW bis 1 MW	über 1 MW bis 10 MW	über 10 MW
<i>Holzbrennstoffe</i>					
- Bezugsgrösse:					
Die Grenzwerte beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von	%vol	13	13	13	11
- Feststoffe insgesamt:	mg/m ³	-	150	150	20
- ab 1. September 2007	mg/m ³	-	150	20	10
- ab 1. Januar 2008	mg/m ³	-	50 ¹	20	10
- ab 1. Januar 2012	mg/m ³	-	50 ¹	20	10
- Kohlenmonoxid (CO):					
- für Holzbrennstoffe nach Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. a und b	mg/m ³	4000 ²	1000	500	250
- ab 1. September 2007	mg/m ³	4000 ²	500	500	250
- ab 1. Januar 2012	mg/m ³	1000	500	500	250
- für Holzbrennstoffe nach Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c	mg/m ³	1000	1000	250	150
- ab 1. September 2007	mg/m ³	1000	500	250	150
- ab 1. Januar 2012	mg/m ³	3	3	3	150
- Stickoxide (NO _x) angegeben als Stickstoffdioxid (NO ₂)	mg/m ³	3	3	3	50
- gasförmige organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)	mg/m ³	-	-	-	-
- Ammoniak und Ammoniumverbindungen, angegeben als Ammoniak ⁴	mg/m ³	-	-	-	30
					30

Hinweise:

- Die Angabe eines Strichs in der Tabelle bedeutet, dass weder nach Anhang 3 noch nach Anhang 1 eine Begrenzung vorgeschrieben ist.

1 Feststoff-Grenzwert für handbeschickte Stückholzkessel für Holzbrennstoffe nach Anhang 5 Ziffer 3 Absatz 1 Buchstabe a mit einer Feuerungswärmeleistung bis 120 kW: 100 mg/m³.

2 Gilt nicht für Zentralheizungsherde.

3 Siehe Stickoxid-Grenzwert Anhang 1 Ziffer 6.

4 Diese Emissionsbegrenzung ist nur für Feuerungsanlagen mit Entstickungseinrichtung von Bedeutung.

Für bestehende Holzzfeuerungen bis 70 kW, die mit naturbelassenem Holz betrieben werden, gilt – mit Ausnahme der Zentralheizungsherde – einzig ein CO-Grenzwert von 4000 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂.

Tabelle 11: Emissionsgrenzwerte für Holzfeuerungen gemäss Luftreinhalte-Verordnung LRV Anhang 5 Ziffer 212, Stand am 1. Januar 2009.

212 Kohle- und Holzfeuerungen

Kohle- und Holzfeuerungen müssen die lufthygienischen Anforderungen der massgebenden europäischen Normen sowie die Emissionsgrenzwerte der folgenden Tabelle einhalten.

Anlageart	Massgebende europäische Norm ⁶⁴	Besondere Anforderungen (Emissionsgrenzwerte) ^a für Kohlenmonoxid (CO) und Feststoffe (Staub)	
		ab 1. Januar 2008	ab 1. Januar 2011
Heizkessel für Stückholz- und Kohlefeuerungen, handbeschickt	EN 303-5 oder EN 12809	CO: 800 mg/m ³ Staub: 60 mg/m ³	CO: 800 mg/m ³ Staub: 50 mg/m ³
Heizkessel für Holzschnitzel- und Kohlefeuerungen, automatisch beschickt	EN 303-5 oder EN 12809	CO: 400 mg/m ³ Staub: 90 mg/m ³	CO: 400 mg/m ³ Staub: 60 mg/m ³
Heizkessel für Holzpellets, automatisch beschickt	EN 303-5 oder EN 12809	CO: 300 mg/m ³ Staub: 60 mg/m ³	CO: 300 mg/m ³ Staub: 40 mg/m ³
Raumheizer für feste Brennstoffe	EN 13240	CO: 1500 mg/m ³ Staub: 100 mg/m ³	CO: 1500 mg/m ³ Staub: 75 mg/m ³
Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	EN 14785	CO: 500 mg/m ³ Staub: 50 mg/m ³	CO: 500 mg/m ³ Staub: 40 mg/m ³
Einzelherde für feste Brennstoffe	EN 12815	CO: 3000 mg/m ³ Staub: 110 mg/m ³	CO: 3000 mg/m ³ Staub: 90 mg/m ³
		ab 1. Januar 2008	ab 1. Januar 2011
Zentralheizungsherde für feste Brennstoffe	EN 12815	CO: 3000 mg/m ³ Staub: 150 mg/m ³	CO: 3000 mg/m ³ Staub: 120 mg/m ³
Kamineinsätze und offene Kamine für feste Brennstoffe	EN 13229	CO: 1500 mg/m ³ Staub: 100 mg/m ³	CO: 1500 mg/m ³ Staub: 75 mg/m ³

^a Bezugssauerstoffgehalt:
– für Holzfeuerungen 13 %vol;
– für Kohlefeuerungen 7 %vol.

Die Anforderungen nach EN 303-5 (bis 500 kW) sind in Revision. Ab 2011 sind folgende Grenzwerte einzuhalten:

Anforderungen nach EN 303-5 (bis 500 kW) ab 1.1.2011	CO		Staub
	[mg/m _n ³] bei 13 Vol.-% O ₂	[mg/m _n ³] bei 13 Vol.-% O ₂	
Handbeschickte Stückholzkessel	800		50
Automatisch beschickte Holzschnitzelfeuerungen	400		60
Heizkessel für Pellets	300		40

9 Literatur

- BAFU: Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, Bern 2001
- BAFU: Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, Bern 2005
- Doberer, A.; Good, J.; Nussbaumer, T.: Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW – Betriebseinfluss auf die Feinstaubemissionen von Holzfeuerungen, Zwischenbericht Phase 1 – Holzöfen, Bundesamt für Energie, Bern, 2009
- Good, J.; Obermayr, D.; Nussbaumer, Th.: Einfluss von Kaltstart und Teillast auf die Schadstoffemissionen von Stückholz- und Pelletheizungen, *11. Holzenergie-Symposium*, 17. September 2010, ETH Zürich, 2010, ISBN 3-908705-21-5, 145–172
- Good, J.; Nussbaumer, Th.: Prüfverfahren für die Startphase auf der Basis von EN 303-5, Teil 1: Stückholzkessel, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern 2010
- Hedberg, E. A. Kristensson, M. Ohlsson, C. Johansson, P. Johansson, E. Swietlicki, V. Vesely, U. Wideqvist, R. Westerholm: Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove. *Atmospheric Environment* 36: p. 4823-4837, 2002
- Klippel, N.; Nussbaumer, T.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselruss, *9. Holzenergie-Symposium*, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, Verenum und Bundesamt für Energie, Zürich und Bern 2006, ISBN 3-908705-14-2, 21–40
- Stern, D.I. and Robert K. Kaufmann: Estimates of global anthropogenic methane emissions 1860–1993. *Chemosphere*, Vol.33, p.159-176, 1996
- Wagner, D., T. Nussbaumer: Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen, Bundesamt für Energie, 1994

Tabelle 2 Zusammenfassung der Schadstoffemissionen der untersuchten Stückholz- und Pelletkessel in verschiedenen Betriebsphasen im Vergleich zu den Grenzwerten für Anlagen bis 70 kW (LRV-Angaben vom Stand 15. Juli 2010; EN303-5 (2010) und prEN303-5).

Nachlegen/Warmstart: Nachlegen gilt für Stückholzkessel, Warmstart für Pelletkessel.

Kessel	Stückholzkessel bis 70 kW							Pelletkessel bis 70 kW			LRV			EN 303-5 ⁴) (beste Klasse) 2010/2011
	A		B		C		D alt	LRV		Anhang 3 Ziff 522 ²⁾ 2010/2011		Anhang 4 Ziff 212 ³⁾ 2010/2011		
	Werte in mg/mn3 bei 13 Vol.-% O ₂	¹)	¹)	¹)	¹)	¹)		Anhang 3 Ziff 522 ²⁾ 2010/2011	Anhang 4 Ziff 212 ³⁾ 2010/2011	E	F	G		
Feststoffe	Start (0-30MIN)	63	92	44	111	55	210	144			60	42	22	
	Stationäre Phase (best 15)	10		17		12		171						
	Ausbrand	53		80		41		169			35	—		
	(Staub)	25		35		20		n.b.			65	41	—	
	Nachlegen / Warmstart								60 / 50	109 / 44	24	28	19	60 / 40
	Typenprüfung	17	±4	32	±7	17	±4	n.b.			—	50...80	18	150 / 29
CO	Start (0-30MIN)	911	3'352	2'699	5'426	3'285	9'517	5'219			748	930	1254	
	Stationäre Phase (best 15)	30		30		40		> 10'000	4'000					4'000
	Ausbrand	> 10'000		> 10'000		> 15'000		> 20'000				3500	6300	
	Nachlegen / Warmstart	350		1770		170		> 15'000			225	1000	2650	
	Typenprüfung	211		224		131		n.b.	800	3'635 / 509	49	195	12	300
	Takten (40...80 Min Zyklus)										—	800...1000	1600	2'181 / 364
KW (OGC)	Start (0-30MIN)	129	568	279	908	390	2'284	866			83	101	76	
	Stationäre Phase (best 15)	2		9		5		1'800						
	Ausbrand	22		21		38		1'270				103	113	
	Nachlegen / Warmstart	5		35		12		n.b.			39	19	130	
	Typenprüfung	3		20		9		n.b.	—	109 / 22	2	5	0.3	—
	Takten (40...80 Min Zyklus)										—	25	25	73 / 15
CH4	Start (0-30MIN)	28	161	71	241	92	592	232			—	28	20	
	Stationäre Phase (best 15)	1		2		2		850						
	Ausbrand	16		12		31		700			—	48	22	
	Nachlegen / Warmstart	2		22		4		n.b.			—	7	32	
	Typenprüfung	1		8		3		n.b.			—	2	0.1	
	Takten (40...80 Min Zyklus)										—	9	6	
NMKW	Start (0-30MIN)	101	407	208	667	298	1'692	634			—	73	56	
	Stationäre Phase (best 15)	2		3		7		950						
	Ausbrand	6		9		7		570			—	55	91	
	Nachlegen / Warmstart	3		13		8		n.b.			—	11.3	99	
	Typenprüfung	2		11		7		n.b.			—	3.3	0.2	
	Takten (40...80 Min Zyklus)										—	16	19	
NOx	Start (0-30MIN)	148	135	95	13	120	65	n.b.			—	64	114	
	Stationäre Phase (best 15)	142		156		164		n.b.			—	60	80	
	Ausbrand	72		101		96		n.b.			—	107	119	
	Nachlegen / Warmstart	155		132		180		n.b.			—	100	106	
	Typenprüfung	142		156		166		n.b.			—	20...100	111	
	Takten (40...80 Min Zyklus)													

¹) Startphase "schlecht"

²) In Betrieb stehende Holzfeuerungen

³) Neuzulassung, Typenprüfung

⁴) Werte umgerechnet von 10 auf 13 Vol.-% O₂