Lufthygienische Massnahmen im Bereich Holzfeuerungen

Bericht zur 1. und 2. Mess-Serie: Emissionsarme Anfeuermethoden für Stückholzfeuerungen

Entwicklung von emissionsarmen Anfeuermethoden für Stückholzfeuerungen inkl. messtechnischer Erfolgsnachweis im praktischen Betrieb

Definitive Version des Schlussberichtes

Ingenieurbüro Willi Vock
Ausserdorfstrasse 39
CH-8933 Maschwanden

Tel u Fax **044/768 29 13**
Email **willi.vock@datacomm.ch**

ardens GmbH
Andres Jenni
Munzachstrasse 38
Postfach 549
CH-4410 Liestal

Tel **061/923 85 85**
Email **ardens@datacomm.ch**

Maschwanden, 6. August 2007, W. Vock

Inhaltverzeichnis

		Seite
	Zusammenfassung	**4**
1.	**Ausganglage und Zielsetzung**	**9**
2.	**Vorgehen**	**10**
3.	**Messgeräte**	**11**
3.1	CO-Messung	11
3.2	Staubmessung	12
4.	**Versuchsobjekte, Messstellen und Anfeuermethoden**	**13**
4.1	Zimmerofen mit Speicher	13
4.2	Speicherofen gemäss VHP-Berechnungsprogramm	14
4.3	Cheminée	15
4.4	Speicherofen mit Heizeinsatz	16
4.5	Zentralheizungskochherd	17
4.6	Zentralheizungskessel mit unterem seitlichem Abbrand	18
4.7	Zentralheizungskessel mit unterem seitlichem Abbrand	19
4.8	Zentralheizungskessel mit hinterem stirnseitigem Abbrand	20
4.9	Zentralheizungskessel mit Sturzbrand	21
5.	**Resultate (bei 13% O_2) und Kommentare**	**22**
5.1	Feuerungen mit Naturzug (ohne Ventilator)	23
5.2	Feuerungen mit Ventilator	26
6.	**Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen**	**30**
6.1	Generelle Ergänzungen zur 2. Mess-Serie	30
6.2	Feuerungen mit Naturzug (ohne Ventilator)	31
6.3	Feuerungen mit Ventilator	33

Anhang 1-19: Anlagedaten, Staubmessung und Auswertung CO-Messung

Hinweis zu den Mess-Serien
Die Kommentare zur 1. Mess-Serie wurden unverändert aus dem Zwischenbericht übernommen. Die Kommentare zur 2. Mess-Serie sind in *Kursiv-Schrift* ergänzt.

Hinweis zu früheren Berichtversionen
Aufgrund von Hinweisen der kantonalen Fachstellen wurde die Interpretation der Resultate geändert. Die Staubfrachten in den ersten 15 Min. fallen damit tiefer aus, als ursprünglich angenommen. Auch bei den normierten mittleren Konzentrationen über den ganzen Abbrand werden tiefere Werte ausgewiesen. Diese konservative Beurteilung hat keinen Einfluss auf die Schlussfolgerungen des Berichtes. Zur Information werden in den Anhängen auch die ursprünglichen Werte aufgeführt.

Verdankungen

Die vorliegenden Untersuchungen haben die nachfolgend aufgeführten Personen und Institutionen durch ihre zuvorkommende Bereitstellung der Anlagen, die aktive Mitarbeit mit Ideen und Vorschlägen sowie finanziellen Beiträgen unterstützt. Das Projektteam möchte dafür allen Beteiligten seinen besten Dank aussprechen.

Betreiber, Eigentümer, Mieter:

Frau Lore Messerli, 8933 Maschwanden
Herr Urs Grieder, Ofenbau, 4460 Gelterkinden
Herr Christian Völlmin, Sopra AG, 4466 Ormalingen
Herr und Frau Vuilliomenet, 8784 Braunwald
Herr Graf, Heizung, Lüftung, Sanitär, 6247 Schötz
Herr Ruedi Bernet, 6153 Ufhusen
Herr Alexander Meyer, 6153 Ufhusen
Fam. Lustenberger, 6044 Udligenswil
Herr Gregor Hirsiger, Kaminfegermeister, 6045 Meggen
Herr und Frau von Moos, 6072 Sachseln
Herr Urs Baumann, Albert Koechlin-Stiftung, 6003 Luzern

Kantone:

Herr Dr. Peter Honegger, AFU-SG, 9001 St. Gallen
Herr Herbert Limacher, AWEL-ZH, 8090 Zürich
Herr Reto Wüest, UWE-LU, 6002 Luzern
Herr Peter Maly, AFU-SH, 8201 Schaffhausen
Herr Robert Bösch, AFU-TG, 8510 Frauenfeld
Herr Christian Schwab, SEVEN-VD, 1066 Epalinges
Herr Luca Colombo, Div. dell'ambiente TI, 6500 Bellinzona
Herr Heinrich Zumoberhaus, Sektion Luft u. Lärm AG, 5001 Aarau
Herr Roland Rüfenacht, BECO-BE, 3011 Bern
Herr Rudolf Jeggli, AFU-SO, 4509 Solothurn
Herr Andrea von Känel, Lufthygieneamt beider Basel, 4410 Liestal

Bund:

Herr Daniel Binggeli, BFE, 3003 Bern
Herr Ulrich Jansen, BAFU, 3003 Bern

Firmen:
Herr René Stark; anapol Gerätetechnik AG, 2555 Brügg
Herren Toni und Markus Heitzmann, 6105 Schachen
Herren A. Amman und A. Brändli, CTC-Giersch, 8112 Otelfingen
Herr Markus Erne, Windhager Zentralheizungen, 6203 Sempach-Station

Verbände:
Herren Bürgler und von Wyl, Hafnerverband (VHP), 4603 Olten

Zusammenfassung (alle Konzentrationen bezogen auf 13% O_2)

Allgemeine Übersicht

1. Mess-Serie

Von den insgesamt 12 ausgewerteten Messungen (mit einer Ausnahme wurden alle Messungen mit dem Anfeuermodul durchgeführt) wurden bei 9 Messungen in den ersten 15 Min. nach dem Start 60-89% der normierten Staubkonzentrationen gemessen (bezogen auf die Summe der normierten Staubkonzentrationen über den ganzen Abbrand). Bei 2 Messungen dürften die geschätzten Frachten in den ersten 15 Min. nach dem Start zwischen 68-77% des gesamten Abbrandes liegen. Für die übrigen Messungen sind in den ersten 15 Min. Frachten zwischen 8 und 44% zu erwarten. Die Bedeutung des Anfeuerverhaltens sowohl für Holzöfen mit Naturzug als auch für Holzkesselanlagen mit Ventilator wurde damit klar bestätigt. Erfolgreiche Massnahmen zur Reduktion der Feinstaubemissionen von Stückholzfeuerungen werden daher schwerpunktmässig auf die Optimierung des Anfeuerverhaltens ausgerichtet. Entsprechende Anstrengungen auf den Gebieten Forschung-Entwicklung, Prüfnormen und Betreiberverhalten sollten daher intensiviert werden. Mit der Anwendung des Anfeuermoduls gemäss Merkblatt des Kantons Graubünden konnten bei modernen Zimmer- und Speicheröfen nachweislich tiefe Feinstaubemissionen erreicht werden. Solche Merkblätter zeigen dem Betreiber, wie mit einfachen Massnahmen die Feinstaubemissionen wirkungsvoll reduziert werden können. Bei den Holzzentralheizungskesseln sind weitere Versuche erforderlich, weil die Emissionen teilweise noch zu hoch waren (deutlich über 150 mg/m^3) und zudem von Hand eingegriffen werden musste.

2. Mess-Serie

*Bei **Cheminéeöfen mit Speicher** und **Kachelöfen** entstehen mit traditionellen Anfeuermethoden (Durchbrand) sehr hohe Staubemissionen und eine ausgeprägte Rauchentwicklung. Werden **Cheminées** nur mit kleinen Holzmengen betrieben, sind die mittleren Emissionskonzentrationen weniger abhängig vom Anfeuern. Hingegen sind auch hier die geschätzten Frachten deutlich tiefer. Bei starker Rauchentwicklung steigen die CO-Konzentrationen generell über 4'000 mg/m^3. Bei hohem Luftüberschuss sind aber auch sehr hohe CO-Konzentrationen ohne Rauch möglich.*

***Zentralheizungskessel** erreichen mit dem Anfeuermodul und Drosseln der Verbrennungsluft nach 30-40 Min. einen stabilen Betrieb. Dieser zeichnet sich aus durch CO-Konzentrationen unter 500 mg/m^3 und Staub-Konzentrationen unter 50 mg/m^3. Die Rauchbildung an der Kaminmündung verschwindet nach ca. 20 Min. Durch eine verfeinerte Optimierung des Anfeuervorganges mit Anfahrprogramm sind bei den einzelnen Geräten weitere Fortschritte erreichbar. Das Nachlegen auf die Grundglut hat auch bei kleiner Restglut nach wenigen Minuten zu Rauchfreiheit und Staubemissionen um 50 mg/m3 geführt. Diese Betriebsweise, welche gemäss heutigen Prüfnormen von Prüfinstituten angewendet wird, führt zu vergleichsweise sehr tiefen Staubemissionen und wiederspiegelt nicht die tatsächlichen Emissionen von Holzfeuerungen in der Praxis.*

Anmerkung zum Informationskonzept: Vor der 1. Mess-Serie wurden alle wichtigen Bundesbehören und Forschungsinstitutionen mit Projekten im Bereich Emissionen von Holzfeuerungen informiert. Die Resultate der 1. Mess-Serie wurden den beteiligten Kantonen und Bundesstellen, sowie den direkt betroffenen Betreiber und Herstellern zur Verfügung gestellt. Nach Vorliegen der Resultate aus der 2. Mess-Serie werden zusätzlich alle übrigen Verbände und Hersteller informiert.

Weil jeder Abbrand bei Stückholzfeuerungen in einer gewissen Bandbreiten streuen kann, sind weitere Messungen und statistische Auswertungen erforderlich.

Holzöfen mit Naturzug

1. Mess-Serie

Die gemessenen mittleren Feinstaubemissionen über den gesamten Abbrand liegen bei den mit dem Anfeuermodul befeuerten **Holzöfen** (inkl. Z-Herd) zwischen 83 und 203 mg/Nm^3. Ein **berechneter Speicherofen** mit hoher Verbrennungsqualität wurde gemäss Bedienungsanleitung befeuert und ergab 380 mg/Nm^3. Bei höheren Aussentemperaturen führte das Befeuern dieses Speicherofens mit dem Anfeuermodul zu erhöhten Staubemissionen (+18°C: 91 mg/Nm^3). Bei tieferen Aussentemperaturen wurden tiefere Emissionen gemessen (+3°C: 67 mg/Nm^3), die mittleren CO-Konzentrationen waren bei tiefen Aussentemperaturen ebenfalls niedriger.

Beim **Zimmerofen mit Speicher** konnte ein deutlicher Einfluss der Kaminfeger-Reinigung auf die Staubemissionen nachgewiesen werden (vor der Reinigung: 203 mg/Nm^3; nach der Reinigung: 83 mg/Nm^3).

Aufgrund der vorliegenden Messungen kann davon ausgegangen werden, dass mit den untersuchten Anfeuermethoden bei allen Geräten mit Naturzug und oberem Abbrand relativ tiefe Feinstaub-Emissionen erreicht werden können. Abgesehen vom Zentralheizungsherd konnte bei allen Geräten mit Naturzug die Bedingung „15 Minuten nach Start kein sichtbarer Rauch an der Kaminmündung„ erfüllt werden. Die untersuchte Anfeuermethode kann daher den Betreibern solcher Geräte im Rahmen der Informationstätigkeit der Kantone für die kommende Heizsaison empfohlen werden. Mit Ausnahme von Vergleichsmessungen mit herkömmmlichen Anfeuermethoden sind im Rahmen der nächsten Mess-Serie bei Holzöfen mit Naturzug keine weiteren Messungen mehr erforderlich.

Durch die Feinabstimmung und Weiterentwicklung der vorgeschlagenen Anfeuermethode auf die einzelnen Gerätetypen lassen sich voraussichtlich weitere Verbesserungen erzielen. Den Herstellern wird daher die Weiterbearbeitung der Problematik und die Anpassung der Bedienungsanleitungen empfohlen.

2. Mess-Serie

*Die Vergleichsmessungen an **Cheminéeöfen mit Speicher** und **Speicheröfen** haben gezeigt, dass mit traditionellen Anfeuermethoden (Durchbrand) die mittleren Feinstaub-Konzentrationen über den gesamten Abbrand um Faktor 5.9 bis 7.1 ansteigen können (478 bis 486 statt 67 bis 83 mg/Nm^3). Die geschätzten Feinstaub-Frachten können im Vergleich mit traditionellen Anfeuermethoden um Faktor 2.7 bis 7.9 gesenkt werden. Für kleine Füllmengen sind in **Cheminées** mit traditionellen Anfeuermethoden um Faktor 1.8 höhere Staubkonzentrationen zu erwarten (219 statt 122 mg/Nm^3). Die Frachten werden bei kleinern Holzmengen um Faktor 2.1 verringert werden. Bei Cheminées dürften die Vorteile der verbesserten Anfeuermethoden bei Überfüllung noch deutlicher ausfallen. Versuche mit grösseren Füllmengen sollten daher nachgeholt werden.*

In der nachfolgenden Tabelle werden alle Resultate von Holzöfen mit Naturzug aufgeführt:

Geräte-Typ	***Anfeuermethode***	***Mittlere gemessene Staubkonzentration (mg/m^3)*** *In grober Näherung massgebend für die Frachten*	***Mittlere normierte Staubkonzentration (mg/m^3 bei 13% O_2)*** *Massgebend für die Beurteilung der Emissionen*	***Bemerkungen***
Zimmerofen mit Speicher	*Anfeuermodul oben*	*111*	*203*	*Vor der Kaminfeger-reinigung*
	Anfeuermodul oben	*42*	*83*	*Nach der Kaminfeger-reinigung*
	Traditionell unten	*303*	*486*	*Hohe Staub- und HC-Konzentrationen im Ausbrand*
Verhältnis Max:Min		*303:111=2.7*	*486:83=5.9*	
Speicherofen VHP	*Anfeuermodul oben*	*53*	*91*	*Bei hoher Aussen-temperatur*
	Anfeuermodul oben	*45*	*67*	*Bei tiefer Aussen-temperatur*
	Gemäss Bedienungs-anleitung	*171*	*380*	
	Traditionell unten	*356*	*478*	
Verhätnis Max:Min		*356:45=7.9*	*478:67=7.1*	
Konventionell gemauertes Cheminée	*Anfeuermodul oben*	*46*	*122*	*Kleine Holzmenge*
	Traditionell unten	*97*	*219*	*Kleine Holzmenge*
Verhältnis Max:Min		*97:46=2.1*	*219:122=1.8*	
Speicherofen mit Heizeinsatz	*Anfeuermodul oben*	*147*	*167*	
Zentralheizungs-kochherd	*Anfeuermodul unten*	*135*	*198*	

Tabelle: Resultate der 1. und 2. Mess-Serie von Holzöfen mit Naturzug (alle Versuche mit Buche oder Ahorn)

Holzzentralheizungskessel mit Ventilator

1. Mess-Serie

Die mittleren Feinstaubemissionen bei **Holzkesseln** liegen zwischen 45 und 267 mg/Nm^3. Durch die langen Abbrandzeiten bei Kesselanlagen werden hohe Feinstaubkonzentrationen in der Anfahrphase stärker kompensiert als bei den Holzöfen mit kürzeren Abbrandzeiten. Für Holzkessel sind weitere Versuche erforderlich. Diese sollen im Rahmen der 2. Mess-Serie zusammen mit den Herstellern durchgeführt werden.

Durch die Verbesserung des Anfeuermoduls konnten bei ***Holzkessel mit unterem, seitlichem Abbrand*** tiefe, mittlere Staubgehalte von 55 mg/Nm^3 erreicht werden. Ein Betreiber sammelt weitere Erfahrungen bei diesem Anlagetyp. Weitere Messungen zur Bestätigung sind im Rahmen der nächsten Mess-Serie geplant. Damit sollten für diesen stark verbreiteten Feuerungstyp für die nächste Heizsaison gesicherte Information zum

Anfeuern vorliegen.

Bei ***Holzkessel mit hinterem stirnseitigem Abbrand*** wurden ebenfalls tiefe mittlere Staubgehalte von 45 mg/Nm^3 gemessen. Allerdings musste mehrmals geschürt werden, weil wiederholt Hohlbrand aufgetreten ist. Es wird vermutet, dass es zuwenig gut gelungen ist, das Feuer gleichmässig auf die ganze Breite im hinteren Feuerraum zu starten. Bei dieser Anlage bestehen zudem regeltechnische Probleme. Es werden zwei weitere Versuchmessungen empfohlen.

Die geprüfte Anfeuermethode hat sich beim **Sturzbrandkessel** nicht bewährt. Schon nach kurzer Zeit trat wiederholt Hohlbrand auf und es musste regelmässig geschürt werden. Es wird empfohlen nochmals zwei Messungen (gemäss Methode des Betreibers) durchzuführen.

2. Mess-Serie

Genereller Hinweis: Die folgenden Resultate wurden durch manuelles Drosseln der Luftzufuhr in der Anfahrphase (Abdecken der Luftöffnungen mit Alu-Band) erreicht. Mit einer programmierten Luftdrosselung ist voraussichtlich eine weitere Optimierung möglich. Wie weit bestehende Geräte mit einem solchen Anfahrprogramm nachgerüstet werden können, ist teilweise noch offen. Die Betreiber prüfen zur Zeit, welche Anpassungen erforderlich sind (Anzahl Anzündhilfen erhöhen) um die Geräte vorerst noch ohne Drosselung starten zu können.

Holzkessel mit unterem seitlichem Abbrand (1. Lage: Laubholz, alle weiteren Lagen: Nadelholz): *Mit einer optimierten Version des Anfeuermoduls konnten auch bei Geräten, welche bei Nadelholz zu Nachrutschproblemen und damit zu Hohlbrand neigen (schmaler Füllraum), gute Resultate erreicht werden (mittlere Staubkonzentration über den ganzen Abbrand: 60 mg/m^3). Nach ca. 30 Min. wurde ein sehr stabiler Betrieb erreicht werden. Die CO-Emissionen lagen, (abgesehen von zwei kurzen, kleinen Spitzen) über zwei Stunden deutlich unter 500 mg/m^3. Gleichzeitig wurden in dieser Phase nach dem Kessel auch Staubkonzentrationen unter 50 mg/m^3 gemessen. Weil bei diesem Gerät auf die kommende Heizsaison ein Partikel-Filter eingebaut werden soll, wurde gleichzeitig an zwei Mess-Stellen (nach dem Kessel und im Kamin) Staub gemessen. Es zeigte sich, dass im Mittel über den gesamten Abbrand 58% der Feinstäube durch den gemauerten Kamin zurückgehalten werden.*

Holzkessel mit hinterem, stirnseitigem Abbrand (Laubholz): *In Zusammenarbeit mit dem Hersteller konnte der Anfeuermodul weiter verbessert werden. Bei diesem Gerät wurde nach 40 Min. ebenfalls ein sehr stabiler Abbrand (d.h. Vermeidung von Hohlbrand) erreicht. Über 4 Stunden konnte der Betrieb ohne jegliche CO-Spitzen aufrechterhalten werden. Die Staubkonzentrationen lagen in dieser Betriebsphase deutlich unter 50 mg/m^3 (mittlere Staubkonzentration über den ganzen Abbrand: 65 mg/m^3). Im Ausbrand sind die Konzentrationen etwas angestiegen (unter 150 mg/m3). Mit einem optimierten Anfahrprogramm kann vermutlich die Zeit bis zur stabilen Ausbrandphase noch verkürzt werden. Der Hersteller wird weitere Versuchsmessungen dazu durchführen.*

Holzkessel mit Sturzbrand (Laubholz): *Leider haben wir erst nach den Fehlschlägen anlässlich der 2. Mess-Serie und dank den aufmerksamen Langzeitbeobachtungen des Betreibers herausgefunden, dass bei diesem Gerät die hinteren Lufteinlässe teilweise verschlossen waren (nicht sichtbar). Nach der Erhöhung der Soll-Temperatur für die Speicherladung kann jetzt der Speicher problemlos durchgeladen werden. Erstaunlicherweise hatte das Gerät mit der verbesserten Version des Anfeuermoduls bereits nach knapp 15 Min. die stabile Betriebsphase erreicht. Diese konnte während rund*

20 Min. aufrechterhalten werden. Danach hat vermutlich der inaktive, hintere Teil des Brennraumes eine massive Störung verursacht. Mit Schüren von Hand konnte diese behoben werden. Dabei wurde festgestellt, dass der hintere Rostteil ohne Glut war. Nach dem Schüren war der Betrieb wieder stabil. Die Messungen sollten mit einem intakten Gerät wiederholt werden.

In der nachfolgenden Tabelle werden alle Resultate von Zentralheizungskesseln mit Ventilator aufgeführt:

Geräte-Typ	***Anfeuer-methode***	***Mittlere gemessene Staubkonzentration (mg/m3)*** *In grober Näherung massgebend für die Frachten*	***Mittlere normierte Staubkonzentration (mg/m3 bei 13% O2)*** *Massgebend für die Beurteilung der Emissionen*	***Bemerkungen***
Zentralheizungs-kessel mit unterem, seitlichem Abbrand (Typ 1)	*Anfeuermodul Version 1*	*123**	*108**	*85% Fichte; 15% Ficht;e Holzstapel seitlich gekippt; Hohlbrand; schüren von Hand*
	Anfeuermodul Version 2	*170*	*154*	*85% Fichte; 15% Fichte; gestörte Wärmeabfuhr; kleine Holzmenge (kurze stabile Phase)*
	Anfeuermodul Version 2	*77*	*60*	*85% Fichte; 15% Fichte; Grössere Holzmenge (längere stabile Phase)*
Zentralheizungs-kessel mit unterem, seitlichem Abbrand (Typ 2)	*Anfeuermodul Version 2*	*69*	*55*	*100% Fichte*
Zentralheizungs-kessel mit hinterem, stirnseitigem Abbrand (Typ 1)	*Anfeuermodul Version 1*	*56**	*45**	*100% Buche; Ältere Anlage; Hohlbrand; schüren von Hand*
Zentralheizungs-kessel mit hinterem, stirnseitigem Abbrand (Typ 2)	*Anfeuermodul Version 2*	*86*	*65*	*100% Buche; Neue Anlage; Ohne Nachlegen*
	Anfeuermodul Version 2	*77*	*55*	*100% Buche; Mit Nachlegen*
	Anfeuermodul Version 2	*41*	*23*	*100% Buche; Nur Nachlegen (gemäss Prüfnorm)*
Zentralheizungs-kessel mit Sturzbrand	*Anfeuermodul Version 1*	*437**	*267**	*100% Buche; Gestörte Speicherladung; Hohlbrand; schüren von Hand*
	Anfeuermodul Version 2	*344**	*198**	*100% Buche; Hintere Luftdüsen verstopft; Hohlbrand; schüren von Hand*

** Ohne Schüren von Hand wären die Emissionen deutlich höher. Die Werte können daher nicht für die Beurteilung der Geräte verwendet werden.*

Tabelle: Resultate der 1. und 2. Mess-Serie von Holzzentralheizungskesseln

Anmerkung zu den Anzündhilfen: Bei den auf dem Markt erhältliche Anzündhilfen können grosse Qualitätsunterschiede auftreten. Merkblätter sollten Hinweise für geprüfte Produkte enthalten.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Im Rahmen der Massnahmenplanung zur Luftreinhalte-Verordnung prüfen verschiedene Kantone die Einführung einer Kontrolle von kleinen Holzfeuerungen. Damit die Betreiber anlässlich der Kontrollen auch Hinweise für den emissionsarmen Betrieb von Holzfeuerungen erhalten, soll Ihnen ein Merkblatt abgeben werden.

In der vorliegenden Untersuchung sollen Anfeuermethoden untersucht werden, welche einen hohen Benutzerkomfort und somit eine hohe Akzeptanz bei den Betreibern aufweisen. Anfeuermethoden wie das Vorfeuer werden daher nicht untersucht.

Für den emissionsarmen Betrieb von Stückholzfeuerungen ist die Anfeuermethode entscheidend. Die heutigen Bedienungsanleitungen der Stückholzfeuerungen berücksichtigen diese Problematik nur ungenügend. Mit dem vorliegenden Projekt sollen für verschiedene Feuerungskategorien praxisnahe Methoden zum Anfeuern entwickelt werden. Bisher wurden solche Untersuchungen an Zimmeröfen und Cheminées durchgeführt (nur CO-Messungen) und mit dem Merkblatt des ANU-GR umgesetzt (vgl. Beilage). Die Wirksamkeit geeigneter Anfeuermethoden ist mit entsprechenden Messungen nachzuweisen. Solche Messungen fehlen bisher für die Kategorien, Kachelöfen, Zentralheizungskochherd/Holzkochherd und Kellerkessel. Neben den CO-Emissionen sind auch die Staubemissionen zu erfassen.

Die heutigen Prüfnormen erfassen nur das Nachlegen (Warmstart), nicht aber das Anfeuern im kalten Zustand. Die vorliegenden Messungen konnten daher nicht nach den einschlägigen Prüfnormen durchgeführt werden. Gleichzeitig sollten auch kostengünstige Prüfverfahren für Feldmessungen im Rahmen des Vollzugs der LRV getestet werden.

Die Resultate aus dem vorliegenden Projekt dienen dem AFU-SG als Basis für die Ausarbeitung eines Merkblattes, welches anlässlich der Feuerungskontrolle den Betreibern abgegeben werden soll (Beschreibung der Anfeuermethode inkl. Fotos). Anderen Kantonen wird das Merkblatt für die Anpassung an die eigenen Bedürfnisse in geeigneter Form zur Verfügung gestellt. Die Informationen werden zusätzlich für einen Internetauftritt der Ostschweizer Kantone benötigt.

Die Arbeiten werden koordiniert mit weiteren, aktuellen Projekten des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Energie (BFE) auf diesem Gebiet (Projekte Verenum, Dr. Thomas Nussbaumer und Oekozentrum, Christian Gaegauf).

Für die Sicherstellung der Finanzierung ist die Projektleitung zuständig. Folgende Stellen haben einen Finanzbeitrag zugesichert:

- Kantone der Ost-Schweiz (ZH, SG, TG, SH)
- Kantone der Zentralschweiz (LU/ZUDK)
- Kantone der Nordwestschweiz (SO, AG, BE; BL/BS)
- Kantone der Westschweiz (VD)
- Kantone der Südschweiz (TI)
- Bundesamt für Energie (BFE)
- Bundesamt für Umwelt (BAFU)

2. Vorgehen

- Damit die Resultate rechtzeitig für die Ausarbeitung eines Merkblattes für die nächste Heizsaison zur Verfügung stehen, mussten die Messungen kurzfristig geplant und durchgeführt werden.

- Bundesbehörden und Forschungsstellen, welche zur Zeit grössere Projekte im Zusammenhang mit Emissionen von Holzfeuerungen planen, wurden über das Projekt informiert.

- Mess-Serien: Im Rahmen der 1. Mess-Serie wurde versucht, die Ziele mit beschränktem Aufwand zu erreichen und ein Überblick zu gewinnen. Nach Vorliegen der Resultate wird entschieden, ob eine 2. Mess-Serie erforderlich ist.

- Festlegen der Gerätetypen: Die Messungen wurden ausschliesslich an Stückholzfeuerungen durchgeführt. Vorgesehen waren Geräte aus folgenden Kategorien:

  - Zimmerofen und Cheminée (bisher nur CO gemessen)
  - Kachelofen
  - Holzkochherd/Zentralheizungskochherd
  - Zentralheizungskessel

- Auswahl der Messobjekte: Die Messungen wurden bei privaten Betreibern im Feld durchgeführt. In Absprache mit der Albert Köchlin-Stiftung wurden zudem soweit möglich Kesselanlagen ausgewählt, bei welchen der Einbau eines Partikelfilters geplant ist.

- Messkonzept (1. Mess-Serie): In einem ersten Schritt wurden die CO- und Staub-Emissionen am Zimmerofen (mit Anfeuermodul gemäss Merkblatt GR) überprüft. Nach der Bestätigung der guten Resultate wurden Messungen an den übrigen Kategorien durchgeführt. Um tiefe Staubemissionen zu erreichen, wurden Anfeuermethoden gewählt, welche ein moderates Anfeuern (sanftes und stetiges Ansteigen der CO_2-Konzentrationen) ermöglichen.

- Instruktion der Betreiber: Während der ersten Messung wurden die Betreiber über die Prinzipien des emissionsarmen Anfeuerns instruiert. Bei Anlagen, welche noch nicht die gewünschten Resultate gezeigt haben, werden weitere Messungen im Rahmen der 2. Mess-Serie durchgeführt.

- Feldmessung inkl. Staub: Bei den Zimmeröfen, Cheminées etc. erfolgten die Messungen (CO, Staub und Wirkungsgrad) über den gesamten Abbrand (ab Kaltstart bis 2% CO_2). Das Nachlegen wurde mit einer Ausnahme nicht erfasst. Bei den Kesselanlagen wurde der Messzyklus inkl. Kaltstart auf 3-4 Stunden beschränkt. Sämtliche Messungen wurden mit dem Anzünden (Kaltstart) gestartet. Weil die heutigen Prüfnormen und Messempfehlungen den Kaltstart nicht einbeziehen, wurden sie für die vorliegenden Messungen nicht berücksichtigt.

3. Messgeräte

3.1 CO-Messung

Messgerät

Messsonde

Technische Daten

Typ: anapol EU-5000

Messparameter: O_2, CO

Sensorik: Elektrochemisch und Infrarot

Messgenauigkeit für CO-Konzentrationen: ± 6%
(für Konzentrationen im Bereich bis 100'000 ppm, gemäss Angaben des Herstellers)

3.2 Staub-Messung

Messgerät

Messsonde mit Kühler und Filterhülse (wird auf Konus aufgesetzt)

Technische Daten

Typ: Wöhler SM 96 (TÜV-geprüft)

Messparameter: Staub-Massenkonzentration

Messprinzip: Absaugung von 135 Liter in 15 Min. durch Glasfaserfilterhülse mit konstanter Absauggeschwindigkeit von 4m/s.

Messgenauigkeit für Staubkonzentrationen: ±30 mg/m^3 (für Konzentrationen im Bereich von 150 mg/m^3 bei 13% O_2, gemäss ZIV Arbeitsblatt 602)

4. Versuchsobjekte, Messstellen und Anfeuermethoden

4.1 Zimmerofen mit Speicher

Feuerung

Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul (oben)

Traditionell Anfeuern (Durchbrand)

4.2 Speicherofen gemäss VHP-Berechnungsprogramm

Feuerung

Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul (oben)

Anfeuern gemäss Bedienungsanleitung

Traditionell Anfeuern (Durchbrand)

4.3 Cheminée

Feuerung

Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul (oben)

Traditionell Anfeuern (Durchbrand)

4.4 Speicherofen mit Heizeinsatz

Feuerung

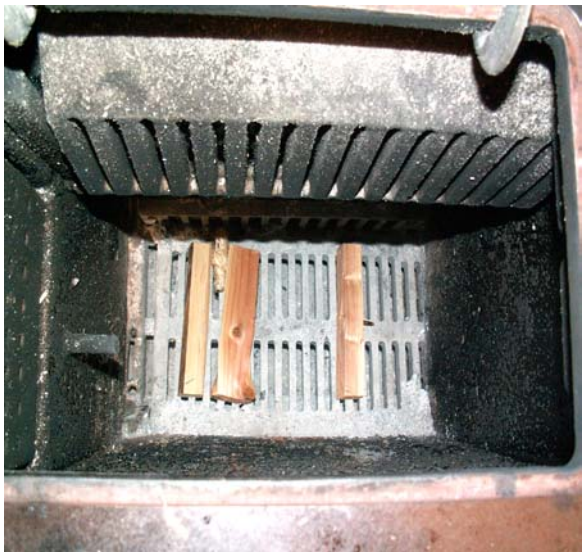
Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul
(unten, hinten und Zeitungslunte)

4.5 Zentralheizungsherd

Feuerung

Anordnung-Messstelle



Anfeuermodul (unten)

4.6 Zentralheizungskessel mit unterem, seitlichem Abbrand

Feuerung

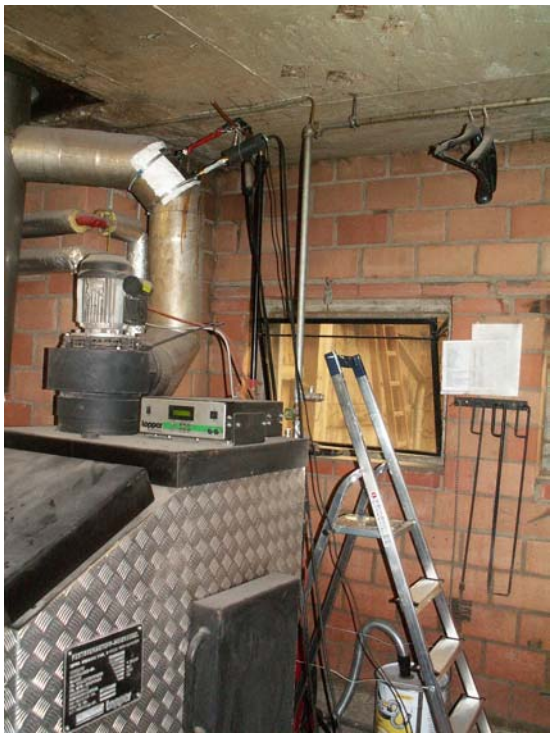
Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul Version 1
(unten, nur seitlich)

Anfeuermodul Version 2
(unten, ganzer Rost)

4.7 Zentralheizungskessel mit unterem, seitlichem Abbrand

Feuerung



Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul (unten)

4.8 Zentralheizungskessel mit hinterem, stirnseitigem Abbrand

Feuerung

Anordnung-Messstelle

Anfeuermodul Version 1 (unten, hinten)

Anfeuermodul Version 2 (unten)

4.9 Zentralheizungskessel mit Sturzbrand

Feuerung

Anordnung-Messstelle (besser platziert)

Anfeuermodul Version 1 (unten, Holzkohle entfernt)

Anfeuermodul Version 2 (unten, Holzkohle nicht entfernt)

5. Resultate (bei 13%O_2) und Kommentare

Definition Hohlbrand oder Lochbrand

Wenn das Holz im Verlauf des Abbrandes nicht nachrutscht (infolge Verkeilen, Verklemmen der einzelnen Scheiter oder seitlichem Kippen des ganzen Stapels) entstehen Hohlräume, welche sich mit stark erhöhten und oft auch schnell schwankenden CO- und Staub-Konzentrationen sowie Luftüberschuss bemerkbar machen.

Definition Durchbrand (traditionelle Anfeuermethode)

Wenn der Holzstapel unten gezündet wird und die Schwelgase durch den kalten Holzstapel aufsteigen, spricht man von Durchbrand. Solche Abbrände entwickeln viel Rauch über lange Zeit und wurden im Rahmen des Projektes für Vergleichsmessungen bei schlechtem Betrieb gemessen. Viele Geräte werden heute mit dieser traditionellen Methode angefeuert.

Definition der Abbrand-Typen

Vorfeuer: Zuerst wird ein intensives Vorfeuer mit fein gespaltenem Nadelholz entfacht. Nach 5-10 Min. werden Holzscheiter auf das brennende Vorfeuer nachgelegt.

Oberer Abbrand: Die Öffnungen zur Nachverbrennungszone befinden sich oben im Feuerraum (vorne, hinten, in der Mitte oder seitlich) und die brennbaren Gase verlassen den Feuerraum nach oben.

Unterer, seitlicher Abbrand: Die Öffnungen zur Nachverbrennungszone befinden sich unten im Feuerraum und die brennbaren Gase verlassen den Feuerraum rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes.

Hinterer, stirnseitiger Abbrand: Die Öffnungen zur Nachverbrennungszone befinden sich hinten im Feuerraum und die brennbaren Gase verlassen den Feuerraum in Richtung der Faserrichtung des Holzes.

Sturzbrand Abbrand: Die Öffnungen zur Nachverbrennungszone befinden im Feuerraumboden (Rost) und die brennbaren Gase verlassen den Feuerraum nach unten.

Nachlegen: Nach dem ersten Abbrand wird nochmals Holz auf eine ausreichende Grundglut nachgelegt. Dieses Verfahren wird von Prüfinstituten gemäss heutigen Prüfnormen angewendet.

Hinweis zu den mittleren normierten Staubkonzentrationen

Ursprünglich wurden die Staubkonzentrationen für jede Messung (15 bis 30 Min.) zuerst normiert (Vorgehen gemäss Messempfehlung des BAFU). Für die mittleren Staubemissionen über den ganzen Abbrand wurde anschliessend das Mittel aller normierten Konzentrationen gebildet. Daraus resultierten mittlere normierte Staubkonzentrationen zwischen 98 und 1'688 mg/Nm^3. Rücksprachen mit Forschungsstellen haben ergeben, dass für Stückholzfeuerungen die Konzentrationen mit diesem Vorgehen eher überschätzt werden. Die gemessenen Staubkonzentrationen wurden daher zuerst gemittelt und anschliessend normiert. Dies führt zu teilweise markant tieferen Konzentrationen (45 bis 486 mg/Nm^3). Möglicherweise werden die Emissionen mit diesem Verfahren eher unterschätzt. Zukünftige Staubmessungen sollten auf gemessenen Abgasvolumen basieren.

Hinweis zu den Staubfrachten

Ursprünglich wurden für die Abschätzung der Frachten die normierten Staubkonzentrationen verwendet. Gemäss Rücksprache mit den kantonalen Fachstellen werden bei diesem Vorgehen die Frachten in der Startphase überschätzt. Neu wurden die Staubfrachten aufgrund der gemessenen nichtnormierten Staubkonzentrationen abgeschätzt. Diese stimmen nur für konstante Abgasvolumen. In der Praxis ist mit Abweichungen zu rechnen (Öfen: Kaminzug ist in der Startphase tiefer; Zentralheizungskessel: Verbrennungsluft wurde während der ersten 10 Min. durch Zukleben der Luftöffnungen mit Alu-Folie, manuell gedrosselt). Für zukünftige Abschätzungen von Frachten sollten die Abgasmengen ermittelt werden.

Hinweis zu der Anordnung der Messstellen

Teilweise war die Anordnung der Messstellen ungünstig (in der Nähe von Rohr-Krümmungen). Soweit möglich, wird im Rahmen der 2. Mess-Serie eine günstigere Platzierung angestrebt.

Hinweis zum Vorfeuer

Diese Methode wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, weil der Bedienungskomfort ungenügend ist. Die Geräte sollen in einem Schritt in Betrieb genommen werden können. Wird zu spät nachgelegt entstehen sehr hohe Emissionen. Zudem sind zwei Emissionsstösse zu befürchten (beim Start des Vorfeuers und beim Nachlegen).

Hinweis zum Scheuern bei den Zentralheizungskessel

Messergebnisse, welche mit Scheuern erzielt wurden zeigen auf, welche Emissionen ohne das Auftreten von Nachrutschproblemen in etwa erreicht werden könnten. Diese Resultate können aber nicht für die Beurteilung des Emissionsverhaltens der jeweiligen Gerätetypen verwendet werden.

5.1 Feuerungen mit Naturzug (ohne Ventilator)

Zimmerofen mit Speicher (Anhang 1, 2, 3)

1. Mess-Serie:

Im Vergleich zu den früheren Messungen (für das Merkblatt GR) bei tiefen Aussentemperaturen wurden weniger hohe CO_2-Maxima gemessen (früher: 12%; jetzt: 10%). Es wird vermutet, dass die CO_2-Konzentrationen durch den Kaminzug beeinflusst werden. Bei tieferen Aussentemperaturen und somit hohem Kaminzug, werden höhere CO_2-Konzentrationen erreicht. Die Reinigung durch den Kaminfeger beeinflusst den Kaminzug ebenfalls. Bei Messungen vor der Kaminfeger-Reinigung (letzte Reinigung vor 3 Jahren) war das CO_2-Maxima tiefer (9%). Auch die Staubemissionen werden durch die Reinigung günstig beeinflusst. Vor der Reinigung betrug die mittlere Staubkonzentration 203 mg/Nm^3 und nach der Reinigung 83 mg/Nm^3. Vor der Reinigung wurde 8 Min. nach Start noch schwacher Rauch beobachtet. Nach der Reinigung war das Feuer bereits ab Start rauchfrei. Vor der Reinigung war nach 15 Min. rund 68% der Staubfracht ausgestossen und die mittlere normierte Staubkonzentration (Staubhülse 21) betrug 2'564 mg/m^3. Nach der Reinigung wurde nach 15 Min. eine Staubfracht von rund 12% und eine mittlere Staubkonzentration (Staubhülse 21) von 236 mg/m^3 gemessen.

2. Mess-Serie

Zum Vergleich wurden Messungen mit traditionellen Anfeuermethoden (Anhang 3) vorgenommen. Das Anzünden erfolgte von vorne/unten (Durchbrand) mit Zeitungspapier und einer handvoll Anfeuerholz (Tanne 0.5x20cm). Zudem wurde der Füllraum auf ca. ¾ der Höhe gefüllt (Überfüllung). Gemäss Bedienungsanleitung darf der Füllraum nur zur Hälfte gefüllt werden. Die mittleren Staubemissionen über den ganzen Abbrand waren mit 486 mg/Nm^3 markant höher. Die mittlere Staubkonzentration nach 15 Min (Staubhülse11) betrug 1957 mg/m^3. Im Ausbrand (Staubhülse 18) wurden sehr hohe mittlere Staubkonzentrationen von 2'929 mg/m^3 festgestellt. Zudem wurden auch sehr hohe HC-Konzentrationen (über 100 mg/m^3, nicht aufgezeichnet) gemessen. Die Staubfrachten waren im Ausbrand (Staubhülse 18) mit 28% gleich gross wie beim Anfeuern (28%, Staubhülse 11). Die Resultate bestätigen die Vorteile des optimierten Anfeuerns bei diesem Ofentyp sehr deutlich.

Speicherofen gemäss VHP-Berechnungsprogramm (Anhang 4, 5, 6, 7)

1. Mess-Serie

Bei höherer Aussentemperatur (Anhang 4: +18°C) wurden ebenfalls deutlich tiefere CO_2-Maxima (9.5%) als bei tieferen Aussentemperaturen (Anhang 5: +3°C) beobachtet (CO_2-Maxima: 12%). Der vermutete Zusammenhang zwischen Aussentemperatur und Kaminzug beim Zimmerofen (vgl. oben) wird bestätigt. Bei höheren Aussentemperaturen ergeben sich bei diesem Ofentyp ebenfalls höhere Staubkonzentrationen (91 mg/Nm^3) als bei tieferen Aussentemperaturen (67 mg/Nm^3). Auch die mittleren CO-Konzentrationen sind bei wärmeren Aussentemperaturen höher. Bei beiden Messungen wurde kein sichtbarer Rauch am Kamin festgestellt. Bei tiefen Aussentemperaturen ist lediglich eine Wasserdampffahne sichtbar (Ausflockungen). Beide Messungen wurden mit Anfeuermodul oben durchgeführt. Die Staubfrachten nach 15 Min betrugen 11 bis 24%.

Zum Vergleich wurde auch eine Messung mit Anfeuern gemäss Bedienungsanleitung gemacht (Anhang 6). Durch das Auftreten von Lochbrand wurden höhere mittlere Staubkonzentrationen gemessen (380 mg/Nm^3). Beim Anfeuern gemäss Bedienungsanleitung blieben die Staubgewichte pro Staubhülse annähernd konstant. Im Ausbrand ergaben sich dadurch erhöhte Konzentrationen (2'630 mg/m3; Staubhülse 6) bezogen auf 13% O_2. Nach 15 Min. waren erst 12% der gesamten Feinstaubfracht ausgestossen.

Anmerkung zur beobachteten Dampfschwade: Wegen des vorhanden Kaminhutes konnte die bei Dampfschwaden typische Flimmerstrecke über dem Kamin nicht beobachtet werden. Trotzdem gehen wir davon aus, dass es sich bei der beobachteten Fahne um Dampf gehandelt hat. Begründung: Die Dampfschwade war bis Min 44, also auch während der Zeit mit sehr tiefen Staubemissionen (ab Min 35) sichtbar. Zudem war die typische Ausflockung von Dampfschwaden klar zu erkennen. Vermutlich muss davon ausgegangen werden, dass bei Kachelofen mit tiefen Abgastemperaturen auch bei wärmeren Aussentemperaturen (über 0°C) noch Dampfschwaden auftreten können. Weiteres Vorgehen: In der momentanen Jahreszeit sind die zur Schwadenbildung erforderlichen kühlen und feuchten meteorologischen Bedingungen nicht erfüllt. Kurzfristig wird daher auf eine genauere Abklärung der Vorgänge zur Schwadenbildung verzichtet.

2. Mess-Serie

Auch bei diesem Gerät wurden Vergleichmessungen mit traditioneller Anfeuermethode (Anhang 7) vorgenommen. Das Anzünden erfolgte ebenfalls von vorne/unten (Durchbrand) mit zwei handvoll Anfeuerholz (Tanne 0.5x20cm) und einer Anzündhilfe. Das Feuer verteilte sich gut über den ganzen Holzstapel und brannte auch gut aus. Für die erste Staubhülse (21) ergaben sich indessen extrem hohe mittlere Konzentrationen von 9'732 mg/m^3. Über den ganzen Abbrand wurde eine hohe mittlere Staubkonzentration von 478 mg/m^3 ermittelt. Für die ersten 15 Min. beträgt die geschätzte Staubfracht 73%. Auch bei diesem Gerät werden bei optimiertem Betrieb deutlich tiefer Staubemissionen erzielt.

Anmerkung zum untersuchten Ofen-Typ: Beim vorliegenden Ofentyp handelt es sich um eine sogenannt „liegende" Version, d.h. der Feuerraum ist relativ niedrig. Dieser Ofentyp wird in der Schweiz häufig hergestellt.

Konventionell gemauertes, geschlossenes Cheminée (Anhang 8, 9)

1. Mess-Serie

Die mittleren Staubemissionen betrugen 122 mg/Nm^3. Vermutlich wurden diese durch den grösseren Luftüberschuss etwas erhöht. Nach 15 Min. waren 28% der gesamten Feinstaubfracht ausgestossen.

2. Mess-Serie

Die Vergleichsmessungen (Anhang 9) wurden ebenfalls mit traditionellen Anfeuermethoden, Anzünden vorne, unten (Durchbrand) und einer handvoll Anfeuerholz (Tanne 0.5x20cm) vorgenommen. In der Regel werden Cheminées mit zu grossen Füllmengen betrieben. Leider war es bei dieser Anlage nicht möglich eine grössere Holzmenge aufzulegen. Die Messungen wurden mit der gleichen Holzmenge durchgeführt, wie die Versuche mit dem Anfeuermodul (Anhang 8). Die Vergleichsmessungen mit unterem Abbrand ergaben mittlere Staubkonzentrationen von 219 mg/m^3 und sind um Faktor 1.8 höher als bei den Messungen mit oberem Abbrand und Anfeuermodul. Wir gehen davon aus, dass die Vorteile des oberen Abbrandes beim Cheminée bei grösseren Holzmengen noch mehr zum Tragen kommen. Dies müsste aber mit weiteren Messungen belegt werden. Diverse routinierte Cheminéebetreibern (auch offene Cheminées), sogar Barbecue-Wettkampf-Teilnehmer haben mit oberem Abbrand visuell eine geringere d.h. kürzere Rauchentwicklung bestätigt.

Speicherofen mit Heizeinsatz (Anhang 10)

1. Mess-Serie

Die mittleren Staubemissionen betrugen 167 mg/Nm^3. Das Zu- und Abschalten der Sekundärluft während dem Abbrand zeigte keine Wirkung. Die CO-Emissionen waren sehr hoch. Eine bedeutende Verbesserung der Verbrennungsqualität kann durch eine Änderung der Geometrie der Öffnung vom Feuerraum zur Ausbrandzone erreicht werden (homogenere Gasmischung). Die Feinstaubfracht nach 15 Min. betrug 42%.

2. Mess-Serie

Nachträglicher Hinweis zum Rauchbild: Obwohl bei dieser Anlage in der Anfahrphase CO-Konzentrationen über 20'000 mg/m_3 gemessen wurde, konnte an der Kaminmündung keine Rauch festgestellt werden. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass diese Anlage fast 30 Min mit hohem Luftüberschuss (16-20% O_2) gefahren wurde. Für die Praxis bedeutet dies, dass auch Anlagen ohne Rauch hohe CO-Emissionen aufweisen können.

Zentralheizungskochherd (Anhang 11)

1. Mess-Serie

Eine orientierende Voruntersuchung hatte mittlere CO-Emissionen von rund 20'000 mg/Nm^3 ergeben (0-15 Min.). Mit einem verbesserten Anfeuermodul wurden anschliessend die Staub-Messungen durchgeführt. Die CO-Emissionen konnten deutlich gesenkt werden (8'000 mg/Nm^3; 0-15 Min.). Die mittleren Staubemissionen betrugen 198 mg/Nm^3. Nach 15 Min. waren 39% der gesamten Staubfracht ausgestossen. Im Ausbrand sind die Frachten nochmals deutlich angestiegen.

5.2 Feuerungen mit Ventilator

Zentralheizungskessel mit unterem, seitlichem Abbrand (Anhang 12, 13, 14)

1. Mess-Serie

Die ersten Versuche an Zentralheizungskessel zeigten verschiedene Probleme auf. Durch den starken Zug des Ventilators wurde das Anfeuermodul (mit Zeitungslunte und einer Anfeuerhilfe) ausgelöscht. Für das Anzünden sollte die Ventilatorleistung reduziert werden. Der Neustart mit zwei Anzündhilfen war dann erfolgreich. Zudem hat sich herausgestellt, dass der Brennstoffstapel im Füllraum zu wenig stabil war. Durch die seitliche Neigung verklemmten sich die Scheiter und es trat Hohlbrand auf, der mit einem Eingriff von Hand (Schüren) aufgelöst wurde. Die mittleren Staubemissionen lagen bei 108 mg/Nm^3.

2. Mess-Serie

Im Rahmen der 2. Mess-Serie (Anhang 13 und 14) wurden bei diesem Gerät aus folgenden Gründen weitere Versuche gefahren: Der Betreiber will das Gerät mit Nadelholz betreiben. Das Gerät weist einen relativ schmalen Füllraum auf und ist aufgrund der damit verbunden Nachrutschproblematik mit Nadelholz schwierig zu beherrschen. Mit der weiterentwickelten Anfeuermethode (Anfeuermodul und erste Lage mit 2cm-dicken Buchenscheiter) wurde eine mittlere Staubkonzentration von 60 mg/m^3 erreicht (Anhang 14). Das Gerät wurde während 18 Min. mit gedrosselter Primärluft angefahren (Zukleben der Luftöffnungen mit Alu-Folie und allmähliches öffnen). Möglicherweise haben wir das Gerät etwas zu stark gedrosselt. Abgesehen von unbedeutenden Störungen (nach knapp 70 und nach 120 Min) ist es aber gelungen, Hohlbrände zu vermeiden. Auch unter den vorliegenden, schwierigen Bedingungen konnte das Gerät über Stunden im Bereich sehr tiefer CO- (< 500 mg/m3) und Staubemissionen (< 50mg/m3) betrieben werden.

Mit der Drosselung der Primärluft wollten wir das Potential dieser Anlagen für emissionsarmen Betrieb aufzeigen. Wie weit bestehende Anlagen entsprechend nachgerüstet werden können, ist noch offen. Die Betreiber und Hersteller fahren zur Zeit noch Versuche ohne Drosselung. Möglicherweise müssen dafür mehrere Anzündhilfen verwendet werden. Im Rahmen der Fertigstellung des Merkblattes sollten diese Fragen noch geklärt werden. Die Messungen gemäss Anhang 13 mussten wiederholt werden, weil wegen einem Anschlussfehler die CO/O_2-Messsonde während der 1. Viertelstunde nicht funktionierte. Die Resultate wurden nachträglich mit den O_2-Konzentrationen aus Anhang 14 ergänzt und erlauben eine Verifikation der Resultate aus Anhang 14.

Weil dieses Gerät mit einem Partikel-Filter ausgerüstet werden soll, wurden an zwei Mess-Stellen, gleichzeitig mit zwei Messgeräten die Staubkonzentrationen gemessen. Die erste Messstelle war im Rauchrohr direkt nach dem Kessel angeordnet. Die zweite Mess-Stelle befand sich in einer Putzöffnung des gemauerten Kamins (Distanz zwischen den Mess-Stellen ca. 6 m). An der zweiten Messstelle wurde eine mittlere Staubkonzentration von 22 mg/m^3 gemessen. Der mittlere Abscheidgrad des Kamins beträgt somit 58%. Die Anlage wurde letztmals im September 2006 vom Kaminfeger gereinigt. Die nächste Reinigung ist im September 2007 fällig.

Zentralheizungskessel mit unterem, seitlichem Abbrand (Anhang 15)

1. Mess-Serie

Für den zweiten Versuch an Zentralheizungskessel mit unterem, seitlichem Abbrand wurde ein verbesserter Anfeuermodul verwendet. Auf die kurzen Tannenscheiter wurde verzichtet. Stattdessen wurden zwei Scheiter über den ganzen Rost gelegt und der Brennstoff unmittelbar darauf aufgelegt (unten etwas dünnere Scheiter). Weil dieses Gerät nur mit Fichte befeuert wird, wurden die Messungen mit diesem Holzsortiment durchgeführt. Der Abbrand verlief problemlos und es waren keine Eingriffe von Hand erforderlich. Im Verlauf der Messung zeigten sich dann aber andere Probleme: knapp 30 Min. nach Start wurde der Ventilator ständig auf- und abgefahren. Es wurde ein Schaltfenster an der vom Kessel angezeigten Abgastemperatur von 200-210°C beobachtet. Dieser Betrieb verursachte erhöhte Feinstaubemissionen im Vergleich zur nachfolgenden stabilen Abbrandphase. Es handelt sich dabei um ein regeltechnisches Problem, welches herstellerseitig gelöst werden muss. Nach einer Betriebszeit von ca. 105 Min. wurde zudem der Ventilator durch eine gestörte Wärmeabgabe des Kessel abgeschaltet. Auch diese Betriebsphase verursachte erhöhten Feinstaub. Nachdem der Wassererwärmer ausser Betrieb genommen wurde, war das Problem behoben. Trotz diesen Problemen waren die mittleren Staubemissionen relativ niedrig und wurden ohne Schüren erreicht (55 mg/Nm^3). Der Anteil am Gesamtstaub während den ersten 15 Min. betrug 44%.

Die ungünstige hydraulische Einbindung der Anlage stellt erhöhte Anforderungen an den Betreiber. Dieser wurde entsprechend instruiert.

Zentralheizungskessel mit hinterem, stirnseitigem Abbrand (Anhang 16, 17)

1. Mess-Serie

Auch bei diesem Kessel wurden die Anzündhilfen mit Zeitungslunten ausgeblasen. Es mussten weitere Anzündhilfen nachgelegt werden. Der instabile Verlauf des Abbrandes wurde verstärkt, da die zwei Anfeuermodule (welche aus unser Sicht notwendig waren für den breiten Füllraum) unterschiedlich abbrannten. In der Folge musste mehrmals geschürt werden. Auch bei diesem Gerät ist die Ventilatorleistung für einen staubarmen Start zu hoch. Kurz nach dem Start war zudem ein weiteres Problem aufgetreten: Die Drehzahl des Abgasventilators wurde ständig zwischen 20-80% Kesselleistung verändert. Weil die Rauchgaszüge am Vortag vom Kaminfeger gereinigt wurden, ist eine Begrenzung der Abgastemperatur durch die Regelung der Drehzahl des Abgasventilators wenig wahrscheinlich.

Bei 20% Kesselleistung wurden zudem Schwelgasstösse durch eine Öffnung der unteren Kesseltüre in den Heizungsraum beobachtet. Vermutlich ist der Luftvolumenstrom des Verbrennungsluftventilators zu hoch. Trotz der aufgetretenen Probleme war die mittlere Staub-Konzentration relativ niedrig (45 mg/Nm^3), ohne Schüren wären die gemessenen Konzentrationen aber deutlich höher ausgefallen. In den ersten 15 Min. wurden 37% der Feinstäube emittiert.

2. Mess-Serie

Nach intensiven Diskussionen mit dem Hersteller wurden im Rahmen der 2. Mess-Serie im Werk Messungen an einer neuen Anlage (mit Lambda-Sonde) mit einem verbesserten Anfeuermodul gefahren (Anhang 17). Vorgängig hatte der Betreiber mehre CO-Messungen mit Kaltstart durchgeführt. Ab Start wurden die Luftansaugöffnungen während 12 Min reduziert (Abdecken mit Alu-Folie). Die mittlere Staubkonzentration betrug 65 mg/m^3 (bei ca 85% der max. Füllmenge). Nach 27 Min. war am Kamin kein Rauch mehr sichtbar. Mit voller Füllung könnten die mittleren Staubkonzentrationen vermutlich weiter reduziert werden (Verlängerung der stabilen Verbrennungsphase). Auf Wunsch des Herstellers wurden die Messungen nach dem Nachlegen weitergeführt. Beim Öffnen der Fülltüre wurde nur noch eine kleine Restglut über einem Teil des Rostes festgestellt. Nach dem Schüren der Glut in den Bereich der Ausbrandöffnung wurden 20 kg Holz nachgelegt. Erstaunlicherweise war bereits 4 Min nach dem Nachlegen kein Rauch mehr feststellbar. Diese Betriebsweise, welche gemäss heutigen Prüfnormen von Prüfinstituten angewendet wird, führt zu vergleichsweise sehr tiefen Staubemissionen und wiederspiegelt nicht die tatsächlichen Emissionen von Holzfeuerungen in der Praxis. Der Hersteller wird weitere CO-Messungen vornehmen, mit dem Ziel die stabile Ausbrandphase (CO < 500 mg/m3) so früh wie möglich zu erreichen. Die Auswirkungen auf die Staubemissionen müssten mit Messungen nachgewiesen werden.

Zentralheizungskessel mit Sturzbrand (Anhang 18, 19)

1. Mess-Serie

Der Abbrand mit Anfeuermodul verlief unkontrolliert und instabil. Mehrmals musste geschürt werden. Der Betreiber hat eine eigene Methode entwickelt: Er legt Papierknäuel direkt auf die Holzkohle vom Vortag und schichtet das Brennholz darüber auf (ohne Anfeuerholz). Die mittlere Feinstaubkonzentration betrug 267 mg/Nm^3. Dabei wurden 57% der Feinstäube in den ersten 15 Min. ausgestossen.

2. Mess-Serie

Weil die bisherigen Messungen noch nicht zufrieden stellend verlaufen sind, wurden im Rahmen der 2. Mess-Serie weitere Versuche unternommen. Die erste Messung (Anhang 19) war nicht zufriedenstellend. Vermuteter Grund: Weil die Speicherladung regelungstechnisch unterbunden wurde, wurde die Luftzufuhr gedrosselt. Leider zeigte eine Wiederholung der Messung mit erhöhter Soll-Temperatur für die Speicherladung, dass die Probleme anderweitig zu suchen waren. Nach intensiven Gesprächen mit dem Betreiber stellte sich heraus, dass im hinteren Brennraum immer wieder Verpechungen bis ca. 10 cm hoch und bis 2 cm dick auftreten. Gemäss Rücksprache mit dem Hersteller sind solche Probleme schon verschiedentlich aufgetreten und auf einen teilweisen Verschluss der hinteren Primär-Lufteintrittdüsen zurückzuführen. Der Abbrand erfolgt somit vermutlich nur im vorderen Teil korrekt.

Die Messung hat für die ersten beiden Staubhülsen (31 und 41) erstaunlich tiefe mittlere Staubkonzentrationen ergeben. Nach ca. 60 Min. führte der Luftmangel im hinteren Teil des Brennraumes zu erheblichen Störungen. Wir gehen davon aus, dass durch die Beschränkung des Abbrandes auf den vorderen Teil des Brennraumes ein Kippen des Holzstapels nach vorne ausgelöst wurde. Beim Schüren konnte auch festgestellt werden, dass die Glut im hintern Rostteil ausgebrannt war. Bei einer korrekten Arbeitsweise des Gerätes können vermutlich tiefe Staubkonzentrationen erreicht werden. Der Betreiber hat nachträglich auch tatsächlich eine Verkrustung der hinteren Lufteintritte festgestellt. Leider ist mit den Original-Reinigungswerkzeugen keine einwandfreie Reinigung möglich. Zudem ist auch nicht klar, ob diese Reinigung in der Verantwortung des Betreibers oder des Kaminfegers liegt. Der Betreiber wird die Ablagerungen weiter im Auge behalten. Trotz der aufgetretenen Probleme sind die mittleren Staubkonzentrationen über den ganzen Abbrand nicht übermässig hoch (198 mg/m^3).

Weil bei diesem Gerät ebenfalls der Einbau eines Partikelfilters geplant ist, wurden gleichzeitig zwei Staubmessungen vorgenommen. Die erste Mess-Stelle nach dem Kessel wurde freundlicher Weise vom Betreiber aus der Störzone (Krümmung) nach hinten versetzt. Die zweite Mess-Stelle wurde in der nachgelagerten Putzöffnung des Stahlkamins (Distanz zwischen den Mess-Stellen ca. 4.5 m) angeordnet. Der mittlere Abscheidegrad des Stahlkamins beträgt 9% und liegt im Bereich der Messgenauigkeit des Staubmess-Gerätes. Die Anlage wurde letztmals Anfangs Heizsaison 06/07 vom Kaminfeger gereinigt. Die nächste Reinigung ist Anfang Heizsaison 07/08 fällig.

Beobachtungen zur Schwadenbildung (Dampf-Fahne): Im Rahmen einer vorausgehenden CO-Messung bei einer Luftfeuchtigkeit in der Umgebungsluft von 75% (Gewitter am Vorabend) und Umgebungs-Temperaturen von 20°C wurde bei tiefen CO-Konzentrationen unter 1'000 mg/m^3 eine deutliche Dampffahne beobachtet. Bei den Messungen gemäss Anhang 19 war die Luftfeuchtigkeit deutlich tiefer (52%) und es wurde keine Schwadenbildung beobachtet. Neben der Abgastemperatur an der Kaminmündung, des Luftüberschusses und der Umgebungstemperatur hängt die Schwadenbildung somit in entscheidendem Masse von der Feuchtigkeit der Umgebungsluft ab.

6. Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

6.1 Generelle Ergänzungen zur 2. Mess-Serie

Mit den vorliegenden Untersuchungen sollen erste Impulse in Richtung verbesserter Anfeuermethoden vermittelt werden. Dies umso mehr, als alle heutigen Prüfverfahren das Anfeuern mit Kaltstart nicht berücksichtigen und Herstellungsfirmen ihre Bemühungen für die Weiterentwicklung von Holzfeuerungen vorallem auf die Ergebnisse von Prüfstandmessungen ausrichten. Die vorliegenden Resultate sind aus unserer Sicht aufschlussreich und plausibel. Weil jeder Abbrand bei den Stückholzfeuerungen in einer gewissen Bandbreiten streuen kann, sind aber weitere Messungen und eine statistische Auswertung erforderlich.

Wichtigste Voraussetzung für einen emissionsarmen Abbrand ist ein gut ausgebildetes Glutbett, durch welches die entstehenden Holzgase passieren und sich dabei gut erhitzen. Für eine staubarme Verbrennung ist ein moderater d.h. nicht zu schneller, kontinuierlicher Anstieg der CO2-Konzentrationen und Abgastemperaturen anzustreben. Die frühere Zielsetzung, möglichst schnell hohe Temperaturen zu erreichen, führt schnell zu tiefen CO-Konzentrationen, gleichzeitig können aber die Staubemissionen übermässig anwachsen. Vorallem beim unteren Abbrand (Kessel) ist es wichtig, dass sich das Feuer zu Beginn auf der ganzen Rostfläche ausbreiten kann. Damit können Hohlbrände über den gesamten Abbrand verhindert werden. Erreicht wird dies durch die geeignete Anordnung des Anfeuermoduls und durch moderates Anfeuern. Der Anfeuermodul gewährleistet ausserdem schnellverfügbare Startenergie in ausreichender Menge. Daher muss dazu trockenes Nadelholz verwendet werden. Der Anfeuermodul wird in umittelbarer Nähe zur Ausbrandzone platziert.

Aus Komfortgründen beim Anzünden (Erreichbarkeit mit Feuerzeug) kann der Anfeuermodul auch etwas nach vorne geschoben werden. Damit über den ganzen Abbrand tiefe Staubkonzentrationen erreicht werden können, muss die Bildung von Hohlbrand verhindert werden. Besonders beim unteren Abbrand, bei engen Füllräumen und mit Nadelholz kann dies eine grosse Herausforderung darstellen. Bei einseitigem Abbrand kippt der Holzstapel im Füllraum und das Nachrutschen wird erschwert. Die Bildung von Hohlbrand provoziert grosse CO-Schwankungen und hohe Staubemissionen. Diese Gefahr besteht beim oberen Abbrand viel weniger, weil die Statik des Holzstapels durch das Abbrennen von oben nicht beeinträchtigt wird. Die Holzgase müssen zudem beim Start nicht den noch kühlen Holzstapel in seiner ganzen Höhe passieren und werden daher nicht ausgekühlt. Es entsteht somit generell weniger Rauch als beim Durchbrand von unten.

6.2 Feuerungen mit Naturzug (ohne Ventilator)

Vollzug LRV und Betreiber

Im Rahmen des LRV-Vollzuges und im Hinblick auf den staubarmen Betrieb der Feuerungen empfehlen wir folgende Schwerpunkte:

1-. Mess-Serie

- Anfeuern mit Anfeuermodul
- Konsequente Umsetzung der seinerzeitigen BUWAL-Empfehlung für Kaminanlagen (Kamin über First).
- In modernen, dichten Gebäuden sind den Betreibern die minimalen Bedingungen für eine ausreichende Frischluftzufuhr aufzuzeigen.
- Zimmeröfen und Cheminée in welchen mehr als ½ Ster verbrannt wird, sollten jährlich gereinigt werden.
- Im Hinblick auf die Merkblätter, welche für die nächste Heizsaison zur Verfügung gestellt werden sollen, sind keine weiteren Untersuchungen mehr erforderlich. Anhand von zusätzlichen Vergleichsmessungen mit herkömmlichen Anfeuermethoden soll aber die Wirksamkeit der vorliegenden Empfehlungen bestätigt werden.
- Die Einführung einer Abnahme-Kontrollen für alle Holzfeuerungen mit Messung von CO und Staub über den ganzen Abbrand ist zu prüfen. Mit Kurzmessungen während der stabilen Abbrandphase (gemäss den heutigen Messempfehlungen: 3x 15 Min.) werden Holzfeuerungen nur ungenügend erfasst.
- Im Rahmen der wiederkehrenden Kontrolle von kleinen Stückholzfeuerungen ist eine einfache Sichtkontrolle am Kamin nach 15 Min. zu prüfen.
- Prüfnormen sollten so geändert werden, dass die Anfeuerphase ebenfalls erfasst wird.

2. Mess-Serie

- *Bei Cheminées sind zusätzliche Vergleichsmessungen mit traditionellen Anfeuermethoden (Durchbrand) bei höheren Füllmengen wünschenswert.*

- *Angesichts der grossen Vielfalt bei den Cheminéeöfen und Cheminée-Einsätzen wären weitere Versuche mit oberem Abbrand und Anfeuermodul von Vorteil, insbesondere auch bei Geräten mit gesteuerter Luftzufuhr.*

Hersteller

Bei der Weiterentwicklung der Geräte durch die Hersteller sollten folgende Probleme angegangen werden:

- Die minimalen Zugsbedingungen sind für jedes Gerät zu definieren. Die Anfeuermethoden und die Anforderungen an den Brennstoff (Stückigkeit, max. Füllmenge etc.) im Hinblick auf minimale Emissionen sind dabei zu berücksichtigen.

- In den Betriebsanleitungen sind die Anfeuermethoden und die Anforderungen an den Brennstoff klar und gut illustiert zu beschreiben. Ausserdem sind auch die minimalen Bedingungen für eine auseichende Frischluftzufuhr aufzuzeigen.

Forschung

Im Bereich der Forschung sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Einfluss der meteorologischen Parameter (Temperatur, Luftdruck, Inversionslagen etc.) auf den Kaminzug.

- Einfluss der Reinigung auf den Kaminzug

- Vorteile des oberen Abbrandes im Vergleich mit anderen Abbrandmethoden zur Erreichung einer emissionsarmen Holzverbrennung.

- Systematische Untersuchung des moderaten Anfeuerns bei stetig-stabilem Abbrand für die staubarme Verbrennung von Stückholz.
- Untersuchung der Schwadenbildung bezüglich folgender Parameter: Brennstoff-Feuchte, Luftüberschuss, Abgastemperatur an der Kaminmündung, Aussentemperatur und Luftfeuchtigkeit.
- Untersuchungen zur Überprüfung der Genauigkeit von Staubfrachten und Staubkonzentrationen mit den eingesetzten Messverfahren.

6.3 Feuerungen mit Ventilator

Vollzug LRV und Betreiber

Im Rahmen des LRV-Vollzuges und im Hinblick auf den Betrieb der Anlagen empfehlen wir folgende Schwerpunkte:

1-. Mess-Serie

- Kessel mit unterem, seitlichem Abbrand: Die verbesserte Anfeuermethode sollte nochmals getestet werden. Bei erfolgreichem Abschluss der Messungen wird diese Methode empfohlen.
- Kessel mit hinterem, stirnseitigem Abbrand: Es werden noch maximal zwei Versuchs-messungen durchgeführt. Den Herstellern werden Empfehlungen für Verbesserungen der Geräte und Anfeuermethoden vorgeschlagen.
- Kessel mit Sturzbrand: Es werden noch zwei weitere Versuche vorgenommen. Zuerst mit der vom Betreiber vorgeschlagenen Methode und danach allenfalls noch eine weiterentwickelte Methode.
- Prüfnormen sollten so geändert werden, dass die Anfeuerphase ebenfalls erfasst wird.

2. Mess-Serie

- *Bei den Kesseln mit Sturzbrand sind weitere Messungen erforderlich.*
- *Typenprüfungen und Qualitätssiegel von Holzfeuerungen basieren heute auf Prüfnormen, welche auf einer Betriebsweise mit Nachlegen (Warmstart) basieren. Damit die Bedeutung dieser Betriebsweise für die tatsächlichen Emissionen nachgewiesen werden kann, sind weitere Messungen mit Nachlegen sinnvoll.*

Hersteller

Bei der Weiterentwicklung der Geräte durch die Hersteller sollten folgende Probleme angegangen werden:

- Für die Regelung der Abgasventilator-Drehzahl sollten im Hinblick auf staubarme Verbrennung entsprechende Anfahrprogramme entwickelt werden.
- In den Betriebsanleitungen sind die Anfeuermethoden und die Anforderungen an den Brennstoff klar und gut illustiert zu beschreiben.

Forschung

Im Bereich der Forschung sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Vorteile des oberen Abbrandes im Vergleich mit anderen Abbrandmethoden zur Erreichung einer emissionsarmen Holzverbrennung.
- Systematische Untersuchung des moderaten Anfeuerns bei stetig-stabilem Abbrand für die staubarme Verbrennung von Stückholz.
- Untersuchung der Schwadenbildung bezüglich folgender Parameter: Brennstoff-Feuchte, Luftüberschuss, Abgastemperatur an der Kaminmündung, Aussentemperatur und Luftfeuchtigkeit.
- Untersuchungen zur Überprüfung der Genauigkeit von Staubfrachten und Staubkonzentrationen mit den eingesetzten Messverfahren.