



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht April 2010

BUONDI

Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Salerno Engeler GmbH
Schwengiweg 12
CH-4438 Langenbruck
www.sesolar.ch

Ardens GmbH
Munzachstrasse 38
CH-4410 Liestal

Lopper Kesselbau AG
Seestrasse 5
CH- 6374 Buochs
www.lopper.ch

Autor:

Basso Salerno, Salerno Engeler GmbH, basso.salerno@sesolar.ch

Projekt-Begleitung:

Andres Jenni, Ardens GmbH
Diether Schlottman, Lopper Kesselbau AG

BFE-Bereichsleiterin: Sandra Hermle

BFE-Programmleiter: Daniel Binggeli

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 102525/153220

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1. Ausgangslage	6
2. Ziel	6
3. Lösungsansatz	6
3.1. Anfeuerungsprozedur	6
3.2. Geometrie	7
3.3. Steuerung	9
4. Vorgehen	9
5. Resultate Messreihe 1	10
5.1. Geometrie	10
5.2. Anfeuerprozedur	10
6. Resultate Messreihe 2	11
6.1. Kohlenmonoxid	12
6.2. Staub	15
6.3. Weitere Bemerkungen	15
7. Schlussfolgerungen	16
7.1. Geometrie	16
7.2. Anfeuerprozedur	16
7.3. Steuerung	17
8. Ausblick	17
8.1. Technische Umsetzung	18
8.2. Anfeuerprozedur und Information	18
8.3. Normwesen	18
9. Referenzen	20
Anhang	21
Abgasanalyse	21
Staubmessung	22

Zusammenfassung

Ziel des Projektes BUONDI ist, eine emissionsarme Startphase bei Stückholzkesseln zu erreichen. Der Grenzwert in den ersten 30 Minuten wurde für Kohlenmonoxid auf 4'000 mg/nm³, für Staub auf 100 mg/nm³ gesetzt.

Grundsatz ist die langsame Entwicklung aber rasche Ausbreitung des Feuers auf dem ganzen Rost. Diese reduzieren stark den Schadstoffausstoss in der Startphase und garantieren die Formation eines stabilen Glutbetts, welche die Voraussetzung für eine emissionsarme Betriebsphase bildet. Dies wird mit einer neuen Geometrie des Rostes, der Anpassung von Primär- und Sekundärluftzufuhr sowie einer einfachen Bedienungsprozedur erreicht. Geprüft wird auch die automatische Zündung des Brennstoffes.

Im Jahr 2008 wurde der Prototyp-Kessel geplant, gebaut und im Werk der Fa. Lopper AG getestet und optimiert. Im Jahr 2009 erfolgte die Installation in einem 2-Familienhaus in Waldenburg (BL). An diesem 35kW-Kessel mit unterem seitlichem Abbrand wurden im effektiven Betrieb insgesamt 53 Messungen der Startphase durchgeführt.

Der Mittelwert des Kohlenmonoxids in den ersten 30 Minuten beträgt 2'500 mg/nm³ (80% der Messungen unter 4'000, 50% unter 2'000 mg/nm³), der Mittelwert der Staubmessungen beträgt 117 mg/nm³ (50 bis 220 mg/nm³). Die Werte sind auf 13 VOL% Sauerstoff bezogen.

Die Resultate lassen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Die gesetzten Ziele sind für den Kohlenmonoxid-Ausstoss in Betrachtung des Gesamtmittelwertes aller Versuche erreicht, jene für Staub knapp verfehlt.
- Die guten Resultate sind auf die Abstimmung von Brennraumgeometrie, Anfeuerprozedur und Steuerung zurückzuführen.
- Grosses Verbesserungspotential liegt bei der Optimierung der Steuerung.
- Die Zündung mit einem Heissluftgebläse ist möglich, muss aber weiter optimiert werden.
- Die Wiederholbarkeit der Messungen im wissenschaftlichen Sinn ist in der Startphase noch nicht erreicht, jedoch ist die Einhaltung des gestellten Grenzwertes bereits möglich.

Ausblick auf weitere Schritte und Massnahmen:

- Umsetzung in die Praxis der aktuellen Lösung mit nachfolgender Erfolgskontrolle
- Analyse und Lösungssuche für andere Kesselgeometrien
- Standardisierung von Anfeuerprozeduren
- Sensibilisierung von BetreiberInnen und HerstellerInnen auf die Anfeuerproblematik

Die Einbindung der Startphase in das Prüfverfahren ist wünschenswert, dies würde die Hersteller motivieren, das Anfeuern besser in den Griff zu bekommen. Die Resultate des Projektes Buondi zeigen, dass die Einhaltung bestimmter Grenzwerte bereits möglich ist. Jedoch sind die generellen Erkenntnisse über die Startphase im Moment aber noch unzureichend, um sie bereits in einen Entwurf zur Ergänzung des Prüfverfahrens einfließen zu lassen.

1. Ausgangslage

In den letzten Jahren wurden bedeutende Verbesserungen in der Verbrennungstechnik der Stückholzkessel erreicht. Der Schadstoffausstoss wurde in der Betriebsphase massiv gesenkt. Die Kesselhersteller haben so auf die verschärften Emissionsgrenzwerte und dessen Prüfkriterien reagiert. Nur wenige Verbesserungen wurden in der Anfeuerphase erzielt (auch weil diese gesetzlich keine Einschränkungen hat). Eine neue Studie (Emissionsarme Anfeuermethode für Stückholzfeuerung, /1/) mit systematischen Messungen an Stückholzkessel (Kleinleistungsbereich 20-50 kW) zeigt während der Anfeuerphase ein bedenkliches Emissionsbild: beinahe 70 bis 90% der Schadstoffe werden in den ersten Minuten eines Abbrands ausgestossen.

2. Ziel

Ziel des Projektes ist es, ein Prototyp zu realisieren und in der Praxis zu testen, welcher ein einwandfreies emissionsarmes Anfeuern aufweist und so die Voraussetzung für eine optimale folgende Betriebsphase schafft. Die vorgesehenen Massnahmen sollen auf der ganzen Rostfläche ein stabiles Glutbett aufbauen, sowie die Bedienungsfreundlichkeit des Anfeuerns verbessern. Die Umsetzung der Massnahmen soll für Hersteller und Betreiber wirtschaftlich tragbar sein.

Zielwerte im Mittel der ersten 30 Minuten eines Abbrandes:

Kohlenmonoxid	4'000	mg/nm ³
Staub	100	mg/nm ³

Der Prototyp basiert auf einem bestehenden Stückholzkessel (35 kW) der Firma Lopper Kesselbau AG, an welchem aufgrund der heutigen Erfahrung konstruktive Änderungen durchgeführt wurden. Dieser Kessel wurde im Werk und in der Praxis getestet.

3. Lösungsansatz

Die Grundidee basiert auf neusten Erfahrungen, die im Bericht /1/ dargestellt sind.

Grundsatz Die langsame Entwicklung und Ausbreitung des Feuers auf dem ganzen Rost reduziert stark den Schadstoffausstoss in der Startphase und garantiert die Formation eines stabilen Glutbetts, was Voraussetzung für eine emissionsarme Betriebsphase ist.

Die Ausbreitung des Feuers ist von der Anfeuerungsprozedur, der Geometrie des Brennraums und des Rostes abhängig. Ebenso ist diese abhängig von der Dosierung und Lenkung der Primär- und Sekundärluft, welche durch die Steuerung des Abgasventilators und der Primär- und Sekundärluftschieber definiert wird.

3.1. Anfeuerungsprozedur

Die Anfeuerungsprozedur hat einen grossen Einfluss auf das Schadstoffbild der Startphase. Hier ist der Einfluss des Betreibers sehr gross. Die Anfeuerungsprozedur definiert welches Material für die Zündung verwendet wird und wie dieses im Brennraum angeordnet wird. In der Regel besteht das Material aus einer Anfeuerhilfe und Anfeuerholz. Die Anfeuerhilfe ist leicht brennbar und von kleiner Dimension (Max L=100 mm B=30 mm), welche angezündet für einige Minuten selbständig weiterbrennt. Auf dem Markt sind verschiedene Produkte erhältlich. In der Messreihe 1 haben wir Paraffinwürfel (Abb 1) und in den Feldmessungen imprägnierte Holzwolle (Abb 2) verwendet. Einige Tests wurden, um die Möglichkeit einer automatischen Zündung zu evaluieren, mit einem Heissluftgebläse ohne Anfeuerhilfe durchgeführt.



Abb 1 Anfeuerhilfe: Paraffinwürfel

Das in den Feldmessungen verwendete Anfeuerholz ist klein gespaltenes Nadelholz, mit einer Länge von ca. 20 cm und einem durchschnittlichen Umfang von 15 - 20 cm (Abb 2).

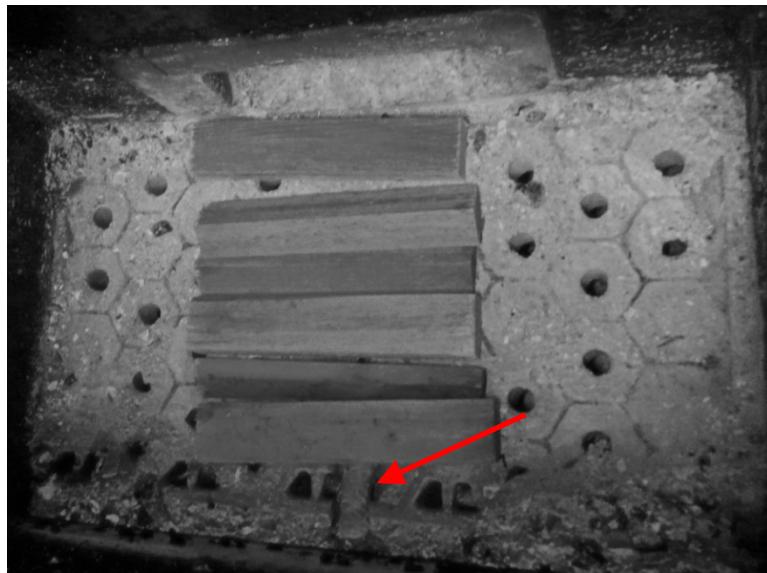


Abb 2 Holzwolle als Anfeuerhilfe (unten im Bild) und Anfeuerholz

Die Menge des Anfeuerholzes beträgt 600-1000 Gramm. Wie die Anfeuerhilfe und das Anfeuerholz im Brennraum liegen hängt von seiner Geometrie ab. Bei den Feldmessungen wurde das Anfeuerholz quer zum Brennraumaustritt (Übergang zur Nachbrennkammer) eingelegt, die Anfeuerhilfe in der vorgesehenen Wanne (Siehe 3.2).

Die Anordnung und Position von Anfeuerholz und -hilfe spielt eine grosse Rolle.

Je einfacher, schneller und kostengünstiger eine Anfeuerprozedur ist, desto höher ist die Chance, dass diese zum Einsatz kommt.

3.2. Geometrie

Die Geometrie von Rost und Brennraum muss

- die Verteilung der Luftzufuhr garantieren, so dass sich das Feuer regelmässig und vollständig auf den ganzen Rost ausbreiten kann.
- alle mögliche durch das Beladen oder Rutschen der Holzscheiter verursachten Verstopfungen und Sperrungen der Luftzufuhr verhindern.
- verhindern, dass keine grössere Hohlräume im Glutbettbereich entstehen können (Hohlbrand).

Weiter kann die Geometrie dazu beitragen, dass die Lage der Anfeuerhilfe und des Anfeuerholzes einfach und eindeutig vorgegeben ist.

Die in diesem Projekt entstandenen Massnahmen und Ideen, die diesem Grundsatz entsprechen, sind:

- der geneigte Rost
- die Anfeuerwanne
- der schräge Brennraumaustritt
- die Freihaltehaken

Der Rost (Abb 3) ist 3° zur Mitte hin geneigt und hat 40 Löcher mit Durchmesser 15 mm. Die Verbrennungsluft (in der Startphase als Primär-, Sekundärluft) und dann das Feuer können sich so leicht auf die ganze Rostfläche verteilen.

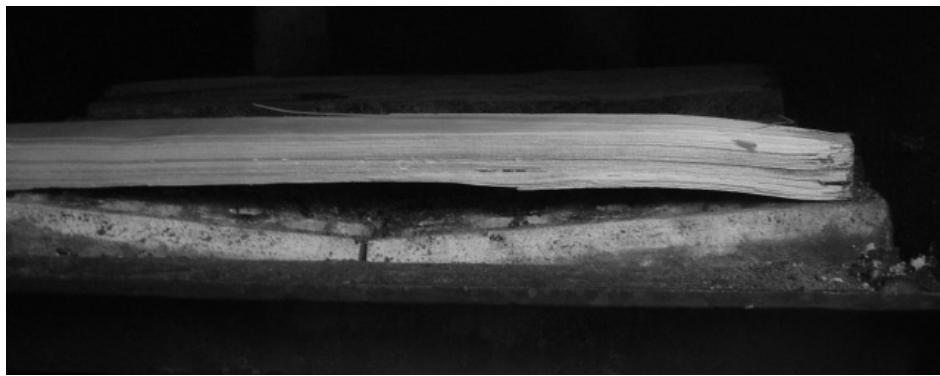


Abb 3 der Rost hat eine Neigung vom Rand zur Mitte

Die Anfeuerwanne (Abb 4) ist als Kanal von 30x30 mm in der Mitte des Rostes ausgebildet, wo die Anfeuerhilfe angezündet und noch nach der Beladung des Brennholzes eingeschoben werden kann.



Abb 4 die Anfeuerwanne. Die Anfeuerhilfe brennt

Der schräge Brennraumaustritt (Abb 5) garantiert zusammen mit dem geneigten Rost, dass die Öffnung zur Ausbrandzone nicht von einem Holzscheit verschlossen werden kann.



Abb 5 Der untere Teil des Austritts ist schräg

Die Freihaltehaken (Abb 6) garantieren, dass Holzscheiter die Luftzufuhr vorne beim Rost nicht behindern.

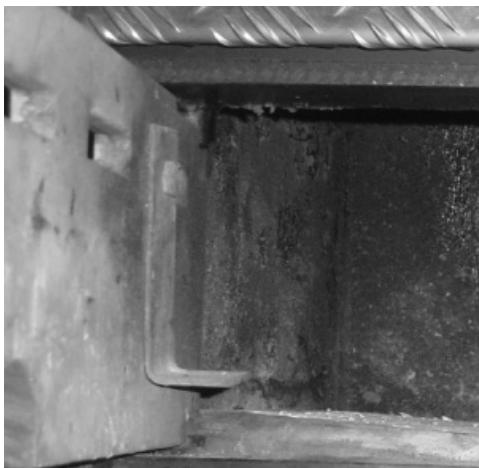


Abb 6 Der Freihaltehaken

Eine weitere Eigenschaft des Rostes ist seine Formstabilität. Die Form und Position im Kessel muss mindestens für eine Heizsaison (oder zwischen 2 Service-Kontrollen) konstant bleiben.

3.3. Steuerung

Die Steuerung reguliert unter anderem mit dem Abgasventilator die Verbrennungsluftmenge und mit Schiebern oder Klappen das Primär- und Sekundärluftverhältnis. Die Logik der vorhandenen Steuerung wurde mit der Drehzahlregulierung des Ventilators, sowie mit neuen für die Startphase nützlichen Parametern (zusätzliche Zeitparameter in der Startphase) ergänzt. Die neue Steuerung wurde in aktueller Programmiersprache geschrieben und nutzt neueste Hardware-Komponenten.

4. Vorgehen

Das Projekt wurde in 3 Phasen durchgeführt:

Planung	Apr/Mai08	Planung und Realisierung des Prototypkessels Festlegung der Anfeuerprozedur und des Messprogramms
Messreihe1	Mai/Okt 08	Überprüfung und Optimierung der gewählten Lösungen Durchführung von neuen, weiteren Massnahmen Tests, welche im Werk der Fa. Lopper Kesselbau AG in Deutschland durchgeführt wurden. Diese Messreihe lieferte weitere Inputs für die Programmierung der neuen Steuerung.
Messreihe2	Nov09/März10	Optimierung der neuen Steuerung mit praxisnahen und statistisch relevanten Feldmessungen Der Kessel ist Teil einer Anlage mit einem 6000-Liter-Wasserspeicher und 34m ² -Solarkollektorfeld. Diese befindet sich in einem Zweifamilienhaus in Waldenburg (BL).

Der für die Feldmessungen verwendete Kessel, ist ein Lopper-Drummer35 für ½ Meter Später mit einer Leistung von 35 kW.

5. Resultate Messreihe 1

Die Messreihe 1 diente dazu, die geplanten Massnahmen und Anfeuerprozedur zu überprüfen und zu verfeinern. Die insgesamt 19 durchgeführten Tests zeigen nur Tendenzen und haben keine statistische Bedeutung. Während zwei Wochen mit 2 bis 3 Starts täglich wurden diverse Anfeuerprozeduren erprobt, geometrische Änderungen vorgenommen und getestet. Die Idee von diversen geometrischen Änderungen (Brennraumaustritt, Freihaltehaken und Anfeuerwanne) sind durch Beobachtungen in dieser Messreihe entstanden.

Die Ventilatordrehzahl sowie die Primär- und Sekundärluftklappe wurden „von Hand“ mit entsprechenden Potentiometern gesteuert.

Die Erkenntnisse und Feststellungen der im Mai und Oktober durchgeführten Testreihen können wie folgt zusammengefasst werden.

5.1. Geometrie

Der geneigte Rost	Eine Neigung des Rostes wirkt sich positiv auf die Ausbreitung des Feuers über der gesamten Fläche aus. Das gilt aber nur für Neigungen bis zu max. 3°. Zu grosse Winkel (Tests bis zu 8° Neigung wurden durchgeführt) wirken sich hingegen negativ auf die Verbrennung aus, es entsteht ein zu grosser Luftüberschuss mit erhöhter Tendenz zu Hohlbrandbildung.
Brennraumaustritt	Nach der durchgeführten geometrischen Änderung (Abschrägung) wurden keine Verstopfungen mehr festgestellt.
Freihaltehaken	Ebenso konnte mit dem Anbringen der Freihaltehaken kein Hohlbrand mehr beobachtet werden.
Anfeuerhilfe-Wanne	Diese wirkt sich nicht direkt auf die Emissionen aus. Aber durch die einwandfrei definierte Position der Anfeuerhilfe hat die Luftzufuhrgeometrie (Position und Grösse der Löcher oder Schlitze) die optimale Wirkung auf die Startphase.
Luftzufuhrgeometrie	Eine ungleichmässige Luftzufuhr durch den Rost kann die Ursache von Hohlbränden sein. So sollte in der Rostmitte die Luftzufuhr reduziert werden. Hohlbrände entstehen, wenn das Brennholz nicht regelmässig auf der ganzen Rostfläche verbrennen kann. Der mittlere Bereich brennt in der Regel schneller, das Holz stützt sich auf dem seitlichen Bereich und rutscht nicht nach unten. Es entsteht Hohlbrand. Im Abgas ist ein Hohlbrand zu erkennen, wenn bei einem CO ₂ -Gehalt von 6 bis 10%, ein höherer CO-Gehalt (> 10'000 ppm) gemessen wird, obwohl die Temperatur in der Ausbrennkammer genügend hoch wäre für eine vollständige Verbrennung. Die Steuerung (auch mit Lambda-Sonde) ist mit diesen Rahmenbedingungen überfordert. In der Regel kann Hohlbrand nur mit einem externen mechanischen Zugriff unterbrochen werden.

5.2. Anfeuerprozedur

Die Anfeuerprozedur, die schlussendlich in der Messreihe 2 verwendet wurde, ist wie folgt:

- Anfeuerholz (Nadelholz Länge 20 cm, durchschnittlicher Umfang 20 cm) in die Mitte des Rostes hinlegen (Abb 2), so dass die Anfeuerwanne zugedeckt ist.
- Brennholz (Laubholz), wenn möglich kleinere Scheiter zuerst, hinlegen.
- Anfeuerhilfe in die Anfeuerwanne legen, anzünden und in die Mitte des Rostes schieben
- Untere Türe schliessen

Grundsätzlich wurde Nadelholz als Anfeuerholz verwendet. Tests wurden aber auch mit Laubholz mit einer Länge von 50 cm und mittlere Umfang von 20 cm, im Sinne einer Vereinfachung der Anfeuerprozedur (kein kleines Nadelholz notwendig) durchgeführt. Tendenziell wurden vielversprechende Abgaswerte erreicht. Diese Lösung wurde aber mit einer niederen Priorität eingestuft.

Die Zündung beim Anfeuern mittels eines Heissluft-Gebläses (Abb 7 und Abb 8) wurde auch getestet. Die ersten Messungen zeigen, dass sie funktioniert und Abgaswerte unter dem gesetzten Ziel erreichbar sind.

Auch diese Anfeuervariante hat als Ziel die Vereinfachung der Anfeuerprozedur, mit dem Zusatzvorteil einer zeitprogrammgesteuerten automatischen Zündung. Die Versuche wurden mit der gleichen Anfeuerholz-Einlage gefahren wie jene mit Holzwolle als Anfeuerhilfe.



Abb 7 Heissluftgebläse



Abb 8 Spitze des Heissluftgebläses

Neben dem Zünden mit Anfeuerhilfe wurde auch die Zündung mit einem Heissluft-Gebläse getestet. Die Tests zeigen, dass es machbar ist, wobei die Betriebsparameter (Luftmenge und Dauer) zu optimieren sind.

6. Resultate Messreihe 2

Im Oktober 2009 wurde die neue Steuerung auf den Prototyp-Kessel installiert. Die Messungen dauerten vom November 2009 bis Ende März 2010.

In der Messreihe 2 wurden 53 Abbrände erfasst. In 14 davon wurden Staubemissionen in den ganzen ersten 30 Minuten gemessen. Pro Startphase wurden 2 Staubproben à 15 Minuten genommen. Also 28 Staubmessungen.

In vier Tests wurde als Zünder ein Heissluftgebläse mit Düse verwendet (gelbe Balken, Siehe Abb 10). In vier Tests wurde Nadelholz verbrannt, anstatt Laubholz (blaue Balken, Siehe Abb 10).

Brennholz (18% Atro)	Laubholz	Nadelholz
Standardprozedur	45	
Standardprozedur		4
Heissluftgebläse	4	
Total	49	4
Total Gesamt		53

Tab 1 Übersicht der Messungen

Der Kessel wurde von den BetreiberInnen geladen und befeuert. Es wurde kein spezielles Holz verwendet, sondern das übliche.

Die angewendete Standard Anfeuerprozedur ist in 5.2 beschrieben.

Der Wassergehalt des Brennholzes beträgt durchschnittlich 18% Atro.

In den ersten 15 Messungen wurden Optimierungen der Steuerungsparameter, sowie ein Software-Update vorgenommen.

6.1. Kohlenmonoxid

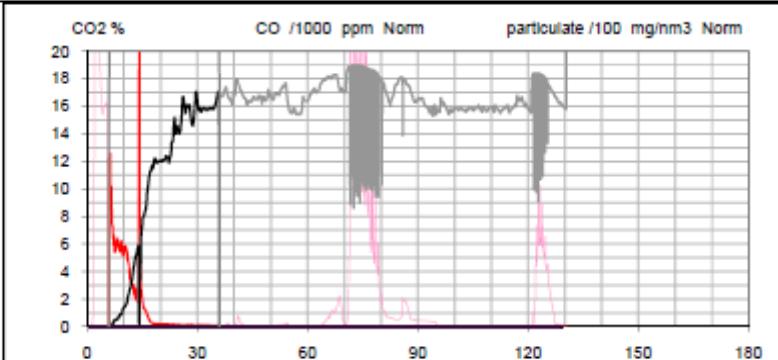
Der Mittelwert vom Kohlenmonoxid in mg/nm³ (bezogen auf 13 Vol. % Sauerstoff) in den gemessenen Abbränden ist in Abb 10 zu sehen.

Festzustellen ist, dass in der Startphase in 80% der Fälle der normierte CO-Mittelwert unter 4000 liegt, in 50% unter 2000 mg/nm³.

In 6 Fällen liegen die Werte über 6000 mg/nm³ mit Werten bis zu 14'000 mg/nm³.

Der beste CO-Mittelwert beträgt 572 mg/nm³ (siehe Abb 9).

Nach der Optimierung der Steuerungsparameter liegt der CO-Mittelwert der Startphase mit Laubholz mit einer Ausnahme jeweils unter 4000 mg/nm³, respektive als Mittelwert bei 1'800 mg/nm³ mit einer Spannweite von 2'500 (+1'400 -1200) mg/nm³. In Prozent ausgedruckt +150 -70%.

ANAPOL Gerätetechnik AG			SUBITO 1.0
Institut/ Firma	Name Strasse Ort	Buondi schwengiweg 12 Langenbruck	
Kunde	Name Strasse Ort	Spar Engeler Blüemlisalp Waldenburg	
Anlage	Typ Leistung kW Standort Bemerkung	Holzkessel Drummer Prototyp 35 Waldenburg	
Messung	Test Nr Brennstoff Wassergehalt %	60 2 18.0	Untere Heizwert 13'860 KJ/kg 3.85 kWh/kg
Auswertung	Datum Mittelwert von (Min.) O ₂ CO ₂ T Raum Tabgas Chemische Verluste Thermische Verluste	4.1.10 2 6 10.1 Vol% 10.4 Vol% 20 °C 133 °C 0.5 % 11.5 %	Start 1:22:4 CO2 % CO /1000 ppm Norm particulate /100 mg/nm ³ Norm  O ₂ Norm 13

<u>Verlust Rost</u>	0.0 %		
<u>Gewinn aus Kondensation</u>	0.0 %		
<u>Wirkungsgrad</u>	88.0 %		
Schadstoffe			
O ₂ -Norm %	ppm	mg/nm ³	mg/MJ
CO	460	575	422
NO	104	139	102
HC	6	19	14
NO ₂	0	0	0
NOx	104	213	156
SO ₂	0	0	0

Abb 9 Auswertungsblatt einer Messung mit CO/CO₂-Verlauf

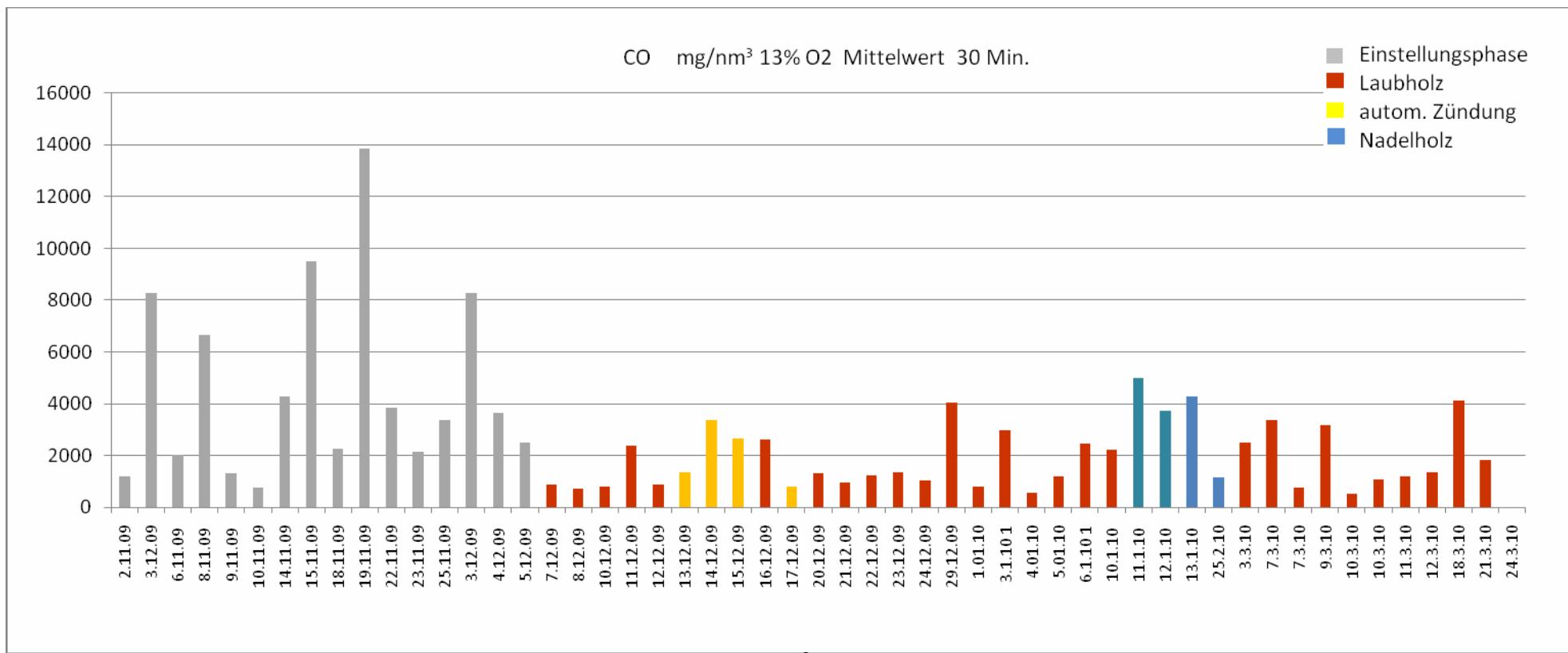


Abb 10 Abgasmessungen: Kohlenmonoxid-Gehalt (CO) aller Messungen in mg/nm³ bezogen auf einem Sauerstoff-Gehalt von 13 Vol. %. Mittelwerte in den ersten 30 Minuten.

Die CO-Werte in den Abbränden mit dem Heissluft-Gebläse liegen zwischen 700 und 3'400 mg/nm³ und sind daher deutlich unter dem als Ziel gesetzten Maximalwert.

Bei den Abbränden mit Nadelholz als Brennholz liegen die CO-Werte zwischen 1'200 und 5'000 mg/nm³. Hier wurde eine erhöhte Tendenz zur Hohlbrand-Bildung festgestellt. Wobei eine neue Parametrisierung und eine leichte Verbesserung der Geometrie zu niederen Abgaswerten führen können.

6.2. Staub

Die Staubmessungen sind in Abb 11 zu sehen.

Die Werte liegen zwischen 50 und 220 mg/nm³ (Norm 13%O₂) etwa mehr als 40% unter 100 mg/nm³.

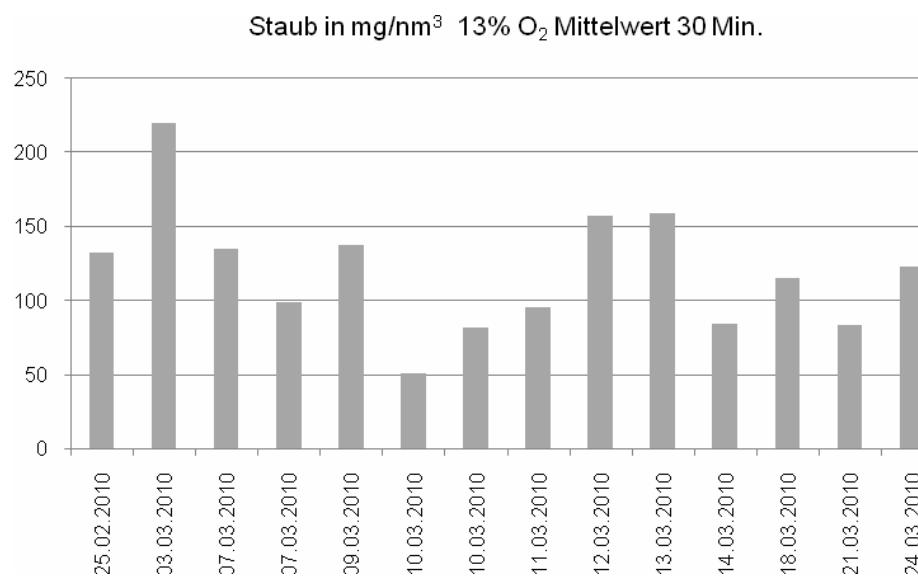


Abb 11 Staubemissions-Mittelwerte in den ersten 30 Minuten in mg/nm³ bezogen auf 13 Vol. % Sauerstoff.

Da die Staubmessungen in 2 Zeitspannen (0 bis 15 und 16 bis 31 Minuten) durchgeführt wurden, können wir feststellen, dass der grösste Teil des Staubausstosses (Werte 80 bis 800 mg/nm³) in den ersten 15 Minuten liegt. In der zweiten Viertelstunde der Startphase wurden Werte zwischen 17 und 85 mg/nm³ gemessen (bezogen auf 13% O₂)

6.3. Weitere Bemerkungen

Die Parametrierung der Steuerung hat viel Zeit in Anspruch genommen. Wir erwarten weitere markante Verbesserungen durch die Einführung von neuen Steuerungsparametern für die Startphase. Die Komponenten wie Abgastemperaturfühler oder Lambda-Sonde waren oft Ursache für einen nicht korrekten Betrieb. Die häufige Verschmutzung der Sonden war Grund von schlechten Abgaswerten in der Start- und Betriebsphase.

7. Schlussfolgerungen

Wir stellen fest, dass das gute Zusammenspiel zwischen Anfeuerprozedur, Geometrie und Steuerung die Emissionen der Startphase stark reduzieren.

Die Resultate entsprechen unseren Erwartungen und liegen im Bereich der Zielsetzung.

Der CO-Mittelwert aller Messungen beträgt 2'500 mg/nm³ und liegt unter dem gesetzten Ziel von 4000 mg/nm³. Der Gesamt-Staub-Mittelwert beträgt 117 mg/nm³ liegt über dem gesetzten Ziel von 100 mg/nm³. Daher wurde das Ziel für Staubemissionen knapp verfehlt.

Werden die letzten 30 Messungen mit den gleichen Einstellungen berücksichtigt, so schwankt der CO-Mittelwert der einzelnen Tests von 517 bis 4'102 mg/nm³. Mit einem Gesamt-CO-Mittelwert von 1'630 mg/nm³ und einer Spannweite von 3'500 (+2'500 -1100) mg/nm³ (in Prozent ausgedruckt +150 - 70%) kann noch nicht von „Wiederholbarkeit der Messungen“ die Rede sein. Wir können aber behaupten, dass es machbar ist, der CO-Mittelwert der Startphase auf jeden Fall unter 4'000 mg/nm³ zu bekommen. Diese grosse Streuung der Resultate ist einerseits auf die Form und den Zustand (Wasserinhalt, Heizwert, Knorrigkeit) des Brenn- und Anfeuerholzes sowie auf dessen Beschickung zurückzuführen, andererseits auf die durch Verschmutzung verfälschte Input-Signale der Lambdasonde und Temperaturfühler.

Daher lässt sich der Einfluss der einzelnen Komponenten (Anfeuerprozudur, Geometrie und Steuerung) nur statistisch (mit einer grossen Anzahl Messungen) eruieren.

Weiter erlauben uns die Resultate der durchgeführten Feldmessungen die nach folgenden Feststellung.

7.1. Geometrie

Die in der Messreihe 2 verwendete Geometrie wirkt sich positiv auf die Startphase aus.

Der geneigte Rost als wichtigstes Element, gefolgt von der Anfeuerwanne und den anderen konstruktiven Massnahmen (Brennkammeraustritt und Freihaltehaken) trägt dazu bei, die Emissionen auf ein tieferes Niveau zu senken.

Ein effektiver und korrekter Vergleich mit der bisherigen Geometrie ist nur beschränkt möglich, da es noch keine anderen, vergleichbare statistische Untersuchungen der Startphase gibt.

Der Einfluss jeder einzelnen Massnahme kann nicht eruiert werden. Dazu wären viermal mehr Messungen notwendig.

Trotzdem konnten viele Erkenntnisse über Geometrie und Ablauf zur Anfeuerphase gewonnen werden. Der Entwicklungsstand beträgt unserer Meinung nach 70 %, was bedeutet, dass es hier noch leichtes Verbesserungspotential gibt.

Zukünftige Anstrengungen betreffen vor allem die Umsetzung und Überprüfung der skizzierten geometrischen Lösungen auf die Gestaltung der verschiedenen Kesseltypen:

- Sturzbrand
- Unterer hinterer Abbrand
- Brennräume mit 1 m Scheitlänge

Bei der Konzeption des Rostbereichs sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Gute Luftverteilung auf der ganzen Rostfläche
- Bei allen möglichen Scheiter-Positionen keine Verhinderung der Verbrennungsluftzufuhr
- Klare Position der Anfeuerhilfe und des Anfeuerholzes
- Dauerhafte Formstabilität der Feuerraumteile

7.2. Anfeuerprozedur

Die Verwendung einer definierten Prozedur steigert die Zuverlässigkeit des Anfeuerns und vereinfacht deren Regelung. Nur mit definierten Prozeduren sind Weiterentwicklung und Verbesserung der Startphase möglich.

Mit einer Anfeuerhilfe und wenig (500-1'000 Gramm) Anfeuerholz wurde eine Prozedur gewählt, die recht einfach ist. Daher ist die Chance gross, dass sie bei den Holzfeuerungsbetreibern und – betreiberinnen auch Anwendung findet.

Die durchgeführten Tests zeigen, dass mit einem Heissluftgebläse eine ähnliche Anfeuerqualität erreicht werden kann. Die Werte (Siehe Abb 10) liegen in einem ähnlichen Bereich, wie jene mit der Anfeuerhilfe. Das Verbesserungspotential ist aber noch nicht ausgeschöpft.

Die automatische Zündung mittels einem Heissluftgebläse oder Heiz-Stab erhöht den Bedienungskomfort von Stückholzfeuerungen und kann wichtiges Thema für die nächste Kesselgeneration werden. Aus diesem Grund sollte das automatische Anfeuern weiter untersucht werden.

Stand der Entwicklung 20 %, was bedeutet, dass hier noch viel Potential für Weiterentwicklungen vorhanden ist.

7.3. Steuerung

Die Steuerung spielt in der Startphase eine zentrale Rolle. Die beste Geometrie und Anfeuerprozedur allein garantieren noch keinen emissionsarmen Start, wenn die Luftmenge und deren Verteilung im Primär- und Sekundärbereich nicht abgestimmt ist.

Die neue Steuerung der Fa. Lopper stellt eine gute Basis dar. Ihr Reglungspotential ist bei weitem nicht ausgeschöpft. Die Einführung von zusätzlichen Parametern und Regler-Strukturen können die Performance in der Startphase weiter verbessern.

Stand der Entwicklung 25 %, entsprechend ist hier noch ein grosses Potential für Weiterentwicklungen vorhanden.

Wichtige Erkenntnisse:

- Der Anfeuerprozess soll eher temperaturabhängig als zeitorientiert von Statten gehen, damit die Variation des Brennstoffs in Form und Qualität besser berücksichtigt werden kann.
- Die Lambda-Sonde ist in den ersten 30 Minuten unzuverlässig. Die von der Lambdasonde angegebenen Werte haben grosse Unterschiede zu den gemessenen Werten gezeigt. Grund dafür war oft die Verschmutzung der Sonde.
Eine regelmässige und einfache Reinigung ist sehr wichtig und kann durch eine Steckverbindung erleichtert werden
- Der Temperaturfühler im Abgas muss eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit haben. Auch dieser Fühler muss regelmässig und einfach gereinigt werden können, da sich eine Staubschicht aufbaut, welche genaue Messungen behindert. Auch für die Abgastemperatur-Sonde kann eine Steckverbindung die Reinigung erleichtern.

8. Ausblick

Eine schadstoffarme Startphase in der Stückholzfeuerung zu erzielen, ist eine sehr aufwendige Aufgabe, da hierfür statistisch relevante Messungen notwendig sind. Diese Aufgabe ist für einen Feuerungshersteller sehr schwierig, da einerseits die relativ grosse Variabilität des Brennstoffes in Kombination mit der spezifischen Feuerungskonstruktion und der Regelung eine grosse Herausforderung darstellt. Die Verbesserung der Startphase ist daher für ein Unternehmen oder eine Herstellerfirma allein in der heutigen Situation kaum möglich. Die Mitwirkung vom Bund ist deshalb unumgänglich, wenn die Emissionen bei den Stückholzfeuerungen markant reduziert werden sollen.

Massnahmen auf gesetzlicher Ebene sind möglich und wirksam, aber im Moment verfrüht. Für ein zuverlässiges und wiederholbares Messprozedere in der Startphase auf dem Prüfstand sind weitere Kenntnisse erforderlich, im Speziellen sind Staubreduktionsmassnahmen in der Startphase noch vertieft abzuklären.

Nicht zu unterschätzen ist der Einfluss der Betreiberin oder des Betreibers, der gerade beim manuellen Anfeuern eine grosse Unbekannte darstellen.

Aus den genannten Gründen sind Massnahmen auf verschiedenen Ebenen zu treffen:

- Technische Umsetzung
- Anfeuerprozedur / Information
- Gesetze

8.1. Technische Umsetzung

Da in dieser Untersuchung ein Kesselfabrikat detailliert analysiert wurde, sind die Aussagen vorderhand auf dieses Produkt mit der spezifischen Konstruktion erfolgreich anwendbar. Diese Massnahmen in Verbindung mit noch zusätzlichen Optimierungen bringen dieses Produkt auf einen hohen Qualitätsstandard in der Anfeuerphase.

Aufgabe der Fa. Lopper ist die Prüfung der Serientauglichkeit der vorgeschlagenen geometrischen Lösungen sowie die Anpassung der Steuerung. Eine Nachkontrolle durch Messungen (wie im Projekt Buondi) soll vom Bund finanziert werden, um die Kenntnisse zu konsolidieren.

Projekt / Aufgabe	Fa Lopper	Bund
Prüfung Serientauglichkeit der geometrischen Lösungen	X	
Anpassung Steuerung	x	
Projekt Erfolgskontrolle		x

Um eine Umsetzung für andere Feuerungsgeometrien zu erreichen, (Sturzbrand, Unterer hinterer Abbrand, Kessel mit 1m-Spälten) sind weitere Projekte ähnlicher Art wie Buondi mit anderen Herstellern notwendig:

Projekt / Aufgabe	Hersteller	Bund
Anpassung Brennraumgeometrie Sturzbrand	X	X
Anpassung Brennraumgeometrie unterer hinterer Abbrand	X	X
Anpassung Brennraumgeometrie 1m Später	X	X
Umsetzung	X	
Projekt Erfolgskontrolle		x

Die Feldmessungen an den verschiedenen Feuerungsarten liefern zudem wichtige Informationen für die Zulassungs- und Prüfkriterien.

8.2. Anfeuerprozedur und Information

Eine standardisierte Anfeuerprozedur bietet Vorteile für Hersteller, Betreiber und Holzlieferanten und bildet die Basis für die Weiterentwicklung der emissionsarmen Startphase.

Die Anfeuerprozedur muss einfach, praktikabel und günstig sein. Eine einheitliche Prozedur für alle Kessel ist wünschenswert aber keine Bedingung. Sie bietet den Herstellern einen Orientierungspunkt für die Entwicklung der Brennraumgeometrie. Die Holzlieferanten können die Verkaufsprodukte erweitern, in dem sie Anfeuersets (Anfeuerholz und –Hilfe) anbieten. Die Betreiber profitieren von einem schnellen, rauchfreien Anfeuern. Eine Informationskampagne ist für die Sensibilisierung dieser Akteure unabdingbar.

Projekt / Aufgabe	Hersteller	Verband	Bund	Kanton	Holzlieferant
Sensibilisierung		X	X	X	
Definition Anfeuerprozeduren	X		X		
Einführung von produktsspezifischen, standardisierten Anfeuer-Prozeduren	X	X			
Anfeuerset					X

8.3. Normwesen

Im heutigen Prüfverfahren (EN 303-51 für Stückholzkessel) wird die Startphase nicht erfasst. Grund waren die Schwierigkeiten, eine Anfeuerprozedur zu finden, die eine Wiederholbarkeit der Resultate garantiert. Der Technologiestand und das aktuell erweiterte Wissen erlauben uns einen neuen Anlauf über die Integration der Startphase im Prüfverfahren.

Die Resultate des Projektes Buondi zeigen, dass eine gewisse Wiederholbarkeit möglich ist. Wiederholbarkeit ist aber so zu verstehen, dass die Mittelwerte einen bestimmten Grenzwert nicht übersteigen. Ich finde aber, dass die Erkenntnisse im Moment noch nicht ausreichend sind, um einen Entwurf zur Ergänzung des Prüfverfahrens mit Kaltstart zu erstellen.

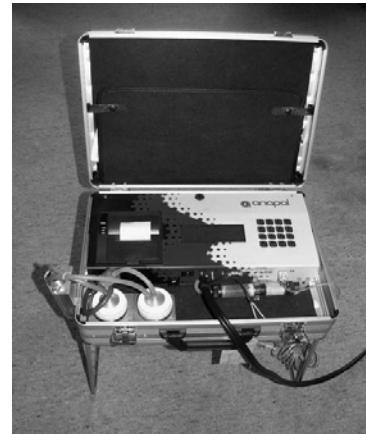
9. Referenzen

- /1/ Emissionsarmen Anfeuermethode für Stückholzfeuerungen Willi Vock/ Andres Jenni
- /2/ Anfeuermodul für Stückholzkessel G. Blum, B. Salerno .. EDMZ-Nr 805.202 d
- /3/ Abbrandverhalten von Klein-Holzfeuerung Ch. Gaegauf, B. Salerno ENET

Anhang

Abgasanalyse
Messgerät EU5000 Fa. Anapol

Technische Daten



Generelles

berechnet eta	0 - 100 %	berechnet Lambda	1 = -- Oder nach Brettschneider	Display	LCD 4 Zeilen 20 Zeichen/Zelle	Drucker	Nadeldrucker 24 Zeichen/Zelle
Lagertemperatur	-20 °C - 50 °C	Einsatztemperatur	5 - 40 °C	Gewicht	7 kg	Dimensionen	45 x 34 x 13 cm
Entnahmeschlauch	3.5 m	Netz-Anschluss	85 - 264 VAC 45 - 60 Hz Akku als Option	Kalibrierung	100 sec	Kalibrierung NDIR	1.5 min

Messbereiche

O2 Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 20.9% Vol. 0,1% Vol. T90 < 20 sec	CO tief opt. Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 2'000 ppm (4'000 ppm max.) 1 ppm T90 < 45 sec	CO2 NDIR Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 20.0% Vol. 0,1% Vol. T10-90 < 4 sec	HC Propan Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 60'000 ppm 1 ppm T10-90 < 4 sec
O2 Fahrzeuge opt. Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 100% Vol. 0,1% Vol. T90 < 5 sec	CO hoch NDIR Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 150'000 ppm 10 ppm T10-90 < 4 sec			HCn-Hexan Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 30'000 ppm 1 ppm T10-90 < 4 sec
NO Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 1'000 ppm (2'000 ppm max.) 1 ppm T90 < 45 sec	NO2 opt. Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 200 ppm (500 ppm max.) 1 ppm T90 < 65 sec	SO2 opt. Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 2'000 ppm (3'000 ppm max.) 1 ppm T90 < 45 sec	Temperatur Luft/Oel	0 - 450°C
NO Fahrzeuge opt. Messbereich Auflösung Reaktions-Tempo	0 - 5'000 ppm 1 ppm T95 < 20 sec					Temperatur Gas	0 - 450°C 0 - 800 °C opt.

Toleranzen

O2 O2 Fahrzeuge opt. 0 - 25%: ± 0.16% 25.1 - 100%: ± 1%	CO tief opt. ± 0.1 angezeigter Wert min. ± 12 ppm	CO2 NDIR 0 - 16.00%: ± 0.5% abs. oder ± 5.8% rel. 16.01 - 20.00%: ± 8.8% rel.	HC Propan 0 - 4'000 ppm: ± 9 ppm rel. 4'001 - 30'000 ppm: ± 8.8% rel. 30'001 - 60'000 ppm: ± 12.8% rel.
	CO hoch NDIR 0 - 100'000 ppm: ± 500 ppm abs. oder ± 6% rel. 100'000 - 150'000 ppm: ± 8.8% rel.		
NO ± 0.1 angezeigter Wert min. ± 10 ppm	NO2 opt. ± 7 ppm	SO2 opt. ± 20 ppm	HC n-Hexan 0 - 2'000 ppm: ± 9 ppm rel. 2'001 - 15'000 ppm: ± 8.8% rel. 15'001 - 30'000 ppm: ± 12.8% rel.
NO Fahrzeuge opt. 0 - 4'000 ppm: ± 50 ppm abs. oder ± 8% rel. 4'001 - 5'000 ppm: ± 10% rel.			
Temperaturen 0 - 100 °C 101 - 200 °C 201 - 300 °C 301 - 800 °C	Analysegerät ± 1 °C	Sonde ± 2 °C ± 2 % ± 6 °C	Total ± 3 °C ± 3 % ± 6 °C ± 9 °C

Staubmessung

Wöhler Staubmessgerät

Staubmessgerät SM 96



Funktionsprinzip:

Das Messgerät saugt zur Bestimmung der Massenkonzentration von Staub, Russ und Teer im Abgas von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe automatisch geregelt 135 Norm-Liter Rauchgas durch eine Filterhülse. Ein Teilstrom des Abgases kann in den vorne am Gerät angeschlossenen Abgassammelbeutel geleitet werden, um den Mittelwert von O₂ und CO zu bestimmen. Die Absauggeschwindigkeit beträgt 4 m/s, bezogen auf eine Rauchgastemperatur von 325 °C und einen Luftdruck von 1013 hPa. Die Messung wird gravimetrisch im Messlabor ausgewertet.

Vorteile:

- aktive Kühlung durch Peltier-Elemente sorgt für effektive Rauchgastrocknung
- Messintervalle einstellbar von 0...5 h, auch als Rauchgasaufbereitung einsetzbar

TÜV By RgG 177

Massenstromregelung: 9 NL/min, bei Druckdifferenzen bis 250 hPa an der Hülse, über Heissfilmanemometer

Schornsteinzug: Messbereich: 0...± 4.000 Pa
Genauigkeit: ± 3 Pa, >100 Pa ± 3 % v.M.
Rauchgasnormvolumen
Anzeigebereich: 135 NL ± 6,75 NL

Stromversorgung: 230 V AC, 250 W

Stromaufnahme: max. 3,5 A

Lagertemperatur: -20...+50 °C

Arbeitstemperatur: +10...+40 °C

Gewicht: 500 g (Sonde)
10,4 kg (Anzeigeeinheit)

Masse: 36 x 27 x16 cm



Die Filter wurden vor und nach der Messung 2 Stunden im Backofen (140 °C) dann 2 Stunden im Exsikkator getrocknet. Abgewogen wurden sie auf einer Präzisionswaage (Genauigkeit +- 0.02 mmg).